



ВЕСТНИК

Брестского государственного технического университета

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
(СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ);
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научно-теоретический журнал
Издается с января 2000 г.
Периодичность – 3 раза в год.

2(128)'2022

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО

ВОЙТОВ И. В., ЕЛОВИК В. Л. Методические основы для оценки воздействия на окружающую среду от внедрения частотно-регулируемого электропривода на насосных станциях систем водоснабжения и канализации **3**

ЖУК В. В., МАТВЕЕНКО Е. С. Расчет соединений деревянных элементов на гвоздях. Отечественный и зарубежный опыт **6**

ЛАЗОВСКИЙ Д. Н., ГЛУХОВ Д. О., ЛАЗОВСКИЙ Е. Д. Расчет изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой увеличением поперечного сечения в сжатой зоне **11**

ЛЕВЧУК Н. В. Некоторые вопросы реагентной очистки производственных сточных вод предприятий пищевой промышленности **17**

ЛЕОНИЧ С. Н., ШАЛЬИЙ Е. Е., ЛИТВИНОВСКИЙ Д. А., СТЕПАНОВА А. В., ЖУРАВСКАЯ А. В., МАЛЮК В. В. Содержание хлоридов и значение рН в поровом растворе бетона при карбонизации: анализ экспериментальных исследований **20**

МОЛОШ В. В., ТОМАШЕВ И. Г., КОЛЕСНИЧЕНКО М. В. Сопротивление срезу при продавливании плоских железобетонных плит без поперечной арматуры при совместном рассмотрении нормального и наклонного сечений **26**

НИКИТИН В. И., НИКИТИН С. К. Зависимости для расчета теплопроводности влажных капиллярно-пористых стеновых материалов **32**

ПОЙТА П. С., ШАЛОБЫТА Н. Н., ШАЛОБЫТА Т. П., ЧЕТЫРБОК А. А. Влияние формы контактной поверхности трамбовки на напряженно-деформированное состояние уплотняемого грунта **41**

ПОЛОНИНА Е. Н., ЛЕОНИЧ С. Н., ПОТАПОВ В. В., ЖДАНОК С. А. Синергетический эффект влияния наночастиц мунт и SiO₂ на характеристики портландцементного композита: эксперимент и теоретическое объяснение **47**

СУББОТИН О. С. Архитектурное наследие Кубани в контексте исторической среды жизнедеятельности (градостроительный аспект) **52**

ТУР В. В., ВОРОБЕЙ А. П. Модель сопротивления срезу бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов **56**

ТУР Э. А., СЧАСНАЯ Е. В., БАСОВ С. В., ТРИЧИК В. В. Физико-химические исследования аутентичных строительных растворов и окрасочных составов здания тюрьмы № 1 в г. Гродно **68**

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГРОМЫКО П. Н., ХАТЕТОВСКИЙ С. Н., ЮРКОВА В. Л., МАКАЦАРИЯ Д. Ю. Основные показатели эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов на основе использования многопоточной схемы нагружения **75**

КАЛУГИН Ю. К., ЛЕЩИК С. Д., ФИЛИППОВ А. И. Исследование влияния упругих перемещений шпindelного узла на равномерность толщины шпона и точность базирования при переработке фанерных сортиментов **79**

KUDINA N. F., ZALATA A. S., KARPENKO V. V., PRIHODZKO I. V., KURITSYN P. A. Effect of climatic factors on service life of insulating materials of traction electric machines **83**

МЕДВЕДЕВ О. А. Теоретико-вероятностный расчет числа тонких равных компенсаторов при достижении точности сборки методом регулирования **87**

МИШИН А. А., ЛЮЕВ А. С., МАНУЙЛОВ М. Н. Анализ возможности использования противоударных структур в авиационной технике **92**

ОВЧИННИКОВ Е. В., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., ХВИСЕВИЧ В. М., КОСТЮКОВИЧ Г. А., ПОПРУКАЙЛО А. В. Физико-механические характеристики аддитивных покрытий **95**

ПАРФИЕВИЧ А. Н., САЛИВОНЧИК Ю. Н., СЕЛИВОНИК М. В. Искусственные нейросетевые модели в акустической диагностике прямозубых зубчатых колес в составе многовалных приводов **100**

ПАТАПАЎ У. А., РУСАН С. І., СІВАЧЭНКА Л. А., БОЛАТАЎ С. У. Распрацоўка алгарытму аналітычнага метаду кінематычнага аналізу чатырохзвеннага механізма ланцужнага аграгата **105**

САВЧУК С. В., МОНТИК С. В., ПАРФИЕВИЧ А. Н. Технология глубокого рыхления на примере плуга-глубокорыхлителя ГР-70 **113**

ГЕОЭКОЛОГИЯ

ВОЛЧЕК А. А., БЕЗРУЧКО А. В. Экологическое состояние полигонов твердых коммунальных отходов брестской области **117**

ВОЛЧЕК А. А., БОРУШКО В. В. Моделирование теплового режима осушенных торфяно-болотных почв Белорусского Полесья **123**

ВОЛЧЕК А. А., ОКОРОНКО И. В. Оценка гидроэкологического состояния водосборных бассейнов юго-западной части Беларуси **127**

ВОЛЧЕК А. А., ПАРФОМУК С. И., ШЕШКО Н. Н., ШПЕНДИК Н. Н., ДАШКЕВИЧ Д. Н., СИДАК С. В., КУХАРЕВИЧ М. Ф. Оценка влияния рыбхоза «Пахва» на сток реки Смердь **133**

МЕШИК О. П., МОРОЗОВА В. А., БОРУШКО М. В. Методические подходы к оценке режима снежного покрова **139**

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

БИДЗЮРА Е. А. Теоретические основы становления сетей и кластеров в контексте обеспечения экономической безопасности **145**

ВИКТОРОВИЧ Е. С. Основные факторы и признаки психографического сегментирования в территориальном маркетинге **148**

ЗАЗЕРСКАЯ В. В. Теоретические аспекты экономического развития региона в современных условиях **152**

ЗАХАРЧЕНКО Л. А., МЕДВЕДЕВА Г. Б. Тенденции и проблемы развития венчурного финансирования в Республике Беларусь **156**

КУГАН С. Ф. Межстрановой анализ существующих тенденций в части цифровизации экономик **161**

КУЛАКОВ И. А., КУЛАКОВА Л. О. Тенденции развития корпоративных логистических информационных систем **164**

ЛЕОНОВИЧ Н. Н., СТАРОВОЙТОВА Т. Ф., ХОМИЦКАЯ Т. Г. Применение инструментального средства на основе трёхмерных структур данных в транспортном аспекте системы обращения с коммунальными отходами **168**

МИШКОВА М. П., ЕРМАКОВА Э. Э. Концептуальные подходы к исследованию финансового потенциала цепей поставок **173**

ПРУСОВ С. Г., ЗОРИНА Т. Г. Методические подходы к совершенствованию оценки эффективности цифровой трансформации энергетики Республики Беларусь **176**

СИНЮТИЧ К. В. Актуализация существующих стандартов в сфере транспортного обслуживания населения общественным транспортом Республики Беларусь **182**

УДК 628.12, 504.064

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И КАНАЛИЗАЦИИ

И. В. Войтов¹, В. Л. Еловик²

¹ Д. т. н., профессор, ректор Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Беларусь, e-mail: voitov@belstu.by

² Аспирант кафедры промышленной экологии Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Беларусь, e-mail: valery.yalovik@outlook.com

Реферат

Представлена методика определения показателей воздействия на окружающую среду от работы центробежных насосов систем подачи и распределения воды (СПРВ) и систем перекачки сточных вод (СПСВ). Приведены основные зависимости, позволяющие рассчитать затраты условного топлива на процесс перекачки воды и сточных вод и уровень выброса парниковых газов в CO₂-эквиваленте. Так же приведены зависимости определения уровня утечек за счет превышения расчетного напора в системе распределения воды. Даны рекомендации для практического применения методики при внедрении энергосберегающих и экологических мероприятий на насосных станциях СПРВ и СПСВ.

Ключевые слова: энергоэффективность, условное топливо, парниковые газы, система подачи и распределения воды, система перекачки сточных вод, насосный агрегат, экологичная эксплуатация, нерасчетные потери воды.

METHODOLOGICAL BASES FOR ASSESSING THE ENVIRONMENTAL IMPACT FROM THE INTRODUCTION OF A FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE AT PUMPING STATIONS OF WATER SUPPLY AND SEWERAGE SYSTEMS

I. V. Voitov, V. L. Yalovik

Abstract

A methodology for determining the environmental impact indicators from the operation of centrifugal pumps of water supply and distribution systems (WSDS) and wastewater pumping systems (WPS) is presented. The main dependences are given that allow calculating the cost of standard fuel for the process of pumping water and wastewater and the level of greenhouse gas emissions in CO₂ equivalent. The dependences of determining the level of leaks due to the excess of the calculated pressure in the water distribution system are also given. Recommendations are given for the practical application of the methodology in the implementation of energy-saving and environmental measures at the pumping stations of the WSDS and WPS.

Keywords: energy efficiency, standard fuel, greenhouse gases, water supply and distribution system, wastewater pumping system, pumping unit, environmentally friendly operation, off-design water losses.

Введение

Обоснованное внедрение частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) на насосных станциях СПРВ и СПСВ позволяет значительно снизить энергозатраты на транспортирование воды потребителю. Согласно положениям действующей нормативной литературы как на территории Республики Беларусь, так и за рубежом [5, 10] основным фактором воздействия на экологию от энергетического оборудования является уровень энергопотребления. Для удобства сравнения данный показатель рекомендуется определять относительно единицы выпускаемой продукции. Для насосного оборудования это величина удельного энергопотребления [3]. Данный показатель позволяет оценить и сравнить энергопотребление насосной станции в целом при варианном проектировании или при выборе конкурентноспособных комплектов насосного оборудования для реконструкции объекта и т. д. Оценить уровень использования потенциала энергоэффективности каждого конкретного насоса в составе насосной станции при помощи удельного энергопотребления весьма затруднительно.

Определения индекса экологичной эксплуатации насосного оборудования в рамках разработанной методики расчета режимов работы

Для решения задачи энергетической и экологической эффективности работы насосного оборудования больше подошел бы показатель, характеризующий отклонение фактического энергопотребления в каждом конкретном режиме работы от эталонного режима с максимально возможной для данного насоса энергоэффективностью. Эталонным режимом вполне справедливо можно назначить режим работы насоса, в котором будет обеспечиваться максимальный

КПД [2]. Тогда в качестве требуемого показателя может быть выбран индекс экологичной эксплуатации насосного оборудования EFI (Eco-Friendly Index) [6]:

$$EFI_i = t_i \cdot \left(\frac{N_{уд}^i - N_{уд}^{опт}}{N_{уд}^{опт}} \right), \quad (1)$$

где t_i – продолжительность работы насосного оборудования в i -м режиме,

$N_{уд}^i$ и $N_{уд}^{опт}$ – удельная потребляемая мощность насосом в i -м и оптимальном режиме соответственно:

$$N_{уд}^i = \frac{N_i}{Q_i}, \quad (2)$$

$$N_{уд}^{опт} = \frac{N_{опт}}{Q_{опт}}. \quad (3)$$

В данной работе расчет индекса EFI и его интерпретация несколько отличаются от предложенного Н. В. Фисенко [6,7] тем, что вместо индекса EFI предлагается определять и анализировать средневзвешенное отклонение потребляемой насосом энергии ΔE_i для каждого режима каждого насоса, входящего в состав насосной станции в диапазоне водопотребления от Q_{min} до Q_{max}

$$\Delta E_i = \left(\frac{N_{уд}^i - N_{уд}^{опт}}{N_{уд}^{опт}} \right). \quad (4)$$

Средневзвешенное отклонение потребляемой насосом энергии ΔE характеризует экологический потенциал (в соответствии с рекомендациями [5,10]) по экономии энергоресурсов, снижения валового

потребления условного топлива и, соответственно, снижения выбросов в атмосферу парниковых газов относительно оптимального режима. Практически реализовать в полном объеме данный потенциал невозможно, так как невозможно обеспечить в каждом режиме работу насоса с максимальным КПД. Но задачей оптимального выбора комплекта насосного оборудования и выбора оптимального алгоритма его работы должно быть направлены на минимизацию $\sum \Delta E$ как в целом по станции, так и ΔE отдельного для каждого насоса.

Поскольку значение индекса ΔE в оптимальном режиме принимает нулевое значение, в соответствии с положениями, изложенными в [3], необходимо подбирать насосное оборудование таким образом, чтобы наиболее продолжительное время насос работал с индексом ΔE , равным либо близким к нулю.

Определение неучтенных потерь воды в СПРВ. Оценка снижения утечек при внедрении РЭП

Помимо очевидного влияния на окружающую среду за счет потребления энергоресурсов, можно выделить ряд косвенных факторов, сопутствующих внедрению ЧРЭП, которые также влияют на уровень антропогенной нагрузки, на окружающую среду и имеют значительный экологический эффект. Как уже рассматривалось выше, работа центробежных насосов с ЧРЭП позволяет обеспечить в системе распределения воды именно то давление, которое требуется в данный момент времени для обеспечения бесперебойного водоснабжения. В то же время традиционные методы регулирования, ввиду особенности работы центробежных насосов (см. главу 1), создают в водопроводной сети некоторое избыточное давление, которое может превышать требуемое в несколько раз. Согласно основным закономерностям истечения жидкости через отверстие, снижение давления в системе в 2 раза позволяет снизить потери воды на утечки примерно на 30 %. Такое сокращение позволяет не только снизить прямые затраты на транспортирование воды потребителю. Снижение объема утечек позволяет нивелировать последствия от искусственного повышения уровня грунтовых вод в районе разгерметизации напорного водопровода, снизить уровень заболачивания территорий, подмыва оснований зданий и сооружений, загрязнения водоносных горизонтов. За счет более низкого давления в системе снижается вероятность возникновения аварийных порывов трубопроводов.

В процессе эксплуатации водопроводной и канализационной сети неизбежно возникают аварийные ситуации, связанные с разгерметизацией напорных трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры, технологических емкостей и т. п. в силу естественного износа, коррозионного разрушения или внешнего воздействия (на пример повреждения при проведении ремонтных работ).

Объем потерь питьевой воды в результате разгерметизации напорных трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры и технологического оборудования по разным оценкам может составлять от 20 до 30 % от общего водопотребления [4]. При этом объем утечек и неучтенных потерь воды $q_{ут}$ напрямую зависит от давления H в системе трубопроводов. Для расчета можно использовать формулу Торричелли [1, с. 25–26]:

$$q_{ут} = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент расхода (приблизительно $\mu = 0,6–0,62$),

ω – площадь живого сечения отверстия, через которое происходит утечка,

g – ускорение свободного падения.

Поскольку применение ЧРЭП на насосных агрегатах СПРВ позволяет стабилизировать давление в системе на минимально требуемом уровне, обеспечивающем бесперебойное водоснабжение любого потребителя, то наряду с этим снижается и объем утечек и неучтенных потерь воды по сравнению с альтернативными способами регулирования. Для наглядности сравним два случая работы насосной станции, оборудованной ЧРЭП:

- 1) стабилизация давления осуществляется по датчику на напорном коллекторе насосной станции;
- 2) стабилизация давления осуществляется по датчику, расположенному в диктующей точке СПРВ.

В первом случае на станции поддерживается постоянное давление H_p , равное расчетному при максимальном водопотреблении. Давление в любой точке системы трубопроводов $H_{ту}^1$ будет равняться давлению, развиваемому насосом H_p при водопотреблении Q [3], за вычетом разницы геодезических отметок (высот) установки оси насоса $Z_{нас}$ и оси трубопровода в точке утечки $Z_{ту}$, и величины гидравлических потерь напора $\Delta h_{ту}$ от насосной станции до точки утечки при водопотреблении Q :

$$H_{ту}^1 = H_p - (Z_{ту} - Z_{нас}) - \Delta h_{ту}. \quad (6)$$

Объем утечек в рассматриваемой точке в таком случае определяется согласно выражению (4.4):

$$q_{ту}^1 = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{ту}^1}. \quad (7)$$

Во втором случае, при подаче воды в СПРВ, при стабилизации давления в диктующей точке, станция будет поддерживать давление $H_{тр}$, требуемое для обеспечения текущего уровня водопотребления:

$$H_{ту}^2 = H_{тр} - (Z_{ту} - Z_{нас}) - \Delta h_{ту}. \quad (8)$$

Тогда объем утечек при использовании РЭП может быть определен как

$$q_{ту}^2 = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{ту}^2}. \quad (9)$$

Объем снижения утечек $\Delta q_{ту}$ за счет стабилизации давления на минимально-требуемом уровне в водопроводной сети при помощи ЧРЭП можно определить как разницу:

$$\Delta q_{ту} = q_{ту}^1 - q_{ту}^2. \quad (10)$$

При этом дополнительный объем сэкономленной мощности можно определить согласно выражению (11) как

$$\Delta N_{утечки} = \frac{\rho \cdot g \cdot \Delta q_{ту} \cdot H_{нас}}{\eta}. \quad (11)$$

Объем неучтенных потерь воды из водоразборной арматуры при наличии избыточного давления оценивается аналогично утечкам при порыве трубопровода.

Снижение объема утечек, особенно скрытых и не фиксируемых визуально, оказывает положительное влияние не только на технико-экономические показатели СПРВ, но и непосредственным образом на снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет:

- снижения объема забора воды из природных источников;
- снижения уровня грунтовых вод и как следствие снижения негативного эффекта от подтопления и заболачивания территорий, размыва ландшафта и т. д.

Рассмотренный выше расчет может быть использован при оценке экологических рисков и экологического урона при эксплуатации СПРВ и СПСВ.

Оценка экологического эффекта при внедрении РЭП на насосных станциях СПРВ и СПСВ

В большинстве случаев основной целью внедрения ЧРЭП на насосных станциях СПРВ и СПСВ является повышение энергоэффективности процесса транспортирования потребителю воды и перекачки сточных вод. За счет этого оптимизируются не только экономические показатели, но и экологические за счет снижения удельного потребления условного топлива на выработку электроэнергии и как следствие снижение выброса в атмосферу парниковых газов.

По данным Национального статистического комитета Республики Беларусь и ГПО «Белэнерго», удельный расход условного топлива $q_{тут}$ на отпуск электроэнергии по энергосистеме в целом составил 240,7 г/кВт·ч в 2019 г. и 238,5 г/кВт·ч в 2020 г. Таким образом, используя величину прогнозируемой экономии электроэнергии ΔW_T после внедрения ЧРЭП [3], можно определить уровень снижения потребления условного топлива:

$$\Delta G_{mym} = \Delta W_m \cdot q_{mym} \quad (12)$$

Удельное значение выбросов парниковых газов в CO₂-эквиваленте на генерацию 1 кВт·ч электроэнергии q_{CO_2} для электростанций, работающих на углеводородном топливе, составляет 491 г CO₂-экв/кВт·ч, для атомных электростанций – 14,9 г CO₂-экв/кВт·ч, для гидроэлектростанций – 6,6 г CO₂-экв/кВт·ч, для ветроэлектростанций – 16,4 г CO₂-экв/кВт·ч, для солнечных фотоэлектрических станций – 49,2 г CO₂-экв/кВт·ч [8]. Используя структуру распределения генерируемой электроэнергии по типам электростанций [9, с. 61], можно получить средневзвешенное значение удельного выброса парниковых газов без учета атомной энергетики – 483,7 г CO₂-экв/кВт·ч и с учетом перспективной доли атомной энергетики (до 30 %) – 340,6 г CO₂-экв/кВт·ч. Снижение уровня выбросов парниковых газов в т CO₂-экв за счет снижения энергопотребления насосной станции после внедрения РЭП можно определить из выражения:

$$\Delta G_{CO_2} = \Delta W_m \cdot \frac{q_{CO_2}}{10^6} \quad (13)$$

Выводы

1. Разработанная методика расчета режимов работы позволяет оценить уровень экологичности эксплуатации насосного оборудования как по отдельности, так и в объеме насосной станции в целом. Индекс EFI, определенный для каждого конкретного режима работы насосной станции, характеризует теоретический потенциал по снижению энергозатрат используемым оборудованием. Наличие большого потенциала по экономии электроэнергии должно быть поводом для начала разработки мероприятий по оптимизации режимов работы насосного оборудования вплоть до его замены как на действующих объектах, так и при новом проектировании.
2. Внедрение ЧРЭП на насосных станциях СПРВ населенных пунктов и промышленных предприятий позволяет снизить уровень утечек и неучтенных нецелевых расходов воды. Это положительным образом влияет не только на снижение энергопотребления на транспортировку воды потребителю, но и снизит уровень нерационального потребления ресурса, снизит вероятность обводнения и заболачивания территорий. Предложенный метод расчета объема утечек возможно учитывать при оценке прогнозируемого или фактического экологического ущерба. Оценивать уровень нецелевых расходов воды в процессе водопользования.
3. Разработанная методика позволяет оценить прогнозируемый уровень снижения потребления уловного топлива и уровень снижения выбросов парниковых газов в результате планируемых мероприятий по внедрению ЧРЭП или оптимизации режимов работы насосного оборудования. Полученные результаты могут быть использованы для экологического обоснования проектных решений по модернизации, реконструкции и строительству новых насосных станций.

Список цитированных источников

1. Агеева, В. В. Гидравлика. Лекции для студентов заочной формы обучения направления подготовки 270100 – «Строительство»: учебное пособие / В. В. Агеева. – Н. Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 2011. – Часть 2. Гидродинамика. – 81 с.
2. Еловик, В. Л. Критерии стабильной и эффективной работы насосного оборудования с частотно-регулируемым приводом / И. В. Войтов, В. Л. Еловик // Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 1 (241). – С. 197–204.
3. Еловик, В. Л. Методика расчета и анализа режимов работы насосных агрегатов, оборудованных регулируемым электроприводом / В. Л. Еловик // Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2019. – № 2 (223). – С. 204–213.
4. Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках / Б. С. Лезнов. – М.: ИК «Ягорба» - «Биоинформсервис», 1998. – 180 с.
5. Межгосударственный стандарт. Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем: ГОСТ 33969-2016 (ISO/ASME 14414:2015). – М.: Стандартинформ, 2017. – 17 с.

6. Фисенко, В. Н. Индексы энергетической эффективности группы погружных центробежных насосов, работающих с переменным профилем нагрузки в водозаборных скважинах / В. Н. Фисенко // Вода Magazine. – 2017. – № 9. – С. 24–30.
7. Фисенко, В. Н. Энергетическая эффективность насосов в системах водоснабжения и водоотведения / В. Н. Фисенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 6. – С. 52–63.
8. Черняховская, Ю. В. Выбросы парниковых газов в электроэнергетике и их снижение от внедрения российских проектов атомных электростанций / Ю. В. Черняховская // Вестник МЭИ. – 2017. – № 3. – С. 46–52.
9. Энергетический баланс Республики Беларусь. Статистический сборник. – Мн.: Национальный статистический комитет, 2021. – 148 с.
10. Pump selection considerations: Energy tips - Pumping systems: tip sheet / U.S. Department of Energy. – 2005. – № 2.

References

1. Ageeva, V. V. Gidravlika. Lekcii dlya studentov zaocnoj formy obucheniya napravleniya podgotovki 270100 – «Stroitel'stvo»: uchebnoe posobie / V. V. Ageeva. – N. Novgorod: Nizhegorod. gos. arhitek.-stroit. un-t, 2011. –Chast' 2. Gidrodinamika. – 81 s.
2. Elovik, V. L. Kriterii stabil'noj i effektivnoj raboty nasosnogo oborudovaniya s chastotno-reguliruемым приводом / I. V. Vojtov, V. L. Elovik // Trudy BGTU. Seriya 2. Himicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoeologiya. – 2021. – № 1 (241). – S. 197–204.
3. Elovik, V. L. Metodika rascheta i analiza rezhimov raboty nasosnyh agregatov, oborudovannyh reguliruемым электроприводом / V. L. Elovik // Trudy BGTU. Seriya 2 Himicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoeologiya. – 2019. – № 2 (223). – S. 204–213.
4. Leznov, B. S. Energoberezenie i reguliruемый привод v nasosnyh ustanovkah / B. S. Leznov. – M.: IK «YAgorba» - «Bioinformservis», 1998. – 180 s.
5. Mezghosudarstvennyj standart. Energeticheskaya effektivnost'. Ocenka energoeffektivnosti nasosnyh sistem: GOST 33969-2016 (ISO/ASME 14414:2015). – M.: Standartinform, 2017. – 17 s.
6. Fisenko, V. N. Indeksy energeticheskoy effektivnosti gruppy pogruzhnyh centrobeznyh nasosov, rabotayushchih s peremennym profilem nagruzki v vodozabornyh skvazhinah / V. N. Fisenko // Voda Magazine. – 2017. – № 9. – S. 24–30.
7. Fisenko, V. N. Energeticheskaya effektivnost' nasosov v sistemah vodosnabzheniya i vodootvedeniya / V. N. Fisenko // Vodospabzhenie i sanitamaya tekhnika. – 2018. – № 6. – S. 52–63.
8. Chernyahovskaya, Yu. V. Vybrosty parnikovyh gazov v elektroenergetike i ih snizhenie ot vnedreniya rossijskih proektov atomnyh elektrostantsij / Yu. V. Chernyahovskaya // Vestnik MEI. – 2017. – № 3. – S. 46–52.
9. Energeticheskij balans Respubliki Belarus'. Statisticheskij sbornik. – Mn.: Nacional'nyj statisticheskij komitet, 2021. – 148 s.
10. Pump selection considerations: Energy tips - Pumping systems: tip sheet / U.S. Department of Energy. – 2005. – № 2.

Материал поступил в редакцию 20.05.2022

РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГВОЗДЯХ. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

В. В. Жук¹, Е. С. Матвеевко²

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь

² Магистр, аспирант кафедры строительных конструкций
Брестского государственного технического университета, e-mail: Elizabeth.Brenkovich@yandex.by

Реферат

Проведен анализ методики расчета соединений деревянных элементов на гвоздях по отечественным и зарубежным нормам. Выполнен сравнительный расчет стыка неразрезного прогона по предельным состояниям несущей способности.

Ключевые слова: нормы проектирования, древесина, нагельное соединение, гвоздь, несущая способность.

CALCULATION OF JOINTS OF WOODEN ELEMENTS ON NAILS. DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE

V. V. Zhyk, E. S. Matweenko

Abstract

The analysis of the method for calculating the joints of wooden elements on nails according to domestic and foreign standards was carried out. A comparative calculation of the joint of a continuous run was performed according to the limit states of the bearing capacity.

Keywords: design standards, wood, dowel joint, nail, load-bearing capacity.

Введение

Проектирование деревянных конструкций в Республике Беларусь осуществлялось в соответствии со СНиП II-25-80 [1], введенными в действие с 1 января 1982 года. Данные нормы были разработаны на основе экспериментальных и теоретических работ, выполненных в СССР в 40–70-е годы прошлого столетия. 1 июля 2001 года взамен СНиП II-25-80 были введены в действие нормы Республики Беларусь СНБ 5.05.01-2000 [2]. 1 января 2010 года взамен СНБ 5.05.01-2000 был введен в действие технический кодекс установившейся практики ТКП 45-5.05-146 [3]. Нормативные документы [2, 3] были дополнены новыми положениями в части расчета деревянных конструкций по предельным состояниям (расчетные значения нагрузок, коэффициенты условий работы для учета влажности и класса длительности нагрузки и т. д.). С учетом появления новых механических связей для соединения деревянных элементов (металлические зубчатые пластины, наклонно вклеенные стержни), были введены положения по расчету и конструированию данных соединений. В то же время положения по расчету соединений нагельного типа, в частности соединений деревянных элементов на гвоздях, практически не изменялись по сравнению со СНиП II-25-80.

Начиная с 80-х годов прошлого столетия заводы по производству метизов, кроме обычных гвоздей из стальной проволоки, начали выпускать гвозди с кольцевой и винтовой резьбой, с винтовой резьбой и заершённые, с заершёнными стержнями [4], в том числе из термически упрочненной стали. Проведенные испытания соединений деревянных элементов на профилированных гвоздях при действии кратковременной нагрузки показали, что гвозди с кольцевой и винтовой резьбой, изготовленные из термически обработанных сталей, при сдвиге обладают большей кратковременной несущей способностью в 1.5 раза по сравнению с соединениями на обычных проволочных гвоздях [5].

С целью приведения национальных стандартов и норм проектирования в строительстве в соответствии с международной и европейской практикой в Республике Беларусь с 01.01.2010 года [6, 7], были введены в действие нормы проектирования Европейского Союза, в том числе ТКП EN 1995-1-1-2009 [8], идентичные европейскому стандарту EN 1995-1-1:2004+A1 [9].

В настоящее время проектирование деревянных конструкций осуществляется в соответствии со строительными правилами

СП 5.05.01-2021 [10], введенными в действие с 1 июня 2021 года. С выходом СП 5.05.01-2021 действующий в Республике Беларусь ТКП 45-5.05-146 утратил силу.

Внедряя в практику технического регулирования строительной сферы европейские подходы, Минстройархитектуры столкнулось с трудностями: не успевают создаваться испытательные центры и лаборатории, отсутствуют практические пособия для расчета конструкций по еврокодам, имеют место ошибки в оригиналах еврокодов [6].

Вступая в Евросоюз, новые члены, например, как Польша, Чехия, Литва, Латвия взяли обязательства ввести Еврокоды на территории своих стран. И они в течение последних лет постепенно их внедряют в практику. Так, в соседней Польше до 2010 года одновременно действовали национальный стандарт PN-B [11] и польская версия Еврокодов PN-EN, в Чехии – ČSN [12] и ČSN P ENV. Такой «мягкий» переход к Еврокоду 5 позволил нашим соседям разработать национальные приложения (со значениями параметров, установленных национальными органами стандартизации), обеспечить проектировщиков нормативно-методической литературой, переиздать учебники и пособия для расчета конструкций из древесины [13–16].

Определенная работа в части обеспечения проектировщиков нормативной литературой проводится и в Республике Беларусь. В 2013 был введен в действие кодекс установившейся практики ТКП 45-5.05-175-2012 [17], установивший правила расчета деревянных конструкций при проектировании в соответствии с ТКП EN 1995-1-1. После ввода в действие строительных правил СП 5.05.01-2021 с целью обеспечения студентов учебно-методической литературой в Брестском государственном техническом университете изданы методические указания по расчету ограждающих и несущих конструкций покрытия [18–20].

Авторами предпринята попытка сравнить методики расчета соединений элементов из древесины на гладких с круглым поперечным сечением гвоздях, работающих на сдвиг по отечественным [8, 10] и зарубежным нормам [9, 11, 12, 21–23], разработанным на основе Еврокода 5 [9], со значениями параметров, установленных национальными органами стандартизации.

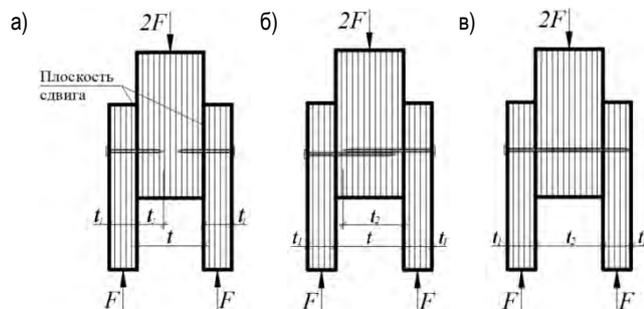
Методика расчета соединений нагельного типа по отечественным нормам

Несущая способность $F_{v,ef,Rd}$ однорядного соединения с одной плоскостью сдвига (рисунок 1а, б) и расположением нагелей по направлению волокон определяют по формуле

$$F_{v,ef,Rd} = F_{v,Rd} \cdot n_{ef}, \quad (1)$$

где $F_{v,Rd}$ – расчетное значение несущей способности для одного среза нагеля в ряду соединения;

n_{ef} – расчетное число нагелей в ряду, параллельном направлению волокон.



а) и б) – примеры соединений с одной плоскостью сдвига;
в) – пример с двумя плоскостями сдвига

Рисунок 1 – Схемы соединений элементов на нагелях

Расчетное значение несущей способности $F_{v,Rd}$ для одного среза нагеля в соединении определяют по формуле

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M}, \quad (2)$$

где k_{mod} – коэффициент модификации (таблица 5.4 [10]);

$F_{v,Rk}$ – характеристическое значение несущей способности для одного среза нагеля в соединении, рассчитываемое по формулам таблицы 9.1 [10];

γ_M – частный коэффициент свойств материалов и изделий (таблица 5.6 [10]).

Согласно [8, 10] минимальное характеристическое значение несущей способности для каждой из плоскостей сдвига на один элемент (гвоздь) в соединениях древесины с древесиной определяется из выражений:

– для односрезовых соединений:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d, & (a) \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d, & (б) \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right], & (в) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, & (г) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, & (д) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}. & (е) \end{cases} \quad (3)$$

– для двухсрезовых соединений:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d, & (a) \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d, & (б) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, & (в) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, & (г) \end{cases} \quad (4)$$

где $f_{h,i,k}$ – характеристическое значение сопротивления древесины i -го элемента соединения вдавливанию нагеля плашмя по направлению волокон и определяемое по формулам;

$f_{h,k} = 0,082\rho_k d^{0,3}$ – для соединения с использованием гвоздей диаметром до 8 мм без предварительного сверления отверстий;

$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$ – для соединения с использованием гвоздей диаметром до 8 мм с предварительным сверлением отверстий; здесь ρ_k – характеристическое значение плотности древесины, кг/м³ (таблица 6.2 [10]);

d – диаметр гвоздя, мм;

t_1 – толщина элемента, в который забивается гвоздь, если соединение с одной плоскостью сдвига (рисунок 1а, б);

t_1 – минимальное значение из толщин элементов с основной частью гвоздя и величины забитой части гвоздя в случае с двумя плоскостями сдвига в соединении (рисунок 1в);

t_2 – величина забитой части гвоздя с острием, если соединение с одной плоскостью сдвига (рисунок 1а, б);

t_2 – толщина среднего элемента в случае с двумя плоскостями сдвига в соединении (рисунок 1в);

β – коэффициент, учитывающий отношение характеристического значения сопротивления материала элемента 1 и элемента 2 при вдавливании в них жесткого нагеля плашмя, определяемый по формуле $\beta = f_{h,2,k} / f_{h,1,k}$;

$F_{ax,Rk}$ – характеристическое значение несущей способности нагеля при выдергивании из элемента соединения, определяемое в соответствии с правилами 9.4 [10];

$M_{y,Rk}$ – характеристическое значение момента, вызывающего образование пластического шарнира в поперечном сечении нагеля, определяемое для гладких гвоздей круглого поперечного сечения по формуле $M_{y,Rk} = 0,3f_u d^{2,6}$;

здесь f_u – прочность материала проволоки гвоздя при растяжении.

Технический кодекс установившейся практики ТКП EN 1995-1-1-2009 [8] и строительные правила СП 5.05.01-2021 [10], по сравнению с методикой расчета по СНиП II-25-80 [1], учитывают большее число параметров, влияющих на величину несущей способности одного среза гвоздя в соединениях древесины с древесиной: учитываются механические характеристики материалов (характеристическое значение сопротивления вдавливанию нагеля плашмя, характеристическое значение момента, вызывающего образование пластического шарнира в поперечном сечении нагеля, характеристическое значение несущей способности нагеля при выдергивании); физические характеристики (плотность древесины, технологию установки гвоздей).

Результаты сравнительного анализа расчета [24] узла крепления элемента решетки к нижнему поясу фермы из досок (пример 5.1 [13]) по ТКП EN 1995-1-1-2009 [8] и СНиП II-25-80 [1] показали, что расчетное значение несущей способности $F_{v,Rd}$ для одного среза гвоздя в соединении в 1,5 раза выше соответственно, что, в свою очередь, позволяет уменьшить число крепежных изделий.

Отметим, что в выражениях (3) и (4) второе слагаемое $F_{ax,Rk}/4$, учитывающее эффект нити, согласно ТКП EN 1995-1-1-2009 [8] ограничивалось по величине в процентном отношении от несущей способности по теории пластичности Джохансена – для гладких гвоздей 15 %. Более того, согласно п. 8.2.2 [8], расчет нагельных соединений древесины с древесиной можно было вести без учета эффекта нити, при условии, что характеристическое значение несущей способности нагеля при выдергивании $F_{ax,Rk}$ не определено. Данные положения не были включены в СП 5.05.01-2021 [10].

Методика расчета соединений нагельного типа по зарубежным нормам

В последнем нормативном документе по проектированию деревянных конструкций в Украине ДБН В.2.6-161:2017 [21], который фактически содержит положения нормативных документов ТКП EN 1995-1-1-2009 [8] и СП 5.05.01-2021 [10], формулы для расчета

значения несущей способности $F_{v,Rk}$ для одного среза нагеля аналогичны формулам (2), (3) и (4).

Расчетное значение несущей способности R_d для одного среза нагеля в соединениях деревянных элементов по польским нормам PN-B-03150:2000 [11] определяют по формулам:

– для односрезовых соединений:

$$R_d = (\min.) \begin{cases} f_{n,1,d} \cdot t_1 \cdot d, & (a) \\ f_{n,2,d} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta, & (b) \\ \frac{f_{n,1,d} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right], & (b) \\ 1,1 \frac{f_{n,1,d} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,d}}{f_{n,1,d} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right], & (r) \quad (5) \\ 1,1 \frac{f_{n,1,d} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,d}}{f_{n,1,d} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right], & (d) \\ 1,1 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,d} \cdot f_{n,1,d} \cdot d}, & (e) \end{cases}$$

– для двухсрезовых соединений:

$$R_d = (\min.) \begin{cases} f_{n,1,d} \cdot t_1 \cdot d, & (a) \\ 0,5 f_{n,1,d} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta, & (b) \\ 1,1 \frac{f_{n,1,d} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,d}}{f_{n,1,d} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right], & (b) \quad (6) \\ 1,1 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,d} \cdot f_{n,1,d} \cdot d}, & (r) \end{cases}$$

где $f_{n,i,d}$ – расчетное значение сопротивления древесины i -го элемента соединения вдавливанию нагеля плашмя по направлению волокон и определяемое по формуле $f_{n,i,d} = K_{mod,i} \cdot f_{n,i,k} / \gamma_M$; здесь $K_{mod,i}$ – коэффициент модификации (таблица 3.2.5 [11]);

$f_{n,i,k}$ – характеристическое значение сопротивления древесины i -го элемента сопротивления вдавливанию нагеля плашмя по направлению волокон;

γ_M – частный коэффициент свойств материалов (таблица 3.2.2 [11]);

t_1 – толщина элемента, в который забивается гвоздь, если соединение с одной плоскостью сдвига (рисунок 1а, б);

t_1 – минимальное значение из толщин элементов с основной частью гвоздя и величины забитой части гвоздя в случае с двумя плоскостями сдвига в соединении (рисунок 1в);

t_2 – величина забитой части гвоздя без острия за вычетом зазора между соединяемыми элементами, если соединение с одной плоскостью сдвига (рисунок 1а, б);

t_2 – толщина среднего элемента в случае с двумя плоскостями сдвига в соединении (рисунок 1в);

d – диаметр гвоздя;

β – коэффициент, определяемый по формуле

$$\beta = f_{n,2,d} / f_{n,1,d};$$

$M_{y,d}$ – расчетное значение момента, вызывающего образование пластического шарнира в поперечном сечении нагеля, определяемое по формуле $M_{y,d} = M_{y,k} / \gamma_M$;

здесь $M_{y,Rk} = 0,3f_u d^{2,6}$ – характеристическое значение момента, вызывающего образование пластического шарнира в поперечном сечении гладкого гвоздя круглого поперечного сечения;

f_u – прочность материала проволоки гвоздя при растяжении.

Анализ нормативно-технической литературы, изданной в Чехии, показывает, что при расчете соединений древесины на гвоздях используется методика как в Еврокоде 5 [9], так и методика немецких

норм DIN 1052:2004 [14, 15]. При определении расчетного значения несущей способности для одного среза нагеля в соединении [14] используют формулу

$$R = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_y \cdot f_{n,d} \cdot d}, \quad (7)$$

где $M_y = M_{y,k} / \gamma_M$, $f_{n,d} = f_{n,k} \cdot K_{mod} / \gamma_M$.

При конструировании соединений деревянных элементов на гвоздях предполагают, что в соединении раньше наступит нелинейное разрушение при изгибе нагеля. Такой подход позволяет значительно сократить время расчета – вместо шести формул Еврокода 5 использовать одну.

В Китае при расчете соединений деревянных элементов на гвоздях используют положения Еврокода 5 [9] – формулы (5) и (6).

Литовские нормы STR 2.05.07:2005 [22] включают положения Еврокода 5 в части общих указаний по проектированию деревянных конструкций и механических свойств древесины и плитных материалов на ее основе. Остальные положения по проектированию, в том числе и соединений деревянных элементов на гвоздях, фактически повторяют СНиП II-25-80 и СП 64.13330.2011 [26].

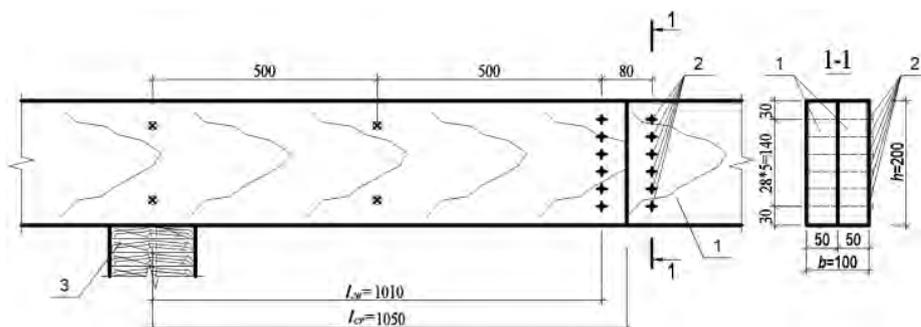
Анализ результатов расчета по разным нормам

Нормы по проектированию деревянных конструкций, действующие в Республике Беларусь и странах ближнего и дальнего зарубежья, за исключением литовских норм, приведены в соответствии с нормами Европейского Союза. На основе научных исследований и опыта строительства, в процессе внедрения Еврокода 5, были разработаны национальные приложения, которые отличаются от положений по проектированию, рекомендуемых Еврокодом. Так, только в нормы Беларуси и Украины, при расчете соединений деревянных элементов на гвоздях, включено второе слагаемое $F_{ax,Rk}/4$ (формулы (3) и (4)), учитывающее эффект нити. В практических расчетах при конструировании, например, стыков спаренных прогонов [14] или расчете элементов крепления обшивок к деревянному каркасу стеновых панелей [25], когда сопротивление стержня гвоздя непосредственному выдергиванию из древесины является доминирующим в работе соединений, определяют расчетное значение нагеля при выдергивании $F_{ax,Rd}$.

Наблюдается разный подход к назначению величины частного коэффициента свойств материала соединений γ_M . В нормах Беларуси, Украины и Литвы этот коэффициент принят равным 1,3, в Польше, Чехии и Китае – 1,1. Кроме того, в нормах Беларуси, Украины, Китая и Литвы приняты разные величины γ_M для пиломатериалов – 1,3; для клееной древесины – 1,25; LVL, фанеры, ОСП – 1,2. В Польше и Чехии вышеперечисленные материалы объединены в одну группу, для которой принят коэффициент $\gamma_M = 1,3$.

Отметим разный подход и к определению величины забитой части гвоздя (t_2). В польских нормах при определении величины t_2 не учитывают острей гвоздя ($1,5d$) и зазоры между соединяемыми элементами (1 мм на зазор). Это положение заложено в литовские нормы с той лишь разницей, что величина зазора принимается равной 2 мм.

В качестве примера конструирования деревянных элементов на гвоздях рассмотрим расчет стыка спаренного прогона (рисунок 2) по предельным состояниям несущей способности. Исходные данные для расчета приняты по данным примера 4 [18]. Результаты расчета по нормам Республики Беларусь, Польши, Чехии, Китая и Литвы представлены в таблице 1.



1 – доски сечением 50x200 мм; 2 – гвозди Ø4 мм, l = 100 мм; 3 – несущая конструкция

Рисунок 2 – Стык неразрезного прогона

Таблица 1 – Результаты расчета стыка прогона

Нормативный документ	Минимальная величина значения несущей способности для одного среза гвоздя, Н	Число гвоздей, n_{ef}
СП 5.05.01-2021 [10], ДБН В.2.6-161:2017 [21]	$F_{v,Rk} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{n,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} =$ $= 1,15 \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1+1}} \sqrt{2 \cdot 6616 \cdot 20 \cdot 4} + \frac{546}{4} =$ $= 1319 \text{ Н},$ $F_{v,Rd} = \frac{0,8 \cdot 1319}{1,3} = 811,6 \text{ Н}$	$\frac{5,39}{6}$
PN-B-03150:2000 [11], 木结构 [23]	$R_d = 1,1 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,d} \cdot f_{n,1,d} \cdot d} =$ $= 1,1 \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1+1}} \sqrt{2 \cdot 6615 \cdot 15,4 \cdot 4} = 860,8 \text{ Н}$	$\frac{5,29}{6}$
ČSN 73 1702:2007 [12]	$R_k = \sqrt{2M_{y,k} \cdot f_{n,1,k} \cdot d} = \sqrt{2 \cdot 6016 \cdot 20 \cdot 4} = 1029 \text{ Н},$ $R_d = \frac{k_{mod} \cdot R_k}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 1029}{1,1} = 748,4 \text{ Н}$	$\frac{6,08}{7}$
STR 2.05.07:2005 [22]	$R_{j,d} = (2,5d^2 + 0,01t_1^2) \sqrt{k} =$ $= (2,5 \cdot 0,4^2 + 0,01 \cdot 4,2^2) \sqrt{0,9 \cdot 10^3} = 546,8 \text{ Н}$	$\frac{8,3}{9}$
<p>Примечание :</p> <p>1. $M_{y,d} = \frac{M_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{6616}{1,1} = 6015 \text{ Н} \cdot \text{мм};$</p> <p>2. $f_{n,1,d} = \frac{f_{n,1,k}}{\gamma_M} = \frac{20}{1,3} = 15,4 \text{ Н/мм}^2;$</p> <p>3. $t_1 = t_2 - 1,5d - 2\text{мм} = 50 - 1,5 \cdot 4 - 2 = 42 \text{ мм};$</p> <p>4. $k=0,9$ – коэффициент, учитывающий класс эксплуатации 2 (п. 8.8.2 [22])</p>		

Заключение

По результатам сравнительного анализа методики расчета соединений деревянных элементов на гвоздях по отечественным и зарубежным нормам можно сделать следующие выводы:

1. Отечественные и зарубежные нормы, гармонизированные с Еврокодом 5, учитывают большее число параметров соединений деревянных элементов на гвоздях, влияющих на величину расчетного значения несущей способности для одного среза нагеля, что позволяет в 1,5 раза увеличить $F_{v,Rd}$, по сравнению с расчетами по российским нормам [26], а это, в свою очередь, позволяет снизить расход металла на крепежные детали и расход древесины на накладки из условия конструирования нагельного соединения. Более того, разработанные нормы расширяют область применения методики расчета соединений деревянных элементов: можно рассчитывать соединения на квадратных гвоздях, гвоздях с кольцевой и винтовой резьбой, в том числе из термически упрочненной стали.
2. Введение национальных приложений (со значениями параметров, установленных национальными органами стандартизации), отличающихся от положений Еврокода 5 [9], незначительно влияют

на результаты расчета соединений деревянных элементов на гвоздях: расхождение результатов расчета по СП 5.05.01-2021 и ČSN 73 1702 составляет 12,8 %.

3. Учитывая, что отечественные нормы по проектированию деревянных конструкций, гармонизированные с Еврокодом 5, создают предпосылки для использования мировых достижений строительной науки и дают шанс для качественных изменений в строительстве, необходимо форсировать работы по обеспечению проектировщиков нормативно-методической литературой, переработать учебники и пособия для расчета конструкций из дерева.

Список цитированных источников

1. Деревянные конструкции. Нормы проектирования : СНиП II-25-80. – Введ. 01.01.1982. – Москва : Стройиздат, 1983. – 31 с.
2. Деревянные конструкции : СНБ 5.05.01-2000. – Введ. 01.07.2001. – Минск : Минстройархитектуры, 2001. – 70 с.
3. Технический кодекс установившейся практики. Деревянные конструкции. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.05-146-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск : Министерство арх. и ст-ва Респ. Беларусь, 2009. – 63 с.

4. Справочное руководство по древесине Лаборатория лесных продуктов США : пер. с англ. / под ред. С. Н. Горшина и [др.]. – Москва : Лесн. пром-сть, 1979. – 544 с.
5. Жук, В. В. Исследование соединений деревянных элементов на профилированных гвоздях при действии кратковременных нагрузок / В. В. Жук, Н. В. Замойская, К. М. Куиш // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2004. – № 1(25) : Строительство и архитектура. – С. 213–214.
6. Лешкевич, Ю. Жизнь по Еврокодам / Ю. Лешкевич // Мастерская. Современное строительство. – 2010. – № 2. – С. 77–79.
7. Лишай, И. Л. Совершенствование системы технического нормирования и стандартизации в области строительства. Основные итоги и перспективы / И. Л. Лишай // Техническое нормирование, стандартизация и сертификация в строительстве. – 2011. – № 6. – С. 60–61.
8. Технический кодекс установившейся практики. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкции. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1995-1-1:2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск : Министерство арх. и ст-ва Респ. Беларусь, 2010. – 98 с.
9. Eurocod 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings6: EN 1995-1-1:2004+A1 : 2004. – Brussel: European Committee for standardization, Introduced 16 April 2004. – 121 p.
10. Деревянные конструкции. Строительные правила Республики Беларусь : СП 5.05.01-2021. – Введ. 01.06.2021. – Минск : Минстройархитектуры, 2021. – 115 с.
11. PN-B-03150-2000. Konstrukcje drewniane – Obliczenia statyczne i projektowanie.
12. ČSN 73 1702:2007. Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí, Obecná pravidla pro pozemní stavby.
13. Kotwica, J. Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym / J. Kotwica. – Warszawa: Arkady, 2004. – 357 s.
14. Krämer, V. Dřevěné konstrukce. Příklady a řešení podle ČSN 73 1702. Modifikovaný překlad 2. Vydání publikace Für den Holsbau - Aufgaben und Lösungen nach DIN 1052 / V. Krämer. – Praha : ČKAIT, 2009. – 316 s.
15. Blass, H. J. Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Komentář k ČSN 73 1702:2007. Modifikovaný překlad vesvětlivek k německé normě DIN 1052:2004 / H. J. Blass, J. Ehlbeck, H. Kreuzinger, G. Steck. – Praha : ČKAIT, 2008. – 226 s.
16. Nożyński, W. Konstrukcje budowlane. Przykłady obliczeń konstrukcji budowlanych z drewna / W. Nożyński. – Wydanie drugie zmienione. – Warszawa : WSiP, Akcyjra, 2000. – 359 s.
17. Технический кодекс установившейся практики. Деревянные конструкции. Правила расчета : ТКП 45-5.05-275-2012 (02250). – Введ. 01.06.2013. – Минск : Минстройархитектуры, 2013. – 111 с.
18. Ограждающие конструкции покрытий зданий из древесины и плитных материалов на ее основе / А. Я. Найчук, И. Ф. Захаркевич; под ред. А. Я. Найчука, И. Ф. Захаркевича. – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – 67 с.
19. Арки из древесины и материалов на ее основе / А. Я. Найчук, И. Ф. Захаркевич, А. Б. Шурин; под ред. А. Я. Найчука, И. Ф. Захаркевича, А. Б. Шурина. – Брест : Издательство БрГТУ, 2022. – 68 с.
20. Рамы из древесины и материалы на ее основе / А. Я. Найчук, И. Ф. Захаркевич, А. Б. Шурин; под ред. А. Я. Найчука, И. Ф. Захаркевича, А. Б. Шурина. – Брест : Издательство БрГТУ, 2022. – 68 с.
21. Дерев'яні конструкції. Конструкції будинків і споруд : ДБН В.2.6-161:2017. – Введ. 01.02.2018. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 111 с.
22. Medinių konstrukcijų projektavimas : STR 2.05.07:2005.
23. 成茂王永伟, 木结构 / 成茂王永伟; 安景龙主编. – 2009. – 229 s.
24. Жук, В. В. К вопросу оценки несущей способности соединений деревянных элементов на гвоздях / В. В. Жук // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений / редкол.: С.И. Меркулов (отв. ред.) и [др.] : Курск : гос. ун-т – Курск : 2011. – С. 79-88.
25. Navrhování stěnových panelů podle ČSN 73 1702.
26. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 : СП 64.13330.2011. Введ. 05.20.2010. – Москва : Минрегион России, 2010. – 86 с.
3. Tehniceskij kodeks ustanovivshejsya praktiki. Derevyannye konstrukcii. Stroitel'nye normy proektirovaniya : TKP 45-5.05-146-2009. – Vved. 01.01.2010. – Minsk : Ministerstvo arh. i st-va Resp. Belarus', 2009. – 63 s.
4. Spravochnoe rukovodstvo po drevesine Laboratoriya lesnyh produktov SSHA ; per. s angl. / pod red. S. N. Gorshina i [dr.]. – Moskva : lesn. prom-st', 1979. – 544 s.
5. Zhuk, V. V. Issledovanie soedinenij derevyannyh elementov na profilirovannyh gvozdyah pri dejstvii kratkovremennyh nagruzok / V. V. Zhuk, N. V. Zamojskaya, K. M. Kuish // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2004. – № 1(25) : Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 213–214.
6. Leshkevich, Yu. Zhizn' po Evrokodam / Yu. Leshkevich // Masterskaya. Sovremennoe stroitel'stvo. – 2010. – № 2. – S. 77–79.
7. Lishaj, I. L. Sovershenstvovanie sistemy tehničeskogo normirovaniya i standartizacii v oblasti stroitel'stva. Osnovnye itogi i perspektivy / I. L. Lishaj // Tehniceskoe normirovanie, standartizaciya i sertifikaciya v stroitel'stve. – 2011. – № 6. – S. 60–61.
8. Tehniceskij kodeks ustanovivshejsya praktiki. Evrokod 5. Proektirovanie derevyannyh konstrukcii. CHast' 1-1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy : TKP EN 1995-1-1-2009. – Vved. 01.01.2010. – Minsk : Ministerstvo arh. i st-va Resp. Belarus', 2010. – 98 s.
9. Eurocod 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings6: EN 1995-1-1:2004+A1 : 2004. – Brussel: European Committee for standardization, Introduced 16 April 2004. – 121 p.
10. Derevyannye konstrukcii. Stroitel'nye pravila Respubliki Belarus' : SP 5.05.01-2021. – Vved. 01.06.2021. – Minsk : Ministrojarhitektury, 2021. – 115 s.
11. PN-B-03150-2000. Konstrukcje drewniane – Obliczenia statyczne i projektowanie.
12. ČSN 73 1702:2007. Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí, Obecná pravidla pro pozemní stavby.
13. Kotwica, J. Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym / J. Kotwica. – Warszawa: Arkady, 2004. – 357 s.
14. Krämer, V. Dřevěné konstrukce. Příklady a řešení podle ČSN 73 1702. Modifikovaný překlad 2. Vydání publikace Für den Holsbau - Aufgaben und Lösungen nach DIN 1052 / V. Krämer. – Praha : ČKAIT, 2009. – 316 s.
15. Blass, H. J. Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Komentář k ČSN 73 1702:2007. Modifikovaný překlad vesvětlivek k německé normě DIN 1052:2004 / H. J. Blass, J. Ehlbeck, H. Kreuzinger, G. Steck. – Praha : ČKAIT, 2008. – 226 s.
16. Nożyński, W. Konstrukcje budowlane. Przykłady obliczeń konstrukcji budowlanych z drewna / W. Nożyński. – Wydanie drugie zmienione. – Warszawa : WSiP, Akcyjra, 2000. – 359 s.
17. Tehniceskij kodeks ustanovivshejsya praktiki. Derevyannye konstrukcii. Pravila rascheta : TKP 45-5.05-275-2012 (02250). – Vved. 01.06.2013. – Minsk : Ministrojarhitektury, 2013. – 111 s.
18. Ograzhdayushchie konstrukcii pokrytij zdaniy iz drevesiny i plitnyh materialov na ee osnove / A. Ya. Najchuk, I. F. Zaharkevich ; pod red. A. Ya. Najchuka, I. F. Zaharkevicha. – Brest : Izdatel'stvo BrGTU, 2021. – 67 s.
19. Arki iz drevesiny i materialov na ee osnove / A. Ya. Najchuk, I. F. Zaharkevich, A. B. SHurin; pod red. A. Ya. Najchuka, I. F. Zaharkevicha, A. B. SHurina. – Brest : Izdatel'stvo BrGTU, 2022. – 68 s.
20. Ramy iz drevesiny i materialy na ee osnove / A. Ya. Najchuk, I. F. Zaharkevich, A. B. Shurin; pod red. A. Ya. Najchuka, I. F. Zaharkevicha, A. B. Shurina. – Brest : Izdatel'stvo BrGTU, 2022. – 68 s.
21. Derevyani konstrukcii. Konstrukcii budinkiv i sporud : DBN V.2.6-161:2017. – Vved. 01.02.2018. – Kiiiv : Ministerstvo regional'nogo rozvittku, budivnictva ta zhitlovo-komunal'nogo gospodarstva Ukraini, 2017. – 111 s.
22. Medinių konstrukcijų projektavimas : STR 2.05.07:2005.
23. 成茂王永伟, 木结构 / 成茂王永伟; 安景龙主编. – 2009. – 229 s.
24. Zhuk, V. V. K voprosu ocenki nesushchej sposobnosti soedinenij derevyannyh elementov na gvozdyah / V. V. Zhuk // Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya: materialy mezhdunarodnyh akademicheskikh chtenij / redkol.: S.I. Merkulov (otv. red.) i [dr.] : Kursk : gos. un-t – Kursk : 2011. – S. 79-88.
25. Navrhování stěnových panelů podle ČSN 73 1702.
26. Derevyannye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIP II-25-80: SP 64.13330.2011. Vved. 05.20.2010. – Moskva : Minregion Rossii, 2010. – 86 s.

References

1. Derevyannye konstrukcii. Normy proektirovaniya : SNiP II-25-80. – Vved. 01.01.1982. – Moskva : Strojizdat, 1983. – 31 s.
2. Derevyannye konstrukcii : SNB 5.05.01-2000. – Vved. 01.07.2001. – Minsk : Ministrojarhitektury, 2001. – 70 s.

Материал поступил в редакцию 01.07.2022

РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ ПОД НАГРУЗКОЙ УВЕЛИЧЕНИЕМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ В СЖАТОЙ ЗОНЕ

Д. Н. Лазовский¹, Д. О. Глухов², Е. Д. Лазовский³

¹ Д. т. н., профессор, профессор кафедры строительных конструкций
Полоцкого государственного университета, e-mail: d.lazovski@psu.by

² К. т. н., доцент, доцент кафедры вычислительных систем и сетей
Полоцкого государственного университета, Новополоцк, Беларусь, e-mail: dzmitry.hlukhau@outlook.com

³ К. т. н., доцент, зав. кафедрой строительных конструкций
Полоцкого государственного университета, e-mail: y.lazouski@psu.by

Реферат

Проблема усиления строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений является актуальной в условиях развивающейся экономики. Проектирование усиления и расчет усиленных конструкций особенно затруднен при выполнении усиления под нагрузкой, поскольку при этом необходимо учитывать напряженно-деформированное состояние исходной (усиливаемой) конструкции. В статье приведены результаты экспериментально-теоретического исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой увеличением поперечного сечения путем наращивания в сжатой зоне дополнительным бетоном. На основе общей деформационной модели расчета предложена методика для усиленных под нагрузкой изгибаемых элементов, на основе собственных экспериментальных исследований предложенная методика верифицирована.

Ключевые слова: железобетон, усиление, деформационный расчет, балка.

STRUCTURAL ANALYSIS OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS STRENGTHENED UNDER ACTING LOAD BY INCREASING THE CROSS SECTION IN THE COMPRESSED ZONE

D. N. Lazouski, D. O. Glukhov, Y. D. Lazouski

Abstract

The problem of strengthening the building structures of operated buildings and structures is relevant in a developing economy. The design of strengthening and the structural analysis of strengthened structures is especially difficult when strengthening is performed under load, since it is necessary to take into account the stress-strain state of the original structure. The article presents the results of an experimental and theoretical study of bent reinforced concrete elements, strengthened under load by an increase in the cross section by building up additional concrete in the compressed zone. On the basis of the general deformation analytical model, a technique for strengthened under load bending concrete elements is proposed, based on our own experimental studies, the proposed technique is verified.

Keywords: reinforced concrete, strengthening, deformational analysis, beam.

Введение

Железобетонные конструкции эксплуатируемых зданий и сооружений в процессе эксплуатации получают дефекты и повреждения, которые оказывают влияние на их напряженно-деформированное состояние и должно учитываться в расчете при проектировании усиления. С развитием вычислительной техники основным методом оценки параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, аналогично другим их видам, остается метод сечений (нормальных, наклонных к продольной оси, спиральных при кручении). Новые вычислительные возможности позволили практически модернизировать метод расчета сечений железобетонных элементов. Так, для поперечных сечений, нормальных к продольной оси железобетонного элемента, получил развитие деформационный метод на основе использования гипотезы плоских сечений для распределения относительных деформаций и диаграмм деформирования бетона и арматуры. Диаграммы деформирования материалов позволяют учесть изменения их физико-механических характеристик в процессе эксплуатации, а метод расчета сечений – получить необходимые характеристики напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента с учетом его фактического состояния [1–6].

При усилении железобетонных элементов дополнительные бетон и арматура, включаемые в совместную работу, имеют иные физико-механические характеристики, которые отражают их диаграммы деформирования. Однако, при усилении железобетонных элементов под нагрузкой или после разгрузки в момент времени объединения с дополнительными бетоном и арматурой в одну конструкцию, уже имеется определенное напряженно-деформированное состояние, отличное от начального, в усиливаемой конструкции. Фактически

усиленная конструкция становится многокомпонентной, состоящей из основной части, находящейся в определенном напряженно-деформированном состоянии, и дополнительной части – в первоначальном состоянии. Гипотеза плоских сечений для относительных деформаций усиленных железобетонных элементов не выполняется, поскольку при усилении в основной части поперечного сечения уже имеются определенные (остаточные) деформации от воздействия нагрузки (разгрузки) [7].

Цель работы: для изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой в сжатой зоне, получить методику расчета параметров их напряженно-деформированного состояния, учитывающую особенности трещинообразования и перераспределение усилий между основным и дополнительным бетоном при разрушении.

Напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов при усилении

Система уравнений деформационной модели для расчетного поперечного сечения изгибаемого в одной плоскости железобетонного элемента, состоящая из уравнений равновесия и условия совместности деформаций, описывающего положение плоскости распределения деформаций по поперечному сечению в соответствии с гипотезой плоских сечений, на первом этапе расчета имеет вид:

$$\begin{cases} \int \sigma_{c,s} A_{c,s} (y_{c,s} - y_0) dy = M \\ \int \sigma_{c,s} A_{c,s} dy = 0 \\ \varepsilon'_{c,s} = \frac{1}{r} (y_{c,s} - y_0) \end{cases}, \quad (1)$$

где σ_{cs} и M – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры и изгибающий момент от внешних воздействий при усилении элемента;

$\epsilon'_{c,s}$ и $\frac{1}{r}$ – относительная деформация в элементарной площадке бетона или арматуры и кривизна элемента в рассматриваемом поперечном сечении при усилении элемента;

A_{cs} – площадь поперечного сечения элементарной площадки бетона или арматуры железобетонного элемента.

На втором этапе расчета с учетом наличия основной и дополнительной части усиленного элемента и жесткого контакта между ними, условий равновесия усилий и условий совместности деформирования для усиленного поперечного сечения уравнения напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента, усиленного увеличением поперечного сечения, имеют вид:

$$\begin{cases} \int \sigma_{c,s} A_{c,s} (y_{c,s} - y_0) dy + \sigma_{c,s,ad} A_{c,s,ad} (y_{c,s,ad} - y_{0,ad}) dy = M + \Delta M \\ \int \sigma_{c,s} A_{c,s} dy + \sigma_{c,s,ad} A_{c,s,ad} dy = 0 \\ \epsilon_{c,s} = \epsilon'_{c,s} + \frac{1}{r_{ad}} (y_{c,s,ad} - y_{0,ad}) \\ \epsilon_{c,s,ad} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{c,s,ad} - y_{0,ad}) \end{cases}, (2)$$

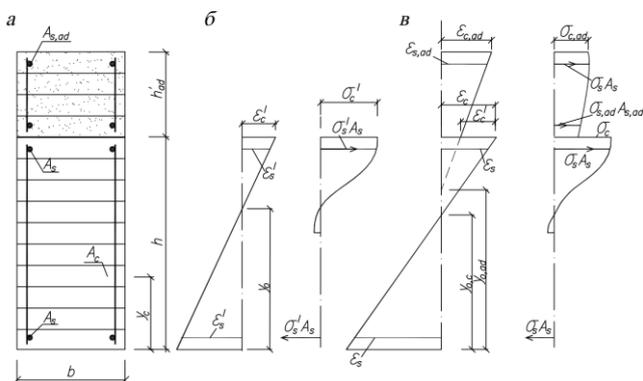
где $\sigma_{c,s,ad}$ и ΔM – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры дополнительной части элемента и приращение изгибающего момента от внешних воздействий после усиления элемента;

$A_{c,s,ad}$ – площадь поперечного сечения элементарной площадки бетона или арматуры дополнительной части усиленного железобетонного элемента;

$\epsilon_{c,s,ad}$ – относительная деформация в элементарной площадке бетона или арматуры дополнительной части усиленного элемента в рассматриваемом поперечном сечении после усиления элемента;

$\frac{1}{r_{ad}}$ – кривизна усиленного элемента в рассматриваемом поперечном сечении от действия ΔM .

С учетом аппроксимаций диаграмм деформирования для бетона и арматуры основной и дополнительной части усиленного элемента вычисляются напряжения в элементарных площадках. Процесс итераций продолжается до получения заданной точности вычисления в условиях равновесия усилий (2). Схема распределения относительных деформаций и напряжений в поперечном сечении изгибаемого железобетонного элемента, усиленного увеличением поперечного сечения в сжатой зоне приведена на рисунке 1.



б – перед усилением; в – после усиления

Рисунок 1 – Расчетное сечение изгибаемого железобетонного элемента, усиленного увеличением поперечного сечения в сжатой зоне (а) и распределение относительных деформаций и напряжений

При необходимости получения несущей способности усиленного элемента приращение изгибающего момента ΔM ступенчато

увеличивается. Максимальное усилие от внешней нагрузки, при котором выполняются условия (2), соответствует несущей способности усиленного элемента $M_{u,ad}$.

В изгибаемом железобетонном элементе до появления трещин в бетоне сопротивление растяжению оказывает бетон и продольная арматура. Относительные деформации растянутого бетона и арматуры благодаря сцеплению между ними равны между собой. С увеличением нагрузки в зоне максимальных изгибающих моментов на наиболее ослабленных участках (вследствие неоднородности структуры бетона и изменчивости его сопротивления) растягивающие относительные деформации в бетоне приближаются к предельным и появляются трещины. В сечении с трещиной и вблизи него сцепление нарушается, растягивающие усилия воспринимаются арматурой. После образования трещины напряжения (относительные деформации) по краям трещины в бетоне становятся равными нулю и возникают разность относительных деформаций бетона и арматуры $\Delta \epsilon$. В соответствии с законом сцепления эта разность деформаций по мере удаления от трещины уменьшается до нуля или до области, где относительные деформации в бетоне достигают предельных значений на растяжение и появляются смежные трещины. Разность относительных деформаций бетона и арматуры после передачи напряжений с бетона определяет в арматуре дополнительное напряжение. Величина дополнительного напряжения изменяется по длине растянутого бетонного блока в зависимости от его значения в поперечном сечении с трещиной и значения взаимного сдвига арматуры и бетона. Дополнительное напряжение в арматуре, обусловленное возникшей разностью относительных деформаций между растянутой арматурой и бетоном, приводит к новому равновесному состоянию поперечного сечения. При этом изгибающий момент от внешней нагрузки в поперечном сечении непосредственно перед и после образования трещины нормального отрыва практически не изменяется. В отличие от центрально растянутых в изгибаемых железобетонных элементах этот переход в поперечном сечении, связанный с образованием трещины нормального отрыва, происходит более плавно. В [8] это явление называется «дополнительным состоянием», в [9] – «погашением обжатия в бетоне». В деформационной модели влияние дополнительного напряжения в арматуре учитывают, задавая соответствующее дополнительное напряжение (относительные деформации) арматурным стержням (аналогично моделированию предварительного напряжения арматуры [6]) (рисунок 2). Вычислив дополнительные относительные деформации (напряжения) в арматуре по длине участка ее сдвига в бетоне растянутой зоны, учитывая, согласно деформационной модели, новое равновесное состояние любого поперечного сечения (в том числе и сечения с трещиной), устанавливается соответствие распределения относительных деформаций бетона и арматуры по высоте поперечных сечений в соответствии с гипотезой плоских сечений.

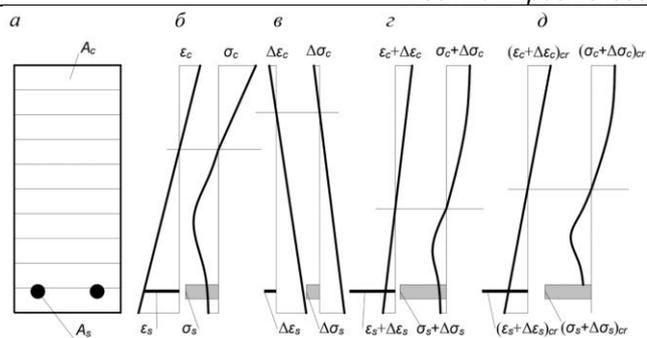
Система уравнений деформационной модели для изгибаемого элемента с трещинами перед усилением с учетом действия дополнительных деформаций в арматуре, пересекающих трещину, имеет вид:

$$\begin{cases} \int \sigma_{c,s} A_{c,s} (y_{c,s} - y_0) dy = M_{cr} \\ \int \sigma_{c,s} A_{c,s} dy = 0 \\ \epsilon_{c,s} = \frac{1}{r} (y_{c,s} - y_0) \\ \epsilon_{st} = \frac{1}{r} (y_{st} - y_0) + \Delta \epsilon \end{cases}, (3)$$

где M_{cr} – изгибающий момент от внешних воздействий, соответствующий образованию трещин в изгибаемом элементе;

ϵ_{st} – относительная деформация в элементарной площадке арматуры, пересекающей трещину.

Схема моделирования напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении изгибаемого железобетонного элемента при образовании трещин приведена на рисунке 2.



а) модель поперечного сечения изгибаемого элемента;
 б) относительные деформации и напряжения перед образованием трещины; в) дополнительные относительные деформации и напряжения; г) после приложения дополнительной относительной деформации (напряжения) от взаимного сдвига бетона и арматуры; д) после образования трещины

Рисунок 2 – Моделирование влияния дополнительного напряжения в арматуре на равновесное состояние участка блока изгибаемого элемента без трещины

Ширина раскрытия трещины нормального отрыва вычисляется как сумма взаимных смещений $S(x)$ арматуры и растянутого бетона в смежных участках по длине зон перераспределения l_t слева (l) и справа (r) от берегов трещины:

$$w = \int_{-l(t)}^{l(r)} s(x)dx = \int_{-l(t)}^{l(r)} [\varepsilon_{st}(x) - \varepsilon_{ct}(x)]dx. \quad (4)$$

Определив, согласно деформационной модели, распределение жесткостей по длине изгибаемого элемента, методами строительной механики вычисляются прогибы по ее длине.

Вычисление жесткости изгибаемого железобетонного элемента на рассматриваемом участке по его длине производится как среднее значение жесткостей на участке.

Экспериментальная проверка

Экспериментально-теоретическое исследование изгибаемых железобетонных элементов, усиленных увеличением поперечного сечения в сжатой зоне, включало испытание опытных балок и теоретические расчеты в соответствии с предлагаемой методикой.

Общий объем эксперимента включал в себя испытания 8 опытных балок прямоугольного поперечного сечения номинальным размером $80 \times 160 \times 1500$ мм, усиленных увеличением поперечного сечения сжатой зоны наращиванием дополнительным бетоном, и одна балка без усиления (БЭ-1). Размеры опытных образцов определялись мощностью имеющихся пружинных установок для создания длительной нагрузки, имитирующей нагрузку при усилении.

Опытные балки изготавливались из бетона со следующими прочностными и деформационными характеристиками: $f_{cm} = 13,1...13,8$ МПа, $f_{ctm} = 1,38...1,49$ МПа, $E_c = (26,3...28,3) \cdot 10^3$ МПа. Армирование опытных балок производилось горячекатаной стержневой арматурой периодического профиля диаметром 25 мм ($A_s = 482,4$ мм²) со следующими прочностными и деформационными характеристиками: для опытных балок БЭ-1, Б-1, Б-3, Б-4 $\sigma_y = 598$ МПа, $\sigma_u = 759$ МПа, $E_s = 2,02 \cdot 10^5$ МПа; для остальных опытных балок – $\sigma_y = 591$ МПа, $\sigma_u = 765$ МПа, $E_s = 2,01 \cdot 10^5$ МПа.

Совместная работа дополнительного бетона при увеличении поперечного сечения усиливаемых опытных балок обеспечивалась путем устройства насечки и выпусков поперечной арматуры в крайних третях пролета. Толщина дополнительного бетона усиления составляла 60 мм.

Опытные балки испытывали по однопролетной балочной схеме с шарнирным опиранием по концам нагружением двумя сосредоточенными силами, приложенными в третях пролета. Нагрузка в процессе усиления и при испытании передавалась на опытные балки с помощью специально сконструированных стальных деталей, позволяющих выполнять наращивание бетона на верхних гранях опытных

балок под нагрузкой. Конструкция опытных балок, схема испытания и расположения приборов приведена на рисунке 3.

В качестве варьируемых факторов были приняты: сопротивление сжатию дополнительного бетона $f_{cm,ad}$ (9,1...9,3 МПа; 16,1...16,9 МПа; 23,5...24,8 МПа) соответственно $E_{c,ad}$ ($22,5 \cdot 10^3$ МПа; $(26,8...27,9) \cdot 10^3$ МПа; $(31,5...33,4) \cdot 10^3$ МПа); относительный изгибающий момент от нагрузки в момент усиления к предельному его значению M/M_u (0; 0,3; 0,65; 0,8). Значения M_u определялись расчетом по фактическим характеристикам опытных балок. Номенклатура, геометрические размеры сечения и характеристики материалов опытных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Номенклатура, геометрические размеры сечений и характеристики материалов опытных образцов

	Геометрические размеры					Бетон основной части сечения			Бетон дополнительной части сечения			M/M_u
	b , мм	h , мм	d , мм	b_{ad} , мм	h_{ad} , мм	f_{cm} , МПа	f_{ctm} , МПа	$E_c \cdot 10^3$, МПа	$f_{cm,ad}$, МПа	$f_{ctm,ad}$, МПа	$E_{c,ad} \cdot 10^3$, МПа	
БЭ-1	80	161	133	—	—	13.5	1.45	26.3	—	—	—	—
Б-1	79	160	130	80	61	13.8	1.46	27.5	9.3	1.13	22.5	0.3
Б-2	80	160	131	80	60	13.3	1.40	27.5	9.1	1.18	22.5	0.8
Б-3	81	159	129	81	62	13.1	1.41	26.8	16.4	1.42	27.2	0
Б-4	80	162	130	81	59	13.6	1.43	28.3	16.8	1.48	27.5	0.3
Б-5	79	160	130	80	61	13.5	1.43	26.4	16.1	1.41	26.8	0.65
Б-6	80	160	131	81	60	13.7	1.49	27.9	16.9	1.5	27.9	0.8
Б-7	81	161	129	82	61	13.8	1.38	26.5	23.5	2.28	31.5	0.8
Б-8	80	160	131	81	60	13.8	1.43	26.8	24.8	2.45	33.4	0

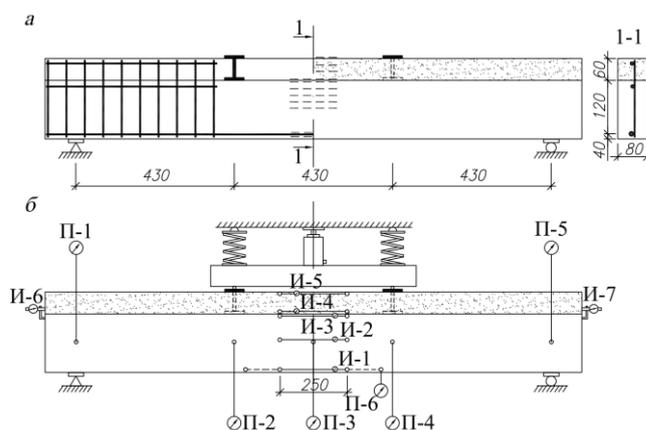


Рисунок 3 – Конструкция опытных балок (а) и схема их испытания (б) с расположением измерительных приборов: тензорезисторов, индикаторов часового типа (И), прогибомеров (П)

Деформации бетона опытных балок измерялись в наиболее характерных участках: вдоль крайней сжатой грани основного сечения; вдоль крайней сжатой грани дополнительного сечения; вдоль нижней грани дополнительного сечения по контакту основного и дополнительного бетона наращивания; на боковых гранях по высоте основного и дополнительного сечения. Деформации продольной арматуры с помощью тензорезисторов измерялись в тех же поперечных сечениях, что и деформации бетона на боковых гранях. При этом для определения осевых деформаций тензорезисторы устанавливались на верхней и нижней гранях арматурного стержня.

Испытания показали, что опытные балки, усиленные увеличением поперечного сечения бетона в сжатой зоне, разрушились хрупко по нормальному сечению в зоне действия максимального изгибающего момента в результате раздробления бетона сжатой зоны основного и дополнительного сечения при напряжениях в арматуре ниже ее предела текучести. Прочность контактного шва обеспечили эту возможность, за исключением балки Б-8, разрушение которой произошло в результате сдвига дополнительного бетона в крайней трети пролета балки и раздробления бетона сжатой зоны основного сечения балки. Для балки Б-8 на стадии, предшествующей разрушению на одном из торцов балки, было зафиксировано появление сдвиговых деформаций по контакту основного и дополнительного бетона, которые за период выдержки нагрузки на этапе нагружения

стабилизировались. При увеличении нагрузки происходило увеличение деформаций сдвига в контактном шве и разрушение бетона в сжатой зоне основного сечения. Характер разрушения опытных балок I серии после испытания представлен на рисунке 4.

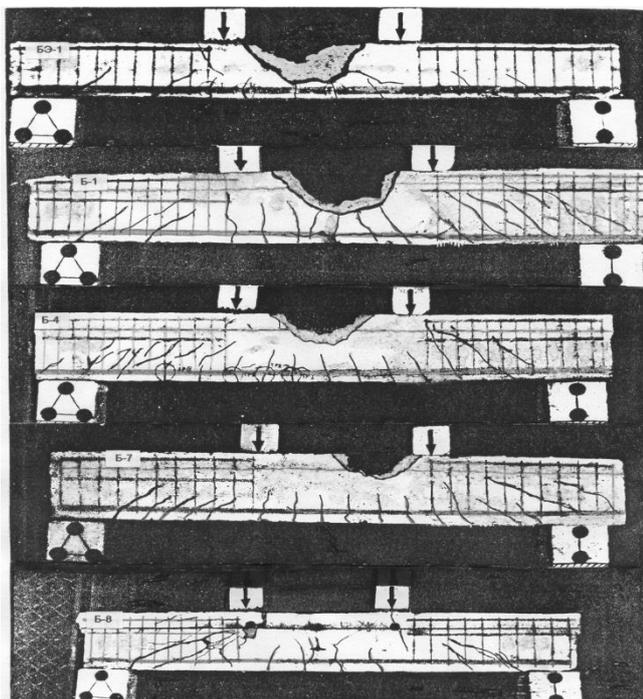


Рисунок 4 – Характер разрушения опытных балок, усиленных увеличением поперечного сечения в сжатой зоне

Варьирование сопротивлением бетона дополнительного сечения и величиной изгибающего момента от нагрузки при усилении опытных балок не вносило принципиальных изменений в общую картину трещинообразования и разрушения опытных балок. При увеличении прочности бетона дополнительного сечения уменьшалась высота раздробленной сжатой зоны основного сечения.

Величина разрушающего изгибающего момента опытных балок определялась максимальным значением разрушающей нагрузки. При обработке результатов эксперимента величина кривизны опытных балок в поперечном сечении вычислялась по показаниям индикаторов и прогибомеров, проводилось сопоставление опытных и расчетных параметров напряженно-деформированного состояния нормального сечения опытных балок на всех стадиях нагружения.

До момента образования трещин нормального отрыва относительные деформации бетона исходных опытных балок до усиления по высоте поперечного сечения распределялись в соответствии с гипотезой плоских сечений. После образования и в процессе развития трещин нормального отрыва происходило значительное нарушение линейного закона распределения деформаций по высоте сечения, но распределение деформаций по высоте сжатой зоны конкретного поперечного сечения оставалось линейным. При этом распределение средних относительных деформаций на длине измерения 250 мм бетона и арматуры по высоте основного поперечного сечения опытных балок приближалось к гипотезе плоских сечений вплоть до их разрушения.

Для опытных балок, усиленных под нагрузкой (Б-1,Б-2,Б-4...Б-7) распределения средних деформаций дополнительного сечения и приращения деформаций основного сечения по высоте усиленных балок приближались к гипотезе плоских сечений. Разность деформаций бетона основного и дополнительного сечения на уровне контактного шва оставалась практически постоянной (изменение не превышало 5 %) до разрушения усиленных балок, что характеризует контактный шов как жесткий (рисунок 5).

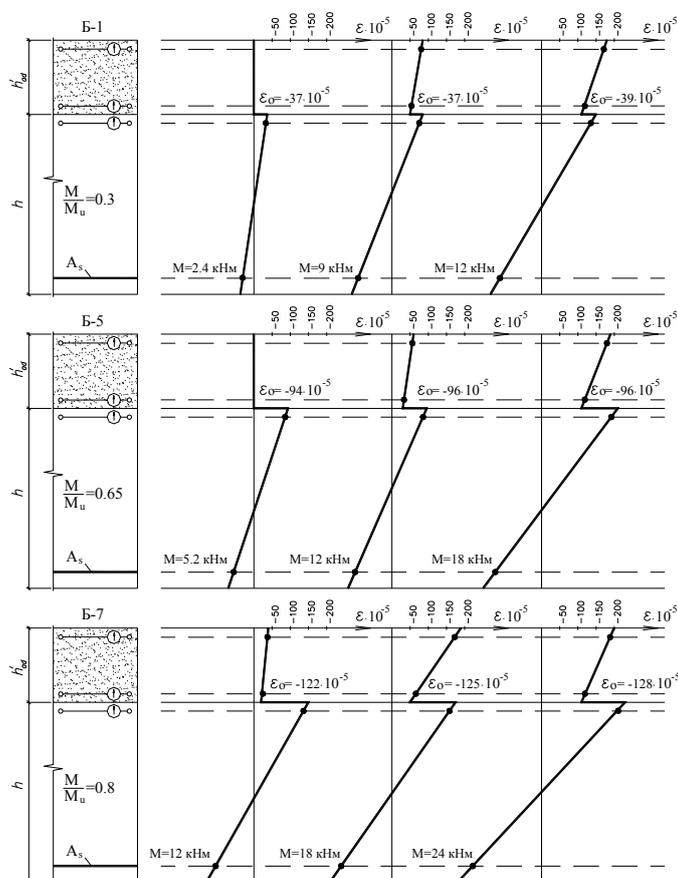


Рисунок 5 – Распределение средних относительных деформаций по высоте опытных балок, усиленных увеличением поперечного сечения в сжатой зоне

В результате экспериментального исследования установлено влияние начального напряженно-деформированного состояния усиливаемых балок в момент усиления на их прочность, жесткость и трещиностойкость. Увеличение нагрузки на балку при ее усилении повышало несущую способность усиленной балки, по сравнению с балкой, усиленной без предварительного нагружения. Это проявлялось для всех принятых в эксперименте соотношений призмной прочности дополнительного и основного бетона (рисунок 6).

Предварительное нагружение опытных балок перед усилением способствовало повышению их деформативности и увеличению ширины раскрытия трещин нормального отрыва, по сравнению с опытными балками, усиленными без предварительного нагружения. При нагружении опытных балок, усиленных под нагрузкой, рост кривизны (прогиба) основной конструкции в середине пролета и ширины раскрытия трещин замедлялся, однако по абсолютной величине на этапах нагружения названные характеристики превышали значения, полученные для аналогичных опытных балок, усиленных без предварительного нагружения.

Распределение расчетных относительных деформаций и нормальных напряжений в поперечном сечении с трещиной по высоте опытных балок, усиленных увеличением поперечного сечения в сжатой зоне, в стадии перед разрушением приведено на рисунке 7.

Сопоставление опытных и расчетных значений разрушающего изгибающего момента образования трещин, ширины раскрытия трещин на уровне центра тяжести арматуры и прогибов, определенных по разработанной методике расчета приведены в таблице 2. Сопоставление ширины раскрытия трещин и прогибов производилось для уровня $0,7M_{u,ad}$ (для балки БЭ-1 – $0,7M_{u,ad}$).

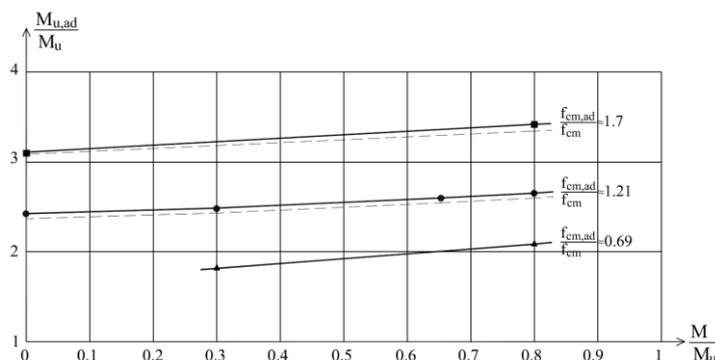
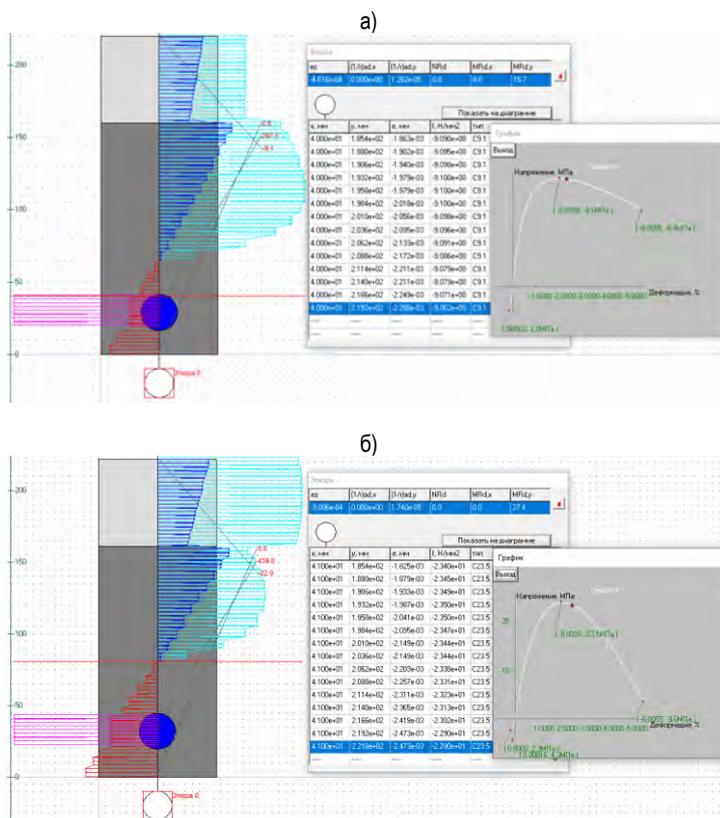


Рисунок 6 – Зависимость увеличения разрушающего изгибающего момента опытных балок, усиленных увеличением поперечного сечения в сжатой зоне от уровня нагружения:

— — — — — опытная — — — — — расчетная



а – балки Б-2; б – балки Б-7

Рисунок 7 – Распределение расчетных относительных деформаций и нормальных напряжений в поперечном сечении с трещиной по высоте опытных балок, усиленных увеличением поперечного сечения в сжатой зоне

Таблица 2 – Расчет разрушающего изгибающего момента, момента образования и ширины раскрытия трещин, прогибов опытных балок

	M_u^{exp} кНМ	M_u^{th} кНМ	$\frac{M_u^{exp}}{M_u^{th}}$	M_{cr}^{exp} кНМ	M_{cr}^{th} кНМ	$\frac{M_{cr}^{exp}}{M_{cr}^{th}}$	w^{exp} мм	w^{th} мм	$\frac{w^{exp}}{w^{th}}$	a^{exp} мм	a^{th} мм	$\frac{a^{exp}}{a^{th}}$
БЭ-1	7.91	7.83	1.01	1.3	1.25	1.04	0.07	0.05	1.14	2.8	2.45	1.14
Б-1	15.1	14.5	1.04	1.3	1.27	1.02	0.07	0.05	1.08	2.75	2.33	1.18
Б-2	16.35	15.7	1.04	1.3	1.24	1.05	0.10	0.08	0.97	4.45	3.98	1.12
Б-3	19.0	18.4	1.03	2.3	2.34	0.98	0.08	0.06	0.94	2.65	2.30	1.15
Б-4	19.9	19.1	1.04	1.3	1.24	1.05	0.1	0.08	1.19	3.15	2.91	1.08
Б-5	20.08	20.3	0.99	1.3	1.25	1.04	0.11	0.09	1.13	4.3	3.85	1.12
Б-6	20.84	21.2	0.98	1.3	1.27	1.02	0.12	0.12	1.07	4.85	4.64	1.05
Б-7	26.5	27.4	0.97	1.3	1.27	1.02	0.14	0.12	1.13	5.2	4.77	1.09
Б-8	23.85	25.6	0.93	2.3	2.43	0.95	0.1	0.06	1.15	1.85	1.77	1.05

Заключение

В результате экспериментально-теоретического исследования расширена граница применения деформационного метода расчета поперечных сечений для изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой увеличением поперечного сечения в сжатой зоне дополнительным бетоном.

Предложена модель перехода в поперечном сечении изгибаемого железобетонного элемента от состояния непосредственно перед образованием трещины нормального отрыва к состоянию после образования трещины и учета работы растянутого бетона между трещинами наложением дополнительного напряжения в арматуре, обусловленного разностью относительных деформаций между растянутой арматурой и бетоном при образовании трещины.

Сопоставление опытных и расчетных значений основных параметров железобетонных балок, усиленных в сжатой зоне: изгибающего момента образования трещин; раскрытия трещин и прогибов при нагрузке близкой к эксплуатационной; изгибающего момента, соответствующего их несущей способности свидетельствует об удовлетворительной сходимости.

Список цитированных источников

- Карпенко, Н. И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры / Н. И. Карпенко, Т. А. Мухамедиев, А. Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций : сборник. – М. : НИИЖБ, 1986.
- Карпенко, Н. И. К оценке прочности, жесткости, момента образования трещин и их раскрытия в зоне чистого изгиба железобетонных балок с применением нелинейной деформационной модели / Н. И. Карпенко, Б. С. Соколов, О. В. Радайкин // Известия высших учебных заведений. – 2016. – № 3(687) : Строительство. – С. 5–12.
- Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования : методическое пособие. – Москва : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – 2017. – 197 с.
- CEB-FIB Model Code for Concrete Structures/-2010.
- Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : СП 63.13330.2018. СНиП 52-01-2003. – Москва, 2018. – 143 с.
- Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Минск, 2020. – 236 с.
- Лазовский, Д. Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений / Д. Н. Лазовский. – Новополоцк: Изд-во Полоцкого гос. ун-та, 1998. – 240 с.
- Холмянский, М. М. Бетон и железобетон: Деформации и прочность / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1997. – С. 423–425.
- Байков, В. Н. Железобетонные конструкции (Общий курс) : учеб. для вузов / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1991. – 767 с.

References

- Karpenko, N. I. Iskhodnye i transformirovannye diagrammy deformirovaniya betona i armatury / N. I. Karpenko, T. A. Muhamediev, A. N. Petrov // Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij : sbornik. – M. : NIIZHB, 1986.
- Karpenko, N. I. K ocenke prochnosti, zhestkosti, momenta obrazovaniya treshchin i ih raskrytiya v zone chistogo izgiba zhelezobetonnyh balok s primeneniem nelinejnoj deformacionnoj modeli / N. I. Karpenko, B. S. Sokolov, O. V. Radajkin // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. – 2016. – № 3(687) : Stroitel'stvo. – S. 5–12.
- Statically neopredelimeye zhelezobetonnye konstrukcii. Diagrammnye metody avtomatizirovannogo rascheta i proektirovaniya : metodicheskoe posobie. – Moskva : Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii. – 2017. – 197 s.
- CEB-FIB Model Code for Concrete Structures/-2010.
- Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya : SP 63.13330.2018. SNiP 52-01-2003. – Moskva, 2018. – 143 s.
- Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Minsk, 2020. – 236 s.
- Lazovskij, D. N. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij ekspluatiruemyyh stroitel'nyh sooruzhenij / D. N. Lazovskij. – Novopolock: Izd-vo Polockogo gos. un-ta, 1998. – 240 s.
- Holmyanskij, M. M. Beton i zhelezobeton: Deformacii i prochnost' / M. M. Holmyanskij. – M. : Strojizdat, 1997. – S. 423–425.
- Bajkov, V. N. Zhelezobetonnye konstrukcii (Obshchij kurs) : ucheb. dlya vuzov / V. N. Bajkov, E. E. Sigalov. – 5-e izd., pererab. i dop. – M. : Strojizdat, 1991. – 767 s.

Материал поступил в редакцию 20.06.2022

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Н. В. Левчук

*К. т. н., доцент, доцент кафедры инженерной экологии и химии
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: 961896@bstu.by*

Реферат

Объектом исследования является сточная вода, образующаяся в процессе соления рыбы, содержащая взвешенные вещества, фосфаты, хлориды, органические загрязнения и др., а также сточная вода, образующаяся после промывки используемого на производстве оборудования и технологических емкостей. Сточная вода, в соответствии с установленными требованиями, подвергается обработке химическими реагентами, где в качестве коагулянта используется коагулянт серии KEMIRAPAX 20 (раствор полиоксихлорида алюминия на основе Al^{3+}).

Цель работы: для более экономичного использования полиоксихлорида алюминия на основе стехиометрических расчетов уравнений реакции подобрать оптимальную дозу коагулянта, необходимую для интенсификации процессов хлопьеобразования, с учетом pH сточной воды, определить расход щелочи и условия ее дозирования в обрабатываемую воду.

Ключевые слова: сточная вода, процесс хлопьеобразования, расход щелочи, химические реагенты.

SOME ISSUES OF REAGENT TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER FROM FOOD INDUSTRY

N. V. Levchuk

Abstract

The object of the study is wastewater generated during the salting of fish, containing suspended solids, phosphates, chlorides, organic contaminants, etc., as well as wastewater generated after washing the equipment used in the production and process tanks. Waste water, in accordance with the established requirements, is treated with chemical reagents, where the coagulant of the KEMIRA PAX 20 series (a solution of aluminum polyoxchloride based on Al^{3+}) is used as a coagulant.

The purpose of the work: for more economical use of aluminum polyoxchloride, based on stoichiometric calculations of reaction equations, select the optimal dose of coagulant necessary to intensify the processes of flocculation, taking into account the pH of the waste water, determine the alkali consumption and the conditions for its dosing into the treated water.

Keywords: waste water, flocculation process, alkali consumption, chemical reagents.

Введение

Реагентная очистка сточных вод на промышленных предприятиях в настоящее время относится к одному из наиболее эффективных методов удаления загрязняющих веществ различной степени дисперсности, а также к эффективному способу обработки осадков сточных вод, но является одним из самых дорогостоящих методов очистки воды. К реагентной очистке относится процесс коагуляции, представляющий собой химическую стадию растворения и гидролиза реагента, а также, сложный процесс физико-химического взаимодействия примесей и продуктов гидролиза реагента.

Коагулянтами, как правило, являются соли железа и алюминия, образованные сильными кислотами. В настоящее время алюминий-содержащие коагулянты различного состава, такого как $Al(OH)_3Cl_b$, $Al_2(OH)_aCl_{(6-a)}$, в зависимости от способа и технологии производства, получили широкое распространение в нашей стране, России и Европе. Выбор коагулянта производится с учетом химического состава коагулянта, а также свойств и качества обрабатываемой воды. Одним из важных факторов, влияющих на процесс коагуляции, является водородный показатель (pH сточной воды и pH раствора коагулянта), так как значение pH сточных вод, допустимых к отведению в сеть бытовой канализации, находится в пределах от 6,5 до 8,5. Следует учитывать то, что при выборе коагулянта недостаточно руководствоваться сведениями о производителе, данными сертификатов качества о представленной продукции и ее стоимости.

Как отметили выше, при выборе неорганического коагулянта важно учитывать pH обрабатываемой воды, так как кислые коагулянты представляют собой соли сильных кислот и слабых оснований и при диссоциации выделяют в воду ион H^+ (к ним относятся $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, полиоксихлорид алюминия, а щелочные, являющиеся солями сильных оснований и слабых кислот, выделяют гидроксильный ион OH^-).

Коагулянты, содержащие железо, образуют гидроксид железа $Fe(OH)_3$, практически не растворимый в интервале pH от 4 до 14, а алюминиевые (алюминий – амфолит) – гидроксид алюминия

$Al(OH)_3$, растворим при низких (ниже 3–4) и высоких (более 8–9) значениях pH. В первом случае в кислой среде в воде появляются катионы Al^{3+} , во втором, в щелочной – анионы AlO_2^- [1]. В наших исследованиях использование более дешевых железосодержащих аналогов невозможно по санитарно-гигиеническим соображениям, из-за высокого содержания железа в сточной воде, что было исследовано в производственной лаборатории ООО «Санта Бремор».

Важным фактором в процессе формирования зародышей коллоидных частиц являются процессы гидролиза солей коагулянтов, в частности, катионы основных солей алюминия $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_2^+$ присоединяют гидроксильные анионы и могут переходить в гидроксид $Al(OH)_3$, вызывая коагуляцию отрицательно заряженных коллоидов загрязнений.

В соответствии с литературными источниками в кислой среде, где имеется избыток H^+ , диссоциация солей алюминия идет плохо, а строение мицеллы гидроксида алюминия может быть следующим: $\{[mAl(OH)_3 \cdot 2n Al(OH)_2^+ (2n - x) SO_4^{2-} \cdot xNa^+]\}$. Коллоидные частицы гидроксида и основных солей алюминия в нейтральной и слабокислой среде вследствие сорбции катионов водорода и алюминия имеют положительные заряды. Поэтому процесс коагуляции этих коллоидов улучшается при увеличении концентрации в воде поливалентных анионов, в частности SO_4^{2-} , которые для положительно заряженных коллоидов являются противоионами. На производстве для соления морепродуктов используется пищевая соль $NaCl$, содержание хлоридов в сточной воде высокое – 3600 мг/дм³. Повышение концентрации в воде одновалентных анионов, например Cl^- , в меньшей степени стимулирует коагуляцию [2]. Следовательно, в сточной воде с показателями pH ~ от 6 до 7, имеющей в своем составе высокое содержание хлоридов, процесс коагуляции замедляется.

Гидроксильный ион OH^- затрудняет диссоциацию солей при высоких значениях pH, и в щелочной среде мицелла золя гидроксида алюминия может иметь вид: $\{[mAl(OH)_3 \cdot nAlO_2^- (n - x) Na^+ \cdot xNa^+]\}$. При высоких значениях pH коллоидные частицы гидроксида алюминия имеют отрицательные заряды за счет сорбции алюминатных ионов

AlO_2^- ; в этом случае коагуляция стимулируется катионами. При значениях pH > 8,5–9 образуются растворимые алюминаты. Следовательно, можно предположить, что если некоторая часть нейтрально заряженных частиц, стабилизированных в щелочной среде, приобретает отрицательный заряд, то в присутствии катионов металлов эти частицы теряют агрегативную устойчивость.

В нашей работе исследование коагулирующей способности реагента проводилось с использованием полиоксихлорида алюминия (коагулянт серии KEMIRAPAX 20). Полиоксихлорид алюминия, используемый на производстве, является дорогостоящим реагентом, поставляемым из Польши в виде 20 % или 40% раствора соли $(Al(OH)_aCl_b, Al_2(OH)_aCl_{(6-a)})$. На производстве совместно с коагулянтом используется полимерный флокулянт Superfloc A150 и едкий натр для подщелачивания кислого стока, поскольку нормативное значение pH сточной воды предприятия достигается введением 50 % раствора щелочи NaOH.

Нашей задачей являлось изучение коагулирующих свойств полиоксихлорида алюминия и влияние характера среды на процессы коагуляции в сточной воде предприятия без использования флокулянта при более высоких значениях pH = 8–9,5, чем при нейтрализации кислого стока, производственных сточных вод от 5,5 до 6,5–7.

В работе были проведены расчеты по уравнениям химических реакций взаимодействия основных солей, образованных гидроксидом алюминия и щелочи, которые позволили установить их оптимальное соотношение. Проведена серия экспериментов по применению результатов стехиометрических расчетов уравнений реакций (формула 1, 2) [3].

Результаты исследований

Учитывая вышеизложенный материал, можно сделать вывод о том, что при введении коагулянта в обрабатываемую воду необходимо учитывать диапазон значений pH, способствующих максимальному процессу коагуляции и образованию осадка. Определить, при каком значении pH процесс хлопьеобразования, при введении полиоксихлорида алюминия, проходит наиболее интенсивно, а также то, что при выборе коагулянта необходимо учитывать качественный состав производственной сточной воды, в частности, присутствие поливалентных и одновалентных катионов и анионов и температуру обрабатываемой воды.

С целью изучения коагулирующей способности коагулянта полиоксихлорида алюминия в нашей работе использовалась сточная производственная вода предприятия пищевой промышленности ООО «Санта Бремор». Исследовались два вида стока: тузлук – отработанный концентрированный солевой раствор, используемый для соления рыбы, и сточная вода, поступающая на вторую ступень очистки во флотатор из смесителей расхода, представляющая собой смесь промывной воды, образующейся после мойки производственного оборудования и воды из тузлучных емкостей.

Коагулянт серии KEMIRAPAX 20, используемый на предприятии, представляет собой ~ 20 % раствор полиоксихлорида алюминия, общая химическая формула которого $Al(OH)_aCl_b + H_2O$, где $a + b = 3$. Плотность раствора полиоксихлорида алюминия – 1,270 г/см³, содержание Al^{3+} – ~ 5,9 %; Al_2O_3 – ~ 11,1 %.

Изучив теоретический материал, можно сделать следующие предположения:

- поскольку обрабатываемая сточная вода имеет значение pH от 4,9–6,5 и избыток одновалентных ионов Cl^- в меньшей степени способствует дестабилизации коллоидных частиц их осаждению, т. е. следует увеличить показатель pH;
- коагулянт, подвергаясь гидролизу в слабощелочной среде, может образовывать ионы $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_3$, а также $Al(OH)_3$, которые являются основой формирования коллоидных частиц, золи которых имеют положительный заряд и при агрегации коагулируют, а затем выпадают в осадок. В таком водном растворе мицелла золя может иметь вид: $\{[mAl(OH)_3]nAl(OH)_2^+ (2n-x) SO_4^{2-}\}^{x+} xSO_4^{2-}$;
- коагулянт, образуя положительно заряженные золи, в присутствии отрицательно заряженных зольей, находящихся в сточной воде, дестабилизирует устойчивые коллоидные частицы, участвуя в процессе взаимной коагуляции.

Так как сточная вода имеет значение pH, приблизительно равное 5, что не соответствует санитарно-гигиеническим нормативам, для сброса сточных вод в сеть бытовой канализации значение pH

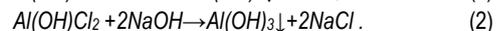
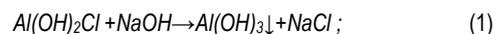
корректируют 50-м % раствором щелочи. Расход щелочи составляет ~ 7,5 л/ч, и на производстве процесс коагуляции и образования флотошлама осуществляется, преимущественно, введением флокулянта Superfloc A150.

Таким образом, интенсифицируя процесс коагуляции добавлением щелочи, можно снизить количество вводимого в обрабатываемую воду дорогостоящего флокулянта, который дозируется во флотатор в количестве 600 л/ч, причем 0,1 % раствор флокулянта готовится заранее, т. к. раствор полимерного материала имеет сроки хранения и должен предварительно созреть (процесс набухания полимера).

При исследовании процессов коагуляции нами было установлено, что повышение pH обрабатываемой воды приводит к интенсификации процесса коагуляции, образованию более крупных хлопьев и ускорению процессов седиментации образующегося осадка.

Как известно, при диссоциации основных солей алюминия образуются гидроксо- и дигидроксо- катионы алюминия, способные присоединять гидроксильную группу OH⁻, образуя первоначально зародыши мицелл золя гидроксида алюминия.

Процесс образования гидроксида алюминия, при полном гидролизе может происходить при реакции взаимодействия со щелочью по уравнениям 1, 2:



Однако необходимо учесть то, что при избытке щелочи образуются растворимые комплексные соли, такие как $Na[Al(OH)_4(H_2O)_2]$.

Проведя расчеты по уравнениям реакции, можно определить количество щелочи, необходимой для образования гидроксида алюминия, и на основании расчетов определить дозу щелочи, необходимую для интенсификации процесса коагуляции.

На производстве произведен подбор дозы коагулянта и pH сточных вод для получения достаточной степени осветления сточных вод: доза коагулянта: 0,3–0,4 л/м³, доза NaOH 50 %: 0,2–0,3 л/м³ (в зависимости от типа и дозы коагулянта), доза Superfloc A150: 5–7 г/м³, оптимальный pH: 6,5–6,7. При часовом расходе сточной воды, равным 60000 л/ч, расходует 15 л/ч коагулянта и, примерно, 7,5 л/ч щелочи, так как раствор щелочи дозируется автоматически и количество NaOH зависит от значений pH производственного стока.

По нашим расчетам, количество щелочи, соответствующее количеству коагулянта, по уравнению 1 составляет 6,75 л/ч, по уравнению 2 доза щелочи соответствующая дозе коагулянта, составляет 11,25 л/ч.

Таким образом, в зависимости от содержания солей алюминия в составе полиоксихлорида алюминия количество щелочи, приходящее на количество коагулянта, должно соответствовать расчетным параметрам. Это способствует более рациональному подходу к дозированию реагентов, их экономии и снижению стоимости процесса очистки в целом.

Однако при дозировании коагулянта не учитываются оптимальные условия процессов хлопьеобразования, т. е. диапазон pH стока и способы введения коагулянта в обрабатываемую сточную воду, в частности в тузлук и промывную воду производства.

Поскольку на производстве дозирование щелочи производится только с учетом корректировки pH, необходимо экспериментально определять количество NaOH, дозируемой в обрабатываемую воду. Так как на производстве в среднем дозируется 7,5 л/ч щелочи на 15 л/ч полиоксихлорида алюминия, то при большем содержании дигидроксохлорида алюминия эта доза может быть избыточной, что приводит к образованию растворимых комплексных соединений алюминия. С другой стороны, при большем содержании гидроксохлоридов алюминия – 7,5 л/ч, расход щелочи является недостаточным для интенсификации процесса коагуляции из-за избытка хлоридов, как было описано в теоретической части.

В работе были поставлены серии экспериментов по влиянию pH среды на процессы коагуляции в сточной воде предприятия. Предварительно исследовали влияние увеличения дозы коагулянта на процесс хлопьеобразования. Дозу увеличивали соответственно в 2, 4, 6 раз. Увеличение дозы коагулянта практически не оказывает влияния на процесс хлопьеобразования, так как сам коагулянт имеет значение pH = 1, что способствует образованию растворимых соединений алюминия.

Проведена серия экспериментов по сравнению процессов коагуляции и седиментации сточной воды из смесителя и емкости для

сбора тузлука. Предварительно в исследуемой воде определяли значение pH и подщелачивали до pH = 7 и 9,5. При pH = 9,5 процессы хлопьеобразования и седиментации идут интенсивнее (Рисунок 1, 2).



Рисунок 1 – Сточная вода: pH – 5,8 и pH – 9,5 (начало коагуляции через 5 мин.)



Рисунок 2 – Сточная вода: pH – 5,8 и pH – 9,5 (коагуляции через 15 мин.)

В тузлуке процесс хлопьеобразования идет быстрее, хлопья более крупные (Рисунок 3, 4). На предприятии тузлук, по мере накопления емкостей, дозируется в смеситель без добавления реагентов, после удаления на сите грубодисперсных примесей.

Проведена серия экспериментов по изучению влияния температуры на процесс хлопьеобразования и седиментации. Понижение температуры снижает скорость процессов хлопьеобразования в исследуемой воде, хлопья мелкие седиментируют медленно, даже при увеличении pH до 7 и выше. Проведена серия экспериментов по влиянию pH на исследуемую воду в интервале комнатных температур. Исследуемую воду подкисляли раствором HCl 0,1 н., до pH = 4,5 и подщелачивали до pH = 7 и 8,5. Процесс хлопьеобразования интенсивно протекает в щелочной среде. Необходимо отметить, что этот процесс идет без добавления флокулянта.

С целью сравнения процессов коагуляции мы провели серию экспериментов с добавлением в исследуемую сточную воду без корректировки pH незначительного количества активированного угля. Процесс хлопьеобразования начинается сразу после добавления реагента, без использования щелочи. Что позволяет сделать вывод о проведении экспериментов по возможности подбора и внедрения в процесс очистки химический реагентов с учетом их стоимости, количества и условий дозирования на производствах, где производится химическая очистка.

Химические процессы, происходящие при обработке воды коагулянтами, перевода коллоиды из растворенного в труднорастворимое состояние, позволяют на следующих этапах очистки удалить их более простыми физико-механическими способами, например в центрифуге.



Рисунок 3 – Тузлук: pH – 5,2 и pH – 9,5 (начало коагуляции)



Рисунок 4 – Тузлук: pH – 5,2 и pH – 9,5 (через 15 мин.)

Заключение

1. Физико-химический процесс обработки сточной воды основывается на введении реагентов коагулянта КЕМИРАПАХ 20 (25 % раствор полиоксихлорида алюминия) и флокулянта Superfloc A150 (0,1% раствор твердого полимера).

2. Введение реагента производится в трубный блок флотатора: в первый смеситель одновременно подается 50-й % раствор коагулянта и раствор щелочи; во второй статический смеситель – раствор флокулянта, расходы которых соответственно равны: 15 л/ч; 7,5 л/ч и 600 л/ч.
3. На основании литературных источников установлено, что процесс введения реагентов оказывает влияние на процессы коагуляции и флокуляции, а сам процесс коагуляции зависит от условий процесса очистки, в частности, от температуры и pH среды.
4. В работе было установлено, что процесс коагуляции с использованием полиоксихлорида алюминия интенсивнее протекает в щелочной среде, при pH от 8 до 8,5. При увеличении pH свыше 8,5 начинается процесс растворения гидроксида алюминия, образующегося при взаимодействии NaOH и Al(OH)₃Cl₂, что препятствует процессу коагуляции, поскольку нерастворимый гидроксид алюминия переходит в растворимые комплексные соединения.
5. По уравнениям реакции взаимодействия основных солей алюминия с NaOH можно рассчитать оптимальную дозу щелочи, необходимую для образования Al(OH)₃ в производственных условиях, способствующую интенсификации процесса коагуляции.
6. Учитывая рассмотренные выше пункты, можно рекомендовать предприятиям, использующим эти же реагенты, более рациональные способы введения реагентов, улучшающих качество очистки воды в целом и интенсифицирующим процесс коагуляции в частности. Поскольку последовательность введения реагентов в обрабатываемую воду и способы введения реагентов являются важным фактором в процессе обработки воды, следует рассмотреть возможность дозирования коагулянта и щелочи одновременно, в соотношениях, рассчитываемых на основании уравнений реакций.
7. Подбор и рациональное введение реагентов позволяет снизить их объемы и себестоимость процессов очистки воды.

Список цитированных источников

1. Воловник, Г. И. Водоотведение промышленных предприятий : учеб. пособие / Г. И. Воловник, Л. Д. Терехов, Е. Л. Терехова. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. – 411 с.
2. Реагентная обработка поверхностных природных вод алюмосодержащими коагулянтами: моногр. / Б. М. Гришин [и др.]. – Пенза : ПГУАС, 2016. – 140 с.
3. Добрунов, А. Е. Исследование коагулирующих свойств полиоксихлорида алюминия / А. Е. Добрунов ; науч. рук. Н. В. Левчук // Сборник конкурсных научных работ студентов и магистрантов : в 2 частях / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: Н. Н. Шалобита [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2021. – Часть 1. – С. 18–21.
4. Организация строительного производства = Арганізацыя будаўнічай вытворчасці : ТКР 45-1.03-161-2009 (02250). – Введ. 01.05.2010. – Минск : Минстройархитектуры, 2014. – 52 с.
5. Дикман, Л. Г. Организация строительного производства: учебник для строительных вузов / Л. Г. Дикман. – изд. 6-е перераб. и доп. – М. : АСВ, 2012. – 588 с.

References

1. Volovnik, G. I. Vodootvedenie promyshlennykh predpriyatij : ucheb. posobie / G. I. Volovnik, L. D. Terekhov, E. L. Terekhova. – Habarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2008. – 411 s.
2. Reagentnaya obrabotka poverhnostnykh prirodnykh vod alyumosoderzhashchimi koagulyantami: monogr. / B. M. Grishin [i dr.]. – Penza : PGUAS, 2016. – 140 s.
3. Dobrunov, A. E. Issledovanie koaguliruyushchih svojstv polioksihlorida alyuminiya / A. E. Dobrunov ; nauch. ruk. N. V. Levchuk // Sbornik konkursnykh nauchnykh rabot studentov i magistrantov : v 2 chastyah / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: N. N. Shalobyta [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2021. – Chast' 1. – S. 18–21.
4. Organizaciya stroitel'nogo proizvodstva = Arganizacyya budaynichaj vytvorchasci : TKP 45-1.03-161-2009 (02250). – Vved. 01.05.2010. – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2014. – 52 s.
5. Dikman, L. G. Organizaciya stroitel'nogo proizvodstva: uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov / L. G. Dikman. – izd. 6-e pererab. i dop. – M. : ASV, 2012. – 588 s.

Материал поступил в редакцию 09.06.2022

СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРИДОВ И ЗНАЧЕНИЕ pH В ПОРОВОМ РАСТВОРЕ БЕТОНА ПРИ КАРБОНИЗАЦИИ: АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С. Н. Леонович¹, Е. Е. Шалый², Д. А. Литвиновский³,
А. В. Степанова⁴, А. В. Журавская⁵, В. В. Малюк⁶

¹ Доктор технических наук, профессор, декан строительного факультета Белорусского национального технического университета, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории промышленного и гражданского строительства филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск, Беларусь, e-mail: leonovichsn@tut.by

² Инженер Инженерной школы ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет»

³ Главный инженер ООО «ИнжСпецСтройПроект»

⁴ Старший преподаватель кафедры Строительных технологий и конструкций Белорусского государственного университета транспорта

⁵ Инженер-строитель, инженер кафедры Строительных материалов и технологий строительства Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: zhuravskaya.alin@yandex.by

⁶ Генеральный директор ООО «Трансстрой-Трест»

Реферат

Содержание хлоридов и значение pH порового раствора в зоне стальной арматуры являются определяющими параметрами инициации и скорости коррозии. Поровая жидкость цементного камня при исследовании была выделена из порового пространства высоким давлением. Влияние водо-цементного отношения, возраста и добавления хлорида в свежую смесь на содержание хлоридов в поровом растворе оценено методом ионной хроматографии. При этом определено значение pH порового раствора. Содержание растворенного хлорида уменьшается с увеличением водо-цементного отношения. Количество связанного хлорида со временем увеличивается, но уменьшается со снижением содержания растворенного хлорида в поровом растворе. Отмечено значительное влияние карбонизации на содержание растворенного хлорида в поровой жидкости. При полной карбонизации содержание растворенного хлорида в цементном камне увеличивается в 2–12 раз. Связанный хлорид уменьшается на 27 %–54 %, значение pH снижается с 13,2 до 8,0 из-за карбонизации. Можно сделать вывод, что карбонизация не только снижает значение pH, но и высвобождает связанный хлорид. Это одна из очевидных причин, почему комбинированное действие проникновения хлорида и карбонизации ускоряет коррозию стали и сокращает срок службы железобетонных конструкций.

Ключевые слова: хлорид, поровый раствор, карбонизация, значение.

CHLORIDE CONTENT pH VALUE IN THE PORE SOLUTION OF CONCRETE DURING CARBONIZATION: ANALYSIS OF EXPERIMENTAL STUDIES

S. N. Leonovich, E. E. Shaly, D. A. Litvinovsky, A. V. Stepanova, A. V. Zhuravskaya, V. V. Malyuk

Abstract

The chloride content and the pH value of the pore solution in the steel reinforcement zone are the determining parameters of the initiation and rate of corrosion. The pore liquid of the cement stone was isolated from the pore space by high pressure during the study. The effect of the water-cement ratio, age, and the addition of chloride to the fresh mixture on the chloride content in the pore solution was evaluated by ion chromatography. At the same time, the pH value of the pore solution is determined. The dissolved chloride content decreases with an increase in the water-cement ratio. The amount of bound chloride increases over time, but decreases with a decrease in the content of dissolved chloride in the pore solution. A significant effect of carbonation on the content of dissolved chloride in the pore liquid was noted. With complete carbonation, the content of dissolved chloride in cement stone increases by 2-12 times. The bound chloride decreases by 27%-54%, the pH value decreases from 13.2 to 8.0 due to carbonation. It can be concluded that carbonation not only reduces the pH value, but also releases bound chloride. This is one of the obvious reasons why the combined effect of chloride penetration and carbonation accelerates the corrosion of steel and shortens the service life of reinforced concrete structures.

Keywords: chloride, pore solution, carbonation, value.

Введение

Сложная поровая структура цементного камня в бетоне состоит из нанопор с максимальным диаметром 2 нм, микропор с максимальным диаметром от 0,1 до 1 мкм и более крупных капиллярных пор диаметром до 1 мм. В обычных климатических условиях поровое пространство частично заполняется водой в зависимости от относительной влажности окружающей среды. Водный раствор в поровом пространстве содержит в основном такие катионы, как Na⁺, K⁺ и Ca²⁺, такие анионы, как OH⁻, Al(OH)₄⁻ и SO₄²⁻, и Si(OH)₄. Химический состав порового раствора изменяется в зависимости от типа цемента, отношения вода-цемент и степени гидратации. На более поздней стадии некоторые ионы могут покидать поровое пространство путем выщелачивания, а другие ионы, такие как хлорид, сульфат и аммоний, могут проникать. Кроме того, CO₂ может проникать в поровое пространство либо растворяясь в воде, либо в виде газа из окружающей среды.

Концентрация хлоридов и значение pH порового раствора в зоне стальной арматуры являются главными параметрами для иницирования и скорости коррозии. Процесс проникновения хлорида в поровое пространство бетона очень сложен и до конца не изучен. Если поверхность бетона соприкасается с морской водой или с водой,

содержащей противогололедную соль, водный раствор сначала быстро поглощается ввиду капиллярного подсоса. Когда скорость капиллярного поглощения становится незначительной, хлорид может переноситься вглубь бетона медленно в процессе диффузии. Но этот процесс диффузии трудно прогнозировать, поскольку он противодействует конвективному потоку ионов хлорида к поверхности во время длительного процесса сушки. Кроме того, диффузия хлоридов является реакционноспособным процессом диффузии. Часть ионов будет химически связана на пути к армированию, а другая часть закрепится адсорбцией на внутренней поверхности цементного камня.

При гидратации цемента в присутствии хлорида соли Фриделя (3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O) и Кузеля (3CaO·Al₂O₃·0.5CaSO₄·0.5CaCl₂·10(11)H₂O) могут быть сформированы в бетоне. Как соль Фриделя, так и соль Кузеля могут быть классифицированы как AFm, что является простым термином семейства гидратированных алюминатных фаз кальция. Балонис и др. (2010) [3] определили твердые растворы и взаимодействия соли Фриделя с другими фазами AFm. Они также предложили равновесную модель связывания хлоридов AFm и разработали факторы минералогии AF/AFm. Кристаллическая структура соли Кузеля была

подробно исследована Месбах (2011) [15–18]. Кроме того, некоторые хлориды могут быть химически связаны другими продуктами гидратации цемента путем замещения.

Тейссинг (1978) [20,21] изучал связывание хлорида в цементном камне в присутствии NaCl и CaCl₂. Их результаты показали, что существует химическое равновесие между концентрацией хлорида в продуктах гидратации и концентрацией хлорида в поровом растворе. Хасимото и др. (2012) [12–14] обнаружили, что связывание хлоридов в присутствии NaCl было ускорено по сравнению с CaCl₂.

В данной работе определено содержание хлорида в поровой жидкости цементного камня. Пористый раствор был выделен под высоким давлением. В исследовании варьировалось соотношение вода – цемент (W/C) и возраст твердения, некоторые образцы были сделаны с добавлением хлорида в свежую смесь. Наконец, исследовано влияние карбонизации на содержание растворенного хлорида. Растворенные ионы хлорида в поровом растворе определяли методом ионной хроматографии.

2 Экспериментальные исследования

2.1 Подготовка образцов

Для этих исследований были отобраны одна растворная смесь (М) и две смеси цементной пасты (НСП1 и НСП2) с использованием обычного портландцемента Р.О 42.5 и дистиллированной воды. Для производства образцов раствора использовался стандартный песок. В некоторые образцы было добавлено 0,5 % или 1,0 % хлорида натрия по отношению к массе цемента. Химический состав и характеристики цемента приведены в таблицах 1 и 2. Составы всех смесей раствора и цементной пасты приведены в таблице 3.

Для этих экспериментов были изготовлены два типа цилиндров диаметром 50 мм. Один тип цилиндра имел высоту 50 мм. Эти цилиндры использовали для экспрессии порового раствора после 3 и 7 дней соответственно. Второй тип имел высоту 10 мм. Эти тонкие диски подвергались ускоренной карбонизации до того, как был экспрессирован поровый раствор.

Таблица 1 – Химический состав цемента

Химический состав	Процент (%)	Химический состав	Процент (%)
SiO ₂	22.69	SO ₃	1.91
Fe ₂ O ₃	4.21	K ₂ O	0.51
Al ₂ O ₃	7.79	Na ₂ O	0.56
CaO	57.03	TiO ₂	0.41
MgO	4.54	P ₂ O ₅	0.14

Таблица 2 – Дополнительные характеристики цемента

Характеристика	Значение
Свободный CaO (%)	1.26
Общее содержание хлоридов (%)	0.1773
Удельная площадь поверхности (м ² /кг)	338.92
Потери при прокаливании (%)	2.31

Таблица 3 – Состав образцов

Смесь	Цемент (кг/м ³)	Песок (кг/м ³)	Вода (кг/м ³)	W/C	NaCl
М	789	523	552	0.7	0; 0,5%; 1,0%
НСП1	1243	0	621	0.5	0; 0,5%; 1,0%
НСП2	1096	0	768	0.7	0; 0,5%; 1,0%

Распалубку образцов производили после 24 ч формования, а свежие образцы потом хранились в воде при температуре (20±3) °С в течение двух или шести дней. После трех или семи дней замеры в поровом растворе производились специальным прибором. Часть тонких дисков высушили при 50 °С в течение двух дней, а затем помещали в атмосферные условия с содержанием углекислого газа 20 % при относительной влажности 70 % до тех пор, пока диски не были полностью карбонизированы. Ход карбонизации проверяли распылением раствора фенолфталеина на свежееотколотые поверхности. После завершения карбонизации диски снова насыщали дистиллированной водой в контейнере, размер которого сводил к минимуму риск значительного выщелачивания в процессе

насыщения. После насыщения пять дисков укладывались один на другой, образуя цилиндр высотой 50 мм. Затем из того композитного цилиндра был извлечён поровый раствор.

2.2 Получение порового раствора

Барнибэк и Даймонд (1981) [4–8] разработали метод выдавливания порового раствора из бетона. Показано, что химический состав жидкости, полученной этим способом, близок по составу реальной поровой жидкости в цементном камне или бетоне. Однако этот метод имеет свои ограничения. Образцы должны быть специально подготовлены, водо-цементное отношение не может быть ниже определенного значения, а гидратация образцов не может быть слишком продвинутой. Конечно, остаётся еще небольшое количество жидкости, которую можно выдавить из цементных материалов. Поэтому также применялись альтернативные методы, такие как выщелачивание.

Несмотря на ограничения, прямая вытяжка по-прежнему является приемлемым способом получения порового раствора из цементирующих материалов по сравнению с другими методами. Хак и Кайяли [9,11] показали, что концентрация хлоридов в цементном растворе из молотого порошка бетона была примерно в два раза выше, чем у выжатого раствора в 24 испытаниях бетона. Кроме того, это превышение снижалось с увеличением прочности бетона и ростом концентрации хлоридов в бетоне. В испытаниях на образцах цементной пасты Арья и Ньюман (1990) [2] пришли к выводу, что тест на водорастворимый хлорид почти всегда завышает содержание свободных хлоридов в смесях, содержащих внутренний и внешний хлорид.

В ходе исследования после затвердевания длинных цилиндров или завершения карбонизации коротких цилиндров образцы были помещены в устройство отжатия порового раствора, которое было разработано на основе концепций Барнибэк и Даймонд (1981) [4] (рисунок 1). По достижению уровня нагрузки от 1600 до 1800 кН скорость загрузки поддерживалась постоянной в течение 3–5 минут. Под приложенной нагрузкой поровый раствор вытекал через слив и собирался в небольшой стеклянный стакан. Из каждого образца это устройство позволяет получить от 4 до 6 мл порового раствора для последующего анализа.

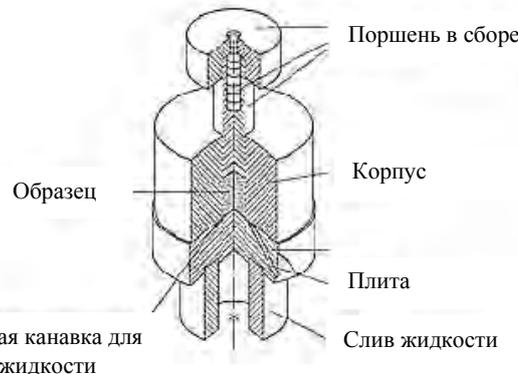


Рисунок 1 – Устройство для отжатия порового раствора

2.3 Анализ порового раствора

Отжатый поровый раствор пропускать через фильтрующую (0,45 μm) мембрану. Затем содержание растворенного хлорида в отжатом поровом растворе определяли методом ионной хроматографии.

Значение pH порового раствора измеряли с помощью калиброванного цифрового pH-метра.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Содержание хлоридов в поровом растворе

Содержание растворенного хлорида в поровой жидкости раствора (М) и цементного камня с двумя различными водо-цементными отношениями W/C = 0,5 (НСП1) и W/C = 0,7 (НСП2) показано в таблице 4. В свежую смесь были добавлены фиксированные количества NaCl (0; 0,5 % и 1,0 %). Это зафиксировано в таблице 4 значениями 0, 0,5 и 1,0 после соответствующего обозначения смеси. Содержание растворенного хлорида в поровой жидкости низкого W/C (0,5) выше, чем в поровом растворе более высокого W/C (0,7). Очевидной причиной этого эффекта является значительная разница в содержании воды в поровой системе и, следовательно, более высокое разбавление хлорида в НСП2.

Таблица 4 – Растворенный хлорид в поровом растворе

Тип смеси	Растворенный хлорид (мг/л)		
	3 д	7 д	7 д-С
M-0	130	106	1353
M-0,5	2459	1023	7332
M-1.0	6871	4262	12 746
HCP1-0	485	444	1767
HCP1-0.5	4866	2294	9063
HCP1-1.0	9488	8894	24 384
HCP2-0	292	233	983
HCP2-0.5	3140	1175	6436
HCP2-1.0	8372	3728	14 901

В первом столбце 0, 0,5 и 1,0 представляют 0, 0,5 % и 1,0 % NaCl, добавленных в свежую смесь.

Из таблицы 4 следует, что концентрация растворенного хлорида уменьшается при продолжающейся гидратации. Это объясняется тем, что все больше и больше хлорида связывается по мере гидратации. Часть его будет в солях Фриделя и Кузеля, в то время как вторая часть заменит другие ионы в обычных продуктах гидратации. Третья часть будет адсорбирована на поверхности продуктов гидратации и в нанопорах. Хлорид в нанопорах значительно увеличивает усадку за счет увеличения давления (Сковаццо и Тодд, 2001; Виттман и другие, 2009) [19,22].

Добавление хлорида непосредственно в цементирующий материал повысит содержание свободного хлорида в поровом растворе. Однако увеличение растворенного хлорида в поровом растворе выходит за рамки прямой пропорции к добавлению хлорида. Это связано со способностью связывания хлорида продуктами гидратации. Кроме того, содержание свободных хлоридов в поровой жидкости раствора ниже, чем в цементном растворе.

Карбонизация приводит к значительному увеличению концентрации хлоридов в поровом растворе (таблица 4). Для всех девяти смесей содержание растворенного хлорида в поровом растворе при ускоренной карбонизации в 2–12 раз превышает содержание в естественной атмосфере. Снижение общей пористости цементного камня и содержания водного раствора в порах при насыщении является одной из причин увеличения содержания растворенного хлорида в поровом растворе после карбонизации. Тем не менее в карбонизированном состоянии некоторые соединения становятся нестабильными, а затем связанный хлорид высвобождается обратно в поровый раствор. По сообщению Нагао и Уэда (2003) [16–18], отношение растворимого хлорида к общему хлориду вблизи открытой поверхности больше, чем в случае некарбонизированных образцов.

Растворимый хлорид занимает около 90 % общего хлорида в ближайшей зоне к открытой поверхности. Гоньи и Герреро (2003) [10] изучали стабильность соли Фриделя при карбонизации в цементных пастах из алюмината кальция, содержащих 3 % хлорида. По их мнению, карбонизация соли Фриделя не приводит к значительному увеличению растворимого хлорида. В результате исследования обнаружено, что растворенный хлорид действительно усиливается карбонизацией.

Содержание общего хлорида может быть рассчитано как сумма исходного хлорида в цементе (таблица 2) и добавленного хлорида. Кроме того, содержание воды в насыщенном образце может быть определено путем сушки. Затем можно получить количество растворенного хлорида в насыщенном образце. Содержание связанного хлорида рассчитывается из разницы общего и растворенного хлорида. Содержание общего, растворенного и связанного хлоридов приведено в таблице 5 и на рисунке 2–4.

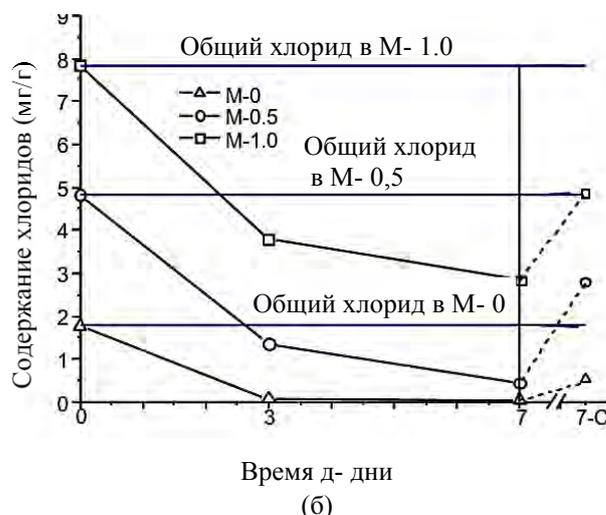
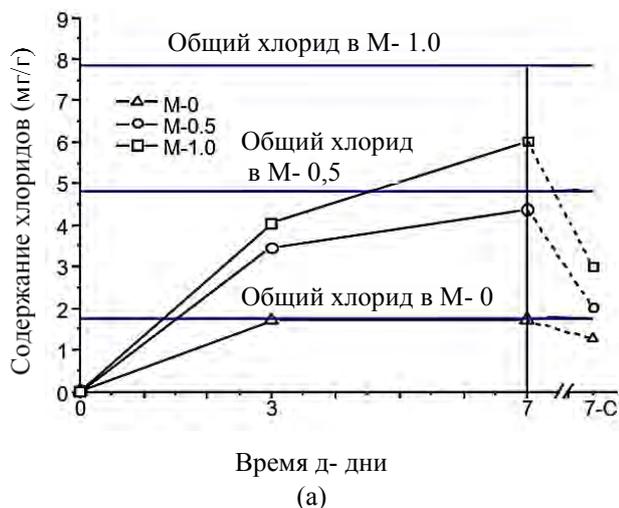
Распределение хлорида в бетоне зависит от общего содержания хлоридов. Количество связанного хлорида уменьшается с уменьшением содержания растворенного хлорида в поровом растворе. По сравнению с образцом без добавления NaCl отношение связанного хлорида к общему хлориду в поровом растворе образцов с добавлением хлорида 0,5 % и 1,0 % снижается соответственно на 25 % и 46 % в возрасте 3 сут. В возрасте 7 сут. отношение связанного хлорида к общему хлориду в поровом растворе образцов с добавлением хлорида 0,5 % и 1,0 % снижается на 7 % и 21 % соответственно.

На рисунке 2–4 показано значительное влияние карбонизации на содержание хлоридов в поровом растворе. Связанный хлорид значительно уменьшается (на 27 %–54 %) из-за карбонизации. Отмечено, что отношение связанного хлорида к общему хлориду увеличивается со временем твердения.

Таблица 5

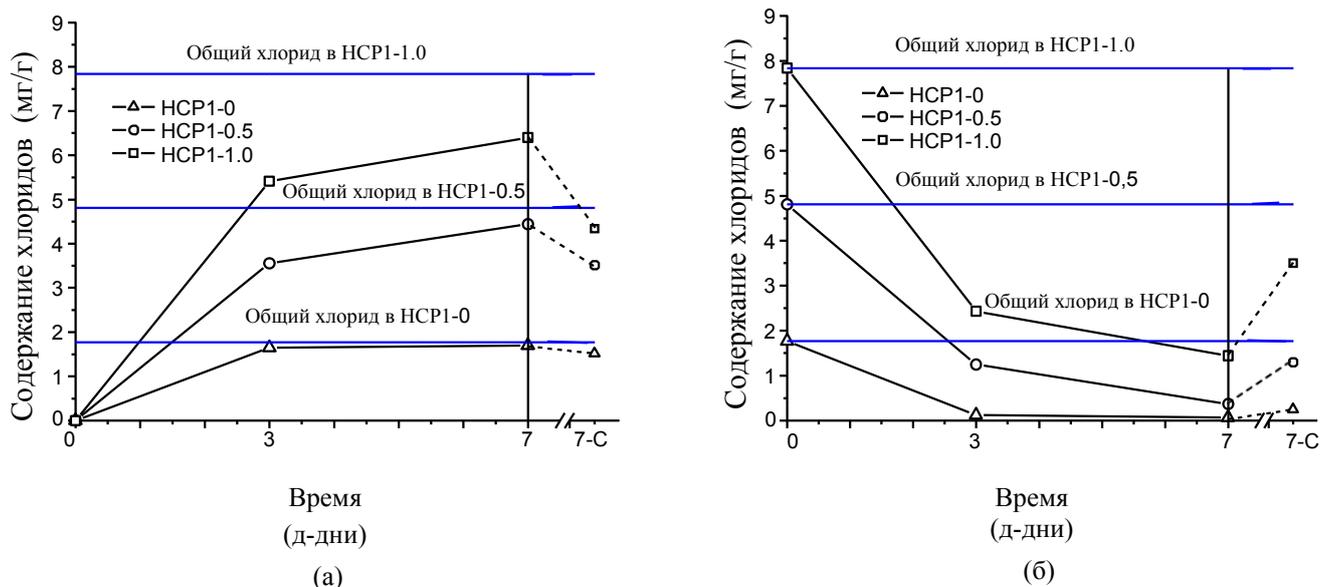
Тип смеси	Общий хлорид (мг/г)	Растворенный хлорид (мг/г)			Связанный хлорид (мг/г)		
		3д	7 д	7 д-с	3 д	7 д	7 д-с
M-0	1,77	0,07	0,05	0,51	1,70	1,72	1,26
M-0,5	4,81	1,36	0,44	2,79	3,45	4,37	2,02
M-1	7,84	3,79	1,83	4,84	4,05	6,01	3,00
HCP1-0	1,77	0,12	0,07	0,25	1,65	1,70	1,52
HCP1-0,5	4,81	1,25	0,37	1,30	3,56	4,44	3,51
HCP1-1	7,84	2,43	1,44	3,50	5,41	6,40	4,34
HCP2-0	1,77	0,10	0,08	0,29	1,67	1,69	1,48
HCP2-0,5	4,81	1,09	0,40	1,92	3,72	4,41	2,89
HCP2-1	7,84	2,91	1,25	4,44	4,93	6,59	3,40

7 д-С: 7 дней, карбонизированный

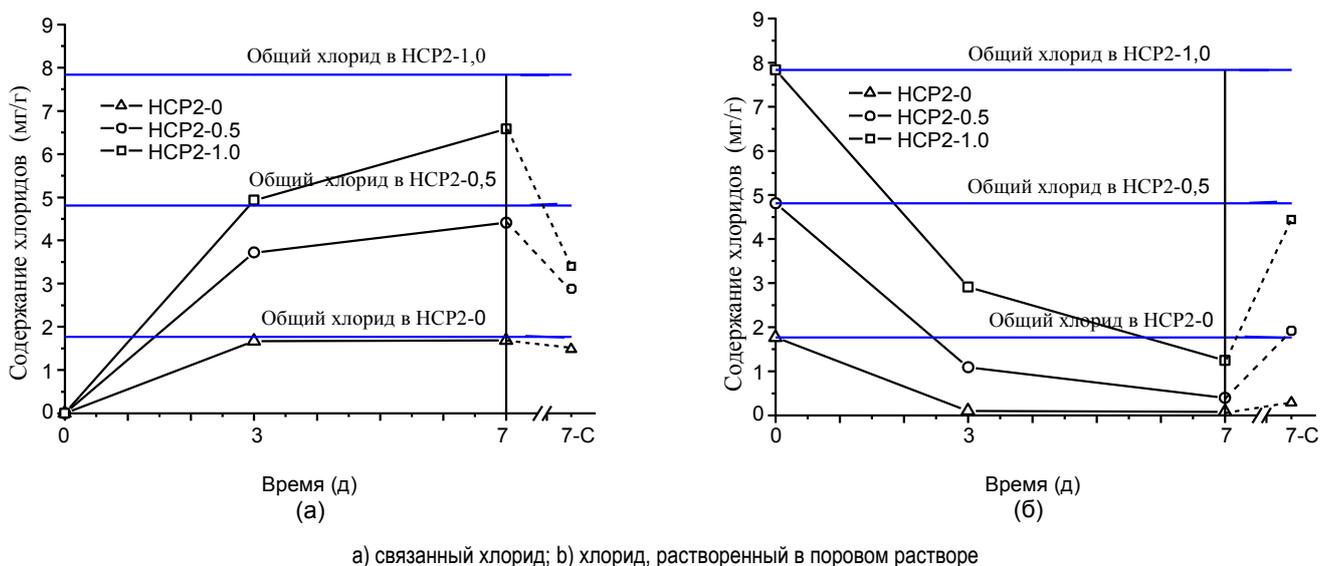


а) связанный хлорид; б) хлорид, растворенный в поровом растворе

Рисунок 2 – Распределение хлоридов в растворе (M) в зависимости от общего содержания хлоридов в разном возрасте и после карбонизации, мг/г цемента



(а) связанный хлорид; б) хлорид, растворенный в поровом растворе
Рисунок 3 – Распределение хлоридов в цементном камне с $W/C = 0,5$ (HCP1) в зависимости от общего содержания хлоридов в разных возрастах и после карбонизации, мг/г цемента



а) связанный хлорид; б) хлорид, растворенный в поровом растворе
Рисунок 4 – Распределение хлоридов в цементном камне разного возраста с $W/C=0,7$ (HCP2) в зависимости от общего содержания хлоридов после карбонизации, мг/г цемента

3.2 Значение pH порового раствора

Значение pH бетона в раннем возрасте высокое, и поэтому сталь защищена от коррозии в таком бетоне. После карбонизации значение pH уменьшается. Измеренные значения pH порового раствора показаны в таблице 6. Независимо от возраста значение pH цементного камня выше 13. После карбонизации были зафиксированы значения около 8.

Таблица 6 – Значения pH порового раствора до и после карбонизации

Тип смеси	pH			
	3 д	7 д	14 д	7 д-С
HCP1-0	13.35	13.39	–	8.10
HCP1-0.5	13.37	13.47	–	7.92
HCP1-1.0	13.42	13.47	–	7.67
HCP2-0	–	13.29	13.23	8.00
HCP2-0.5	–	13.40	13.36	7.70
HCP2-1.0	–	13.19	13.39	7.68

Поскольку значение pH порового раствора снижается до уровня ниже 9, некоторые продукты гидратации становятся нестабильными. Основная форма связывания хлоридов обычно является химической реакцией с фазой алюмината, железа и этtringита с образованием солей Фриделя или Кузеля и физико-химическая реакция между ионами хлорида и C-S-H. Для адсорбции хлоридов AFm (соль Фриделя или соль Кузеля) уменьшение значения pH может снизить степень сопротивления, обеспечиваемой гидроксильными ионами, что приводит к увеличению растворимости AFm. Для адсорбции хлоридов C-S-H снижение общей пористости может обеспечить меньшее количество участков для реакции ионного обмена и физического связывания. Эти механизмы являются основными причинами, по которым хлорид высвобождается в поровый раствор после карбонизации. Повышенная концентрация хлоридов после карбонизации увеличивает разницу между концентрациями во внешнем слое и более глубоких областях. Из-за этой разницы концентраций хлоридов диффузия хлорида в сторону стальной арматуры значительно ускоряется. Юн и др. (2012) [23] изучена связь адсорбции и десорбции хлорид-ионов в поровом растворе со значением pH. Было обнаружено большое количество адсорбированных ионов

хлорида при высоком значении pH. Энстис и др. (2005) [1] обнаружил, что только небольшая часть ионов натрия и калия, присутствующих в образцах, была сохранена в поровом растворе после карбонизации. Им также можно объяснить низкую щелочность порового раствора после карбонизации.

Концентрация хлорида в водном поровом растворе сильно зависит от степени карбонизации. Очевидно, что проникновение хлорида в бетон не может быть описано просто процессом диффузии. Если фронт карбонизации достигает стальной арматуры, повышенная концентрация хлорида после карбонизации может привести к иницированию коррозии стали, даже если уровень проникновения хлорида извне еще не достиг критического значения для некарбонизованного состояния. Это типичный пример комбинированных действий, которые усугубляют ситуацию по долговечности и сроку службы железобетонных конструкций [24–31].

Заключение

На основании результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Анализ отжатого порового раствора дает новое важное представление о распределении хлоридов в бетоне.
2. Распределение хлорида в бетоне зависит от общего содержания хлоридов. Как содержание связанного хлорида, так и концентрация растворенного хлорида увеличиваются с увеличением общего содержания хлорида в условиях химического равновесия.
3. Карбонизация не только снижает значение pH, но в то же время высвобождает связанный хлорид. Значительное количество связанного хлорида высвобождается в поровый раствор в результате карбонизации. Полная карбонизация цементного раствора и бетона с различным отношением воды и цемента ($0,5 < W/C < 0,7$) и с различным количеством хлорида, добавленного в свежую смесь ($0 < \text{хлорид} < 1\%$), увеличивается в 2–12 раз. Параллельно связанный хлорид значительно уменьшается (на 27–54 %) из-за карбонизации.
4. При данных обстоятельствах это комбинированное действие проникновения хлоридов и карбонизации может значительно сократить срок службы железобетонных конструкций за счет иницирования коррозии стали.

Список цитированных источников

1. Anstice, D. J. The pore solution phase of carbonated cement pastes / D. J. Anstice, C. L. Page, M. M. Page // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Volume 35, Issue 2. – P. 377–383.
2. Arya, C. An assessment of four methods of determining the free chloride content of concrete / C. Arya, J. B. Newman // *Materials and Structures*. – 1990. – Volume 23. – P. 319–330.
3. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems / M. Balonis [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – Volume 40, Issue 7. – P. 1009–1022.
4. Barneyback, R. S. Expression and analysis of pore fluids from hardened cement paste and mortars / R. S. Barneyback, S. Diamond // *Cement and Concrete Research*. – 1981. – Volume 11, Issue 2. – P. 279–285.
5. Bermudez, M. A. Models for chloride diffusion coefficients of concrete in tidal zone / M. A. Bermudez, P. Alaejos // *ACI Materials Journal*. – 2010. – No. 107 (1). – P. 3–11.
6. Conciatori, D. Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete / D. Conciatori, H. Sadouki, E. Brühwiler // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – Volume 38, Issue 12. – P. 1401–1408.
7. Conciatori, D. Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate / D. Conciatori, F. Laferrrière, E. Brühwiler // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – Volume 40, Issue 1. – P. 109–118.
8. Duchesne, J. Evaluation of the validity of the pore solution expression method from hardened cement paste and mortars / J. Duchesne, M. A. Berube // *Cement and Concrete Research*. – 1994. – Volume 24, Issue 3. – P. 456–462.
9. Geiker, M. Prediction of chloride ingress and binding in cement paste / M. Geiker, E. P. Nielsen, D. Herfort // *Materials and Structures*. – 2007. – No. 40 (4). – P. 405–417.
10. Goñi, S. Accelerated carbonation of Friedel's salt in calcium aluminate cement paste / S. Goñi, A. Guerrero // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Volume 33, Issue 1. – P. 21–26.

11. Haque, M. N. Free and water soluble chloride in concrete / M. N. Haque, O. A. Kayyali // *Cement and Concrete Research*. – 1995. – Volume 25, Issue 3. – P. 531–542.
12. Chloride ion binding behavior of deicing chlorides under freeze-thaw environment / K. Hashimoto [et al.] // *RILEM Proceedings PRO 83 : 2nd International conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites*. – Paris : RILEM Publications SARL, 2012. – P. 622–629.
13. Lloyd, R. R. Pore solution composition and alkali diffusion in inorganic polymer cement / R. R. Lloyd, J. L. Provis, J. S. J. Deventer // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – Volume 40, Issue 9. – P. 1386–1392.
14. Matschei, T. The AFm phase in Portland cement / T. Matschei, B. Lothenbach, F. P. Glasser // *Cement and Concrete Research*. – 2007. – Volume 37, Issue 2. – P. 118–130.
15. Crystal structure of Kuzel's salt $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\frac{1}{2}\text{CaSO}_4\cdot\frac{1}{2}\text{CaCl}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ determined by synchrotron powder diffraction / A. Mesbah [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – Volume 41, Issue 5. – P. 504–509.
16. Nagao, K. Application of desalination to concrete admixing fly ash or blast-furnace slag / K. Nagao, T. Ueda // *International Journal of Modern Physics B*. – 2003. – No. 17 (8–9). – P. 1452–1457.
17. Pack, S. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment / S. Pack, M. Jung, H. Song // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – Volume 40, Issue 2. – P. 302–312.
18. Page, C. L. Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes / C. L. Page, O. Vennesland // *Materials and Structures*. – 1991. – Volume 16, Issue 1. – P. 19–25.
19. Scovazzo, P. Modeling disjoining pressures in submicrometer liquid-filled cylindrical geometries / P. Scovazzo, P. Todd // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2001. – No. 238 (2). – P. 230–237.
20. Tang, L. Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete / L. Tang // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – Volume 38, Issue (8–9). – P. 1092–1097.
21. Theissing, E. M. The combining of sodium chloride and calcium chloride by a number of different hardened cement pastes / E. M. Theissing, P. Hest-Wardenier, G. Wind // *Cement and Concrete Research*. – 1978. – Volume 8, Issue 6. – P. 683–692.
22. Wittmann, F. H. Shrinkage mechanisms, crack formation and service life of reinforced concrete structures / F. H. Wittmann, F. Beltzung, T. Zhao // *International Journal of Structural Engineering*. – 2009. – No. 1 (1). – P. 13–28.
23. Yoon, I. Chloride ions adsorption and desorption in pore solution with various PH values / I. Yoon, T. Saeki, S. Park // *RILEM Proceedings PRO 83 : 2nd International conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites*. – Paris : RILEM Publications SARL, 2012. – P. 648–655.
24. Леонович, С. Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии / С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь : сборник трудов VII Межд. науч.-метод. семинара / Министерство образования Республики Беларусь, Министерство архитектуры Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Республиканский образовательный центр, Международный образовательный центр СФ БГПА, Белорусская инженерная академия ; под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. – Брест : БрГТУ, 2001. – С. 442–444.
25. Леонович, С. Н. Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии / С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь : сборник трудов VII Межд. науч.-метод. семинара / Министерство образования Республики Беларусь, Министерство архитектуры Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Республиканский образовательный центр, Международный образовательный центр СФ БГПА, Белорусская инженерная академия ; под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. – Брест : БрГТУ, 2001. – С. 445–450.
26. Леонович, С. Н. Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение / С. Н. Леонович, А. В. Прасол // *Строительные материалы*. – 2013. – № 5. – С. 94–95.

27. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель / Е. Е. Шалый [и др.] // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – Т. 68, № 3. – С. 123–131.
28. Шалый, Е. Е. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчёта-прогноза срока службы / Е. Е. Шалый, Л. В. Ким, С. Н. Леонович // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 6. – С. 5–14.
29. Леонович, С. Н. Дegradация железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии / С. Н. Леонович, Е. Е. Шалый, Л. В. Ким // Строительные материалы. – 2019. – № 5. – С. 67–72.
30. Leonovich, S. N. Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction / S. N. Leonovich, E. E. Shalyi, L. V. Kim // Science and Technique. – 2019. – V. 18, No 4. – P. 284–291.
31. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при комбинированном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии и их восстановление / С. Н. Леонович [и др.]; под общ. ред. С. Н. Леоновича. – Минск : БНТУ, 2021. – 353 с.
16. Nagao, K. Application of desalination to concrete admixing fly ash or blast-furnace slag / K. Nagao, T. Ueda // International Journal of Modern Physics B. – 2003. – No. 17 (8–9). – P. 1452–1457.
17. Pack, S. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment / S. Pack, M. Jung, H. Song // Cement and Concrete Research. – 2010. – Volume 40, Issue 2. – P. 302–312.
18. Page, C. L. Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes / C. L. Page, O. Vennesland // Materials and Structures. – 1991. – Volume 16, Issue 1. – P. 19–25.
19. Scovazzo, P. Modeling disjoining pressures in submicrometer liquid-filled cylindrical geometries / P. Scovazzo, P. Todd // Journal of Colloid and Interface Science. – 2001. – No. 238 (2). – P. 230–237.
20. Tang, L. Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete / L. Tang // Cement and Concrete Research. – 2008. – Volume 38, Issue (8-9). – P. 1092–1097.
21. Theissing, E. M. The combining of sodium chloride and calcium chloride by a number of different hardened cement pastes / E. M. Theissing, P. Hest-Wardenier, G. Wind // Cement and Concrete Research. – 1978. – Volume 8, Issue 6. – P. 683–692.
22. Wittmann, F. H. Shrinkage mechanisms, crack formation and service life of reinforced concrete structures / F. H. Wittmann, F. Beltzung, T. Zhao // International Journal of Structural Engineering. – 2009. – No. 1 (1). – P. 13–28.
23. Yoon, I. Chloride ions adsorption and desorption in pore solution with various PH values / I. Yoon, T. Saeki, S. Park // RILEM Proceedings PRO 83 : 2nd International conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites. – Paris : RILEM Publications SARL, 2012. – P. 648–655.
24. Leonovich, S. N. Algoritm rascheta dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij pri hloridnoj agressii / S. N. Leonovich // Perspektivy razvitiya novykh tekhnologij v stroitel'stve i podgotovke kadrov Respubliki Belarus' : sbornik trudov VII Mezhd. nauch.-metod. seminarov / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Ministerstvo arhitektury Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, Respublikanskij obrazovatel'nyj centr, Mezhdunarodnyj obrazovatel'nyj centr SF BGPA, Belorusskaya inzhenernaya akademiya ; pod red. N. P. Bleshchika, A. A. Borisevicha, T. M. Pecol'da. – Brest : BrGTU, 2001. – S. 442–444.
25. Leonovich, S. N. Veroyatnostnaya ocenka korrozii armatury v sushchestvuyushchih zhelezobetonnykh konstrukciyah pri hloridnoj agressii / S. N. Leonovich // Perspektivy razvitiya novykh tekhnologij v stroitel'stve i podgotovke kadrov Respubliki Belarus' : sbornik trudov VII Mezhd. nauch.-metod. seminarov / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Ministerstvo arhitektury Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, Respublikanskij obrazovatel'nyj centr, Mezhdunarodnyj obrazovatel'nyj centr SF BGPA, Belorusskaya inzhenernaya akademiya ; pod red. N. P. Bleshchika, A. A. Borisevicha, T. M. Pecol'da. – Brest : BrGTU, 2001. – S. 445–450.
26. Leonovich, S. N. Zhelezobeton v usloviyah hloridnoj korrozii: deformirovanie i razrushenie / S. N. Leonovich, A. V. Prasol // Stroitel'nye materialy. – 2013. – № 5. – S. 94–95.
27. Sovmestnoe dejstvie karbonizacii i hloridnoj agressii na konstrukcionnyj beton: veroyatnostnaya model' / E. E. Shalyi [i dr.] // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2018. – T. 68, № 3. – S. 123–131.
28. Shalyi, E. E. Zhelezobeton pri vozdejstvii karbonizacii i hloridnoj agressii: veroyatnostnaya model' raschyota-prognoza sroka sluzhby / E. E. Shalyi, L. V. Kim, S. N. Leonovich // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova. – 2018. – № 6. – S. 5–14.
29. Leonovich, S. N. Degradaciya zhelezobetonnykh konstrukcij morskikh sooruzhenij ot sovmestnogo vozdejstviya karbonizacii i hloridnoj agressii / S. N. Leonovich, E. E. Shalyi, L. V. Kim // Stroitel'nye materialy. – 2019. – № 5. – S. 67–72.
30. Leonovich, S. N. Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction / S. N. Leonovich, E. E. Shalyi, L. V. Kim // Science and Technique. – 2019. – V. 18, No 4. – P. 284–291.
31. Prognozirovanie dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij pri kombinirovannom vozdejstvii karbonizacii i hloridnoj agressii i ih vosstanovlenie / S. N. Leonovich [i dr.]; pod obshch. red. S. N. Leonovicha. – Минск : BNTU, 2021. – 353 s.

References

1. Anstice, D. J. The pore solution phase of carbonated cement pastes / D. J. Anstice, C. L. Page, M. M. Page // Cement and Concrete Research. – 2005. – Volume 35, Issue 2. – P. 377–383.
2. Arya, C. An assessment of four methods of determining the free chloride content of concrete / C. Arya, J. B. Newman // Materials and Structures. – 1990. – Volume 23. – P. 319–330.
3. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems / M. Balonis [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2010. – Volume 40, Issue 7. – P. 1009–1022.
4. Barneyback, R. S. Expression and analysis of pore fluids from hardened cement paste and mortars / R. S. Barneyback, S. Diamond // Cement and Concrete Research. – 1981. – Volume 11, Issue 2. – P. 279–285.
5. Bermudez, M. A. Models for chloride diffusion coefficients of concrete in tidal zone / M. A. Bermudez, P. Alaejos // ACI Materials Journal. – 2010. – No. 107 (1). – P. 3–11.
6. Conciatori, D. Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete / D. Conciatori, H. Sadouki, E. Brühwiler // Cement and Concrete Research. – 2008. – Volume 38, Issue 12. – P. 1401–1408.
7. Conciatori, D. Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate / D. Conciatori, F. Laferrière, E. Brühwiler // Cement and Concrete Research. – 2010. – Volume 40, Issue 1. – P. 109–118.
8. Duchesne, J. Evaluation of the validity of the pore solution expression method from hardened cement paste and mortars / J. Duchesne, M. A. Berube // Cement and Concrete Research. – 1994. – Volume 24, Issue 3. – P. 456–462.
9. Geiker, M. Prediction of chloride ingress and binding in cement paste / M. Geiker, E. P. Nielsen, D. Herfort // Materials and Structures. – 2007. – No. 40 (4). – P. 405–417.
10. Goñi, S. Accelerated carbonation of Friedel's salt in calcium aluminate cement paste / S. Goñi, A. Guerrero // Cement and Concrete Research. – 2003. – Volume 33, Issue 1. – P. 21–26.
11. Haque, M. N. Free and water soluble chloride in concrete / M. N. Haque, O. A. Kayyali // Cement and Concrete Research. – 1995. – Volume 25, Issue 3. – P. 531–542.
12. Chloride ion binding behavior of deicing chlorides under freeze-thaw environment / K. Hashimoto [et al.] // RILEM Proceedings PRO 83 : 2nd International conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites. – Paris : RILEM Publications SARL, 2012. – P. 622–629.
13. Lloyd, R. R. Pore solution composition and alkali diffusion in inorganic polymer cement / R. R. Lloyd, J. L. Provis, J. S. J. Deventer // Cement and Concrete Research. – 2010. – Volume 40, Issue 9. – P. 1386–1392.
14. Matschei, T. The AFm phase in Portland cement / T. Matschei, B. Lothenbach, F. P. Glasser // Cement and Concrete Research. – 2007. – Volume 37, Issue 2. – P. 118–130.
15. Crystal structure of Kuzel's salt $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 1/2\text{CaSO}_4\cdot 1/2\text{CaCl}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ determined by synchrotron powder diffraction / A. Mesbah [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2011. – Volume 41, Issue 5. – P. 504–509.

Материал поступил в редакцию 04.07.2022

СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕЗУ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ ПЛОСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ БЕЗ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ СОВМЕСТНОМ РАССМОТРЕНИИ НОРМАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО СЕЧЕНИЙ

В. В. Молош¹, И. Г. Томашев², М. В. Колесниченко³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры прикладной механики

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: m.vic@rambler.ru

² Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной механики

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: tomashev@mail.ru

³ Студентка четвёртого курса строительного факультета

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь

Реферат

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, выполненные к настоящему времени в области изучения сопротивления срезу при продавливании плоских железобетонных плит, не позволили к настоящему времени разработать точную и надёжную расчётную модель. В настоящей работе представлена расчётная модель, в которой предложено одновременно выполнять проверку нормального и наклонного к плоскости плиты сечений. В основу модели положены уравнения равновесия, уравнения совместности и уравнения, описывающие физические свойства материалов. При этом предельное состояние конструктивного элемента наступает при достижении предельных значений относительных деформаций в бетоне или арматуре.

Ключевые слова: сопротивление срезу при продавливании, расчётная модель, предельное состояние, уравнения равновесия, уравнения совместности относительных деформаций.

PUNCHING SHEAR RESISTANCE OF FLAT REINFORCED CONCRETE SLABS WITHOUT TRANSVERSAL REINFORCEMENT IN COMBINED CONSIDERATION OF NORMAL AND INCLINED SECTIONS

V. V. Molosh, I. G. Tomashev, M. V. Kolesnichenko

Abstract

Numerous experimental and theoretical studies carried out to date in the field of punching shear resistance when flat reinforced concrete slabs have not made it possible to develop an accurate and reliable calculation model by now. In this paper, a calculation model is proposed, in which it is proposed to simultaneously check the normal and inclined sections of the slab. The model is based on equilibrium equations, compatibility equations and equations describing the physical properties of materials. In this case, the limit state of the structural element occurs when the limit values of relative deformations in concrete or reinforcement are reached.

Keywords: shear resistance at punching, computational model, limit state, equation, equation, complexity, deformation relationship.

Введение

Широкое применение монолитного железобетона в строительстве зданий и сооружений различного назначения, имеющее место в последние несколько десятилетий, вынуждает совершенствовать существующие методы расчётов различных конструкций из данного материала. В жилых и общественных зданиях из монолитного железобетона к таким конструкциям относятся элементы каркаса: плоские плиты фундаментов, перекрытий и покрытий, колонны, лестничные марши и диафрагмы жёсткости в виде вертикальных плоских панелей. Одним из наименее изученных элементов монолитного железобетонного каркаса является узел сопряжения плоской плиты и колонны.

Несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, выполненные к настоящему времени, в проблеме сопротивления срезу при продавливании до конца не ясен механизм распределения внутренних усилий и деформаций, а также не разработана точная и надёжная расчётная модель, позволяющая предсказывать величину указанного сопротивления. Расчёты таких узлов в настоящее время ведутся как правило с применением моделей, полученных путём статистической обработки результатов экспериментальных исследований, и являются эмпирическими.

1 Теоретические основы

В результате экспериментального исследования в работе [3] было установлено, что плиты с коэффициентом продольного армирования $\rho_l \leq 0,002$ разрушались от изгиба с разрывом продольной арматуры в наиболее нагруженном сечении, нормальном к продольной плоскости плиты. Поэтому следует одновременно выполнять проверку

нормального и наклонного к плоскости плиты сечений (сечения 1 и сечения 2 соответственно, рисунок 1).

В основу модели положены следующие допущения:

- в расчёте рассматривают модель плиты в виде плоского консольного балочного элемента, защемлённого в зоне сопряжения плиты и колонны, длина консольного свеса которого ограничена сечением, в котором внутренний изгибающий момент принимает нулевое значение;
- рассматриваемый железобетонный элемент в процессе деформирования после образования нормальной и наклонной трещин делится на три блока, которые взаимодействуют между собой посредством оставшихся неразрушенными связей (рисунок 1); первый блок – колонна, второй блок – ABCNSD; третий блок – BGLNC;
- после образования наклонной трещины бетон испытывает сжатие по направлению вдоль наклонной трещины в зоне между наклонной трещиной и колонной и вдоль нейтральной плоскости плиты в сжатой зоне плиты (фрагмент SDCN);
- в наклонной трещине действуют касательные напряжения, которые вызваны зацеплением контактирующих поверхностей бетона и зависят от степени шероховатости поверхностей и ширины раскрытия трещины;
- в расчётах используют постоянный угол наклона диагональной трещины, равный $\theta = 34^\circ$;
- в сжатой зоне бетона над вершиной наклонной трещины формируется плоское напряжённо-деформированное состояние (рисунок 1б, в), при котором на вертикальных и горизонтальных гранях элементарных площадок плоского параллелепипеда

в бетоне возникают нормальные напряжения f_{cx} и f_{cy} и касательные напряжения V_c , подчиняющиеся закону парности, а по наклонным площадкам – главные растягивающие f_1 и главные сжимающие f_2 напряжения; в расчетах используют средние значения всех перечисленных напряжений как функции соответствующих им относительных деформаций;

- в наклонной трещине главные растягивающие напряжения не возникают.

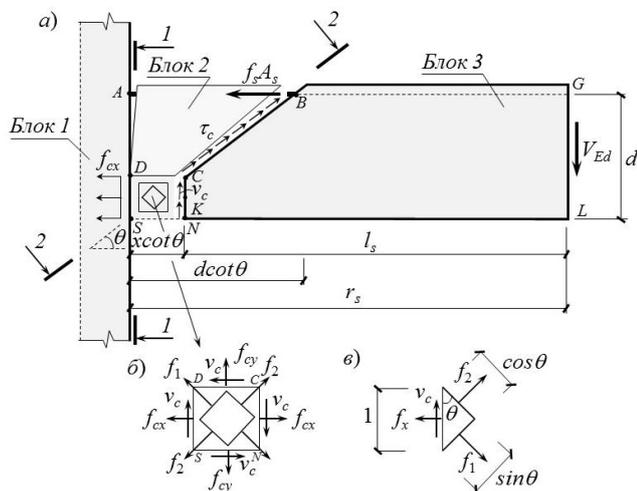


Рисунок 1 – Схема образования нормальной и наклонной трещин в процессе сопротивления срезу при продавливании

Наиболее нагруженное нормальное сечение плиты (сечение 1 у грани колонны, рисунок 1) предложено рассчитывать по общему деформационному методу, детально изложенному в работе [4].

При этом нормальное к продольной оси поперечное сечение разбивают на отдельные полосы прямоугольной формы площадью A_{ci} . Ширина каждой полосы принимается равной расчётной ширине элемента b . В упрощенных моделях принимают допущение о том, что напряжения σ_{ci} в пределах каждого выделенного элементарной полосы бетона постоянны и равны напряжениям на уровне его центра тяжести. Поэтому относительные деформации рассчитывают на уровне центра тяжести каждого элементарного участка. Поперечное сечение разбивают на 10–12 полос по высоте, так как в этом случае допущение о постоянных напряжениях в пределах элементарного участка не вносит существенной погрешности в расчеты.

Для поперечного сечения необходимо составить:

- уравнения равновесия:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} A_{sj} = N_z; \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} A_{ci} y_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} A_{sj} y_{sj} = M_z; \end{cases} \quad (1)$$

- уравнения совместности относительных деформаций, опирающиеся на гипотезу плоского сечения и определяющие их распределение по сечению:

$$\begin{cases} \varepsilon_{ci} = \varepsilon_z + \psi \cdot y_{ci}; \\ \varepsilon_{sj} = \varepsilon_z + \psi \cdot y_{sj}; \end{cases} \quad (2)$$

- физические уравнения, связывающие напряжения и относительные деформации для бетона и арматуры в виде диаграмм деформирования для бетона и арматуры;

$$\begin{cases} \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}); \\ \sigma_{sj} = f(\varepsilon_{sj}), \end{cases} \quad (3)$$

где σ_{ci} , σ_{sj} – средние нормальные напряжения соответственно в i -й бетонной полосе и в j -м стержне арматуры (могут быть определены по аналитическим выражениям, описывающим диаграммы деформирования материалов, принятыми из [4]);

A_{ci} , A_{sj} – площадь поперечного сечения соответственно i -й бетонной полосы и j -го стержня арматуры;

y_{ci} , y_{sj} – расстояние по вертикали от наиболее сжатой грани бетона до центра тяжести соответственно i -й бетонной полосы и j -го стержня арматуры;

M_z – изгибающий момент, вызванный действием внешней поперечной силы V_{Ed} ;

ε_z – средние относительные деформации наиболее сжатой грани бетонного сечения;

ψ – кривизна поперечного сечения элемента.

Расчёт выполняется с учётом физической нелинейности сопротивления бетона элемента в итерационной форме. Диаграммы деформирования для бетона приведена на рисунке 2 и описывается следующими выражениями:

- напряжения в бетоне при сжатии:

$$\sigma_c = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \cdot f_{cm}, \quad (4)$$

где $k = \frac{1,1E_{cm}|\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$;

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}};$$

$$\varepsilon_{c1} = -0,002;$$

E_{cm} , f_{cm} – среднее значение соответственно модуля упругости и прочности бетона при сжатии;

ε_c – текущие относительные деформации в бетоне при осевом сжатии;

ε_{c1} – относительные деформации в бетоне, соответствующие пиковой точке на диаграмме деформирования при сжатии;

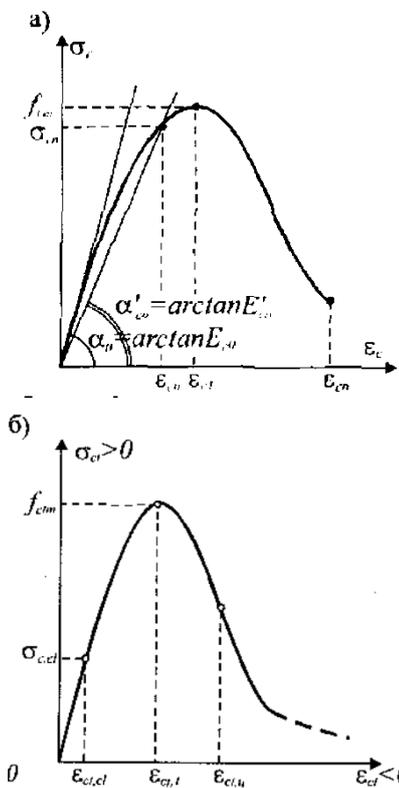


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования бетона при осевом сжатии (а) и при осевом растяжении (б)

- напряжения в бетоне при растяжении на восходящей ветви:

$$\sigma_{ct} = \left[1,2 \left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}} \right) - 0,2 \left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}} \right)^6 \right] \cdot f_{ctm}, \quad (5)$$

где ε_{ct} – текущие относительные деформации в бетоне при осевом растяжении;

$\varepsilon_{ct1} = (44f_{ctm}) \cdot 10^{-6}$, МПа – относительные деформации, соответствующие пиковой точке на диаграмме деформирования при растяжении;

$f_{ctm} = 0,312f_{cm}^2$ – среднее значение прочности бетона при растяжении;

- напряжения в бетоне при растяжении на нисходящей ветви:

$$\sigma_{ct} = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}} \cdot f_{ctm}, \quad (6)$$

$$\alpha_{ct} \left[\left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}} \right) - 1 \right] + \left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}} \right)$$

где $\alpha_{ct} = 0,312f_{ctm}^2$.

Для арматуры принята билинейная диаграмма деформирования Прандтля с пиковой точкой соответствующей пределу текучести арматуры f_y .

Учитывая, что напряжения и относительные деформации на рассматриваемом уровне нагружения конструкции связаны секущим модулем деформаций E'_c , который представляет собой модуль упругости на соответствующем этапе нагружения и определяется из диаграмм деформирования [рисунок 2, выражения (4)-(6)], можно записать:

$$\sigma_{ci}(\varepsilon_{ci}) = E'_{ci} \varepsilon_{ci}; \quad (7)$$

$$\sigma_{sj}(\varepsilon_{sj}) = E'_{sj} \varepsilon_{sj}.$$

Из совместного решения (1), (2) и (7) система уравнений (1) может быть преобразована к виду:

$$\left\{ \left(\sum_{i=1}^n E'_{ci} A_{ci} + \sum_{j=1}^m E'_{sj} A_{sj} \right) \varepsilon_z + \left(\sum_{i=1}^n E'_{ci} A_{ci} y_{ci} + \sum_{j=1}^m E'_{sj} A_{sj} y_{sj} \right) \psi = N_z; \right.$$

$$\left. \left(\sum_{i=1}^n E'_{ci} A_{ci} y_{ci} + \sum_{j=1}^m E'_{sj} A_{sj} y_{sj} \right) \varepsilon_z + \left(\sum_{i=1}^n E'_{ci} A_{ci} y_{ci}^2 + \sum_{j=1}^m E'_{sj} A_{sj} y_{sj}^2 \right) \psi = M_x. \right. \quad (8)$$

Или к следующему виду:

$$\begin{cases} R_{11} \varepsilon_z + R_{12} \psi = N_z; \\ R_{21} \varepsilon_z + R_{22} \psi = M_x. \end{cases}$$

где $R_{11} = \sum_{i=1}^n E'_{ci} A_{ci} + \sum_{j=1}^m E'_{sj} A_{sj}$ – осевая жесткость;

$R_{12} = R_{21} = \sum_{i=1}^n E'_{ci} A_{ci} y_{ci} + \sum_{j=1}^m E'_{sj} A_{sj} y_{sj}$ – изгибно-осевая жесткость, отражающая взаимное влияние продольного сжатия (растяжения) и изгиба вокруг оси x ;

$R_{22} = \sum_{i=1}^n E'_{ci} A_{ci} y_{ci}^2 + \sum_{j=1}^m E'_{sj} A_{sj} y_{sj}^2$ – изгибная жесткость во-

круг оси x .

Расчёт нормального сечения на заданном уровне нагружения следует вести в итерационном виде, изменяя в процессе расчёта величину секущего модуля упругости до тех пор, пока рассчитанные

и заданные значения продольной силы N_z и изгибающего момента M_x не будут равны между собой с требуемой точностью.

В результате расчёта нормального к продольной оси элемента сечения получают текущие значения напряжений, деформаций и модуля упругости в сжатой зоне бетона и растянутой арматуре.

Расчёт наклонного к продольной оси сечения следует вести из рассмотрения равновесия блока 3 (рисунок 1). При этом для элементов без поперечной арматуры могут быть составлены следующие уравнения равновесия:

$$\begin{cases} \sum X = f_c b x + \tau_c (d - x) b \cot \theta - f_s A_s = 0; \\ \sum Y = v_c b x + \tau_c (d - x) b - V_{Ed} = 0; \\ \sum M_k = V_{Ed} l_s - f_s A_s (d - 0,5x) + \tau_c (d - x) b \cot \theta \cdot 0,5x = 0. \end{cases} \quad (9)$$

где f_c – текущие нормальные напряжения в сжатой зоне бетона, полученные после расчёта наиболее нагруженного нормального сечения;

$b = 2 \cdot (a_k + b_k) + 3,1 \pi d$ – ширина расчётного сечения плоского балочного элемента; a_k ,

b_k – размеры колонны в плане в зоне сопряжения с плитой;

x – высота сжатой зоны бетона;

τ_c , – касательные напряжения, вызванные зацеплением контактирующих поверхностей бетона в наклонной трещине;

d – эффективная рабочая высота плиты, определяемая расстоянием от нижней сжатой грани плиты до центра тяжести растянутой арматуры;

f_s – текущие напряжения в продольной арматуре;

A_s – площадь продольной арматуры;

v_c – касательные напряжения, возникающие в сжатой зоне бетона над вершиной наклонной трещины;

V_{Ed} – внешняя обобщенная поперечная сила;

$l_s = r_s - x \cot \theta$ – расстояние по горизонтали от сечения с нулевым моментом до вершины наклонной трещины (рисунок 5);

r_s – пролёт среза – расстояние от точки приложения поперечной силы V_{Ed} до грани колонны (плечо внешней пары сил);

θ – угол наклона трещины среза.

Из решения системы уравнений (9) может быть получено выражение для определения касательных напряжений v_c в сжатом бетоне над наклонной трещиной:

$$v_c = f_s \rho_l \frac{h}{x} \left(\frac{d - x}{l_s} - \tan \theta \right) - f_c \left(\frac{x}{2l_s} + \tan \theta \right), \quad (10)$$

где ρ_l – коэффициент продольного армирования поперечного сечения;

h – высота плиты.

Средняя величина относительных деформаций при сдвиге в сжатой зоне бетона может быть получена по известной формуле

$$\gamma = \frac{v_c}{G}, \quad (11)$$

где $G = k \cdot E'_c$ – текущий модуль сдвига бетона;

$k = 0,305$ – корректирующий эмпирический коэффициент.

Зависимости между осевыми и главными относительными деформациями в сжатой зоне бетона могут быть получены из рассмотрения элементарной призмы (рисунок 1в) с учётом приведенных выше допущений в виде

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 \sin^2 \theta + \varepsilon_2 \cos^2 \theta; \quad (12)$$

$$\frac{\gamma}{2} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin \theta \cos \theta.$$

Из системы уравнений (12) могут быть определены главные относительные деформации ε_1 и ε_2 .

Величина предельной перерезывающей силы V_{Ed} может быть определена из выражения:

$$V_{Ed} = v_c b x + \tau_c (d - x) b, \quad (13)$$

где $\tau_c = \frac{0,18 \sqrt{f_{cm}}}{0,3 + 30 \cdot d \cot \theta \cdot \varepsilon_{sx}}$ – касательные напряжения,

вызванные зацеплением контактирующих поверхностей бетона в трещине среза;

ε_{sx} – относительные деформации в растянутой арматуре наклонного сечения 2, которые для упрощения расчёта могут быть приняты равными относительным деформациям в растянутой арматуре нормального сечения 1.

Расчёт может быть выполнен в следующей последовательности:

1. Выполнить разбиение на элементарные полосы нормального к продольной оси плиты сечения 1. Задать начальные геометрические параметры сечения и физико-механические параметры материалов.
2. Задать начальные значения продольной силы N_z и изгибающего момента M_x для расчёта нормального сечения 1 по деформационной модели.
3. Из решения систем уравнения (8) и (2) рассчитать значения относительных деформаций в i -й полосе бетона и j -м стержне арматуры.
4. Зная относительные деформации определить по диаграммам деформирования (4), (5), (6) для бетона и диаграмме Прандтля для арматуры величину нормальных напряжений в i -й полосе бетона и j -м стержне арматуры.
5. Рассчитать значения продольной силы $N_{z,calc}$ и изгибающего момента $M_{x,calc}$ по выражениям (1).
6. Проверить равенство заданных значений N_z и M_x и рассчитанных значений $N_{z,calc}$ и $M_{x,calc}$. Если условие равенства выполняется с заданной точностью, перейти к расчёту наклонного сечения 2, если нет – рассчитать секущие модули упругости по выражениям (7) и повторить расчётную процедуру, начиная с шага 3. Продолжать расчёт, пока не будут выполняться условия $N_z = N_{z,calc}$ и $M_x = M_{x,calc}$.
7. Рассчитать величину касательных напряжений V_c в бетоне сжатой зоны над вершиной наклонной трещины по выражению (10).
8. Рассчитать угол сдвига γ в бетоне сжатой зоны над вершиной наклонной трещины по выражению (11), а из системы (12) – главные относительные деформации ε_1 и ε_2 .
9. Расчёт следует вести монотонно повышая (изменяя) величину N_z и M_x , пока не будет достигнута предельная величина каких-либо из относительных деформаций ε_1 , ε_2 , ε_x в бетоне или ε_s в арматуре.
10. Рассчитать предельную перерезывающую силу V_{Ed} по выражению (13).

2 Экспериментальные данные

Оценивание расчетной модели сопротивления срезу при продавливании выполнено, опираясь на экспериментальные данные доступной базы, включающей результаты испытаний образцов-плит с разными геометрическими, физико-механическими характеристиками и значениями предельных перерезывающих сил. В оценивании использовались взятые из доступных литературных источников данные для 250 экспериментальных образцов, испытанных зарубежными и отечественными авторами. Частично экспериментальные данные, использованные в оценке достоверности расчётной модели, приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Основные экспериментальные данные и результаты испытаний опытных образцов на сопротивление срезу при продавливании

№ п.п.	d , м	f_c' , МПа	E_c , МПа	ρ_l	f_y , МПа	E_s , МПа	V_{exp}
	1	2	3	4	6	7	8
1	0,2	89,2	51800	0,008	643	210000	0,965
2	0,2	86,7	42900	0,008	627	210000	1,021
3	0,194	81,4	37200	0,008	620	210000	0,889
4	0,2	87	41300	0,012	596	195000	1,041
5	0,198	90,2	43500	0,008	631	213000	0,944
...
25	0,098	97,2	43200	0,013	550	210000	0,362
26	0,098	41,4	35100	0,013	650	210000	0,286
27	0,098	83,2	41200	0,013	650	210000	0,405
28	0,1	55,7	36500	0,009	650	210000	0,341
29	0,1	32,5	32400	0,012	650	210000	0,244
...
125	0,082	16,6	25900	0,009	559	210000	0,245
126	0,082	9,1	21200	0,009	466	210000	0,162
127	0,082	12,9	23800	0,009	510	210000	0,215
128	0,08	16,3	25800	0,02	403	210000	0,239
129	0,082	9,1	21200	0,013	373	210000	0,152
...
212	0,0808	52,08	45165	0,0147	400	200000	0,2429
213	0,0394	52,88	45566,9	0,0396	400	200000	0,0766
214	0,078	52,88	45566,9	0,0396	400	200000	0,2754
215	0,02	47,94	43085,1	0,0358	400	200000	0,0225
216	0,0394	47,94	43085,1	0,0329	400	200000	0,0787

3 Оценка достоверности расчетной модели

Статистические параметры ошибки моделирования были определены согласно процедуре, описанной в приложении Д к ТКП EN 1990 [5]. Качество модели определяли оценочными статистическими параметрами отношений экспериментальных и расчетных значений перерезывающих сил V_{exp} / V_{calc} : оценочным средним, максимальным и минимальным значениями, коэффициентом вариаций, а также коэффициентом корреляции r_{ik} фактических экспериментальных и расчетных значений сопротивления срезу при продавливании (таблица 2).

Распределение отношений расчётных и экспериментальных значений перерезывающих сил V_{calc} / V_{exp} приведено на рисунке 3.

Таблица 2 – Сравнительные статистические параметры отношений расчетных и экспериментальных значений перерезывающих сил V_{calc} / V_{exp}

Результаты	Min	Среднее	Max	C_v , %	b	V_δ , %	r_{ik}
	2	3	4	5	6	7	8
Модель	0,489	0,96	1,66	21,9	0,846	22	0,964

Min, среднее, *max* – соответственно минимальное, среднее и максимальное значения отношений V_{calc} / V_{exp} ; C_v – коэффициент вариации отношений V_{calc} / V_{exp} ; b – поправочный коэффициент для среднего значения отношений V_{calc} / V_{exp} ; V_δ – коэффициент вариации для вектора ошибок δ отношений V_{calc} / V_{exp} ; r_{ik} – коэффициент корреляции экспериментальных V_{exp} и расчётных V_{calc} перерезывающих сил.

Анализируя результаты статистического исследования, приведенные в таблице 2 и на рисунке 3, можно отметить, что в среднем модель консервативна и даёт запас в пределах 5 % (среднее значение отношений V_{calc} / V_{exp} составляет 0,96). При относительно высоком уровне корреляции расчётных и экспериментальных значений

перерезывающих сил (коэффициент корреляции r_{ik} близок к единице и составляет 0,964) и невысоких коэффициентах вариации C_V отношений V_{calc} / V_{exp} и коэффициентах вариации вектора ошибок V_{δ} , составивших по 22 %, модель даёт достаточно большой разброс отношений V_{calc} / V_{exp} относительно их среднего значения, составляющий около 100 % во всём диапазоне по ширине разброса. При этом для перерезывающих сил в диапазоне до 0,6 МН модель более безопасна (около 65% отношений V_{calc} / V_{exp} меньше единицы), чем в диапазоне значений, превышающих 0,6 МН.

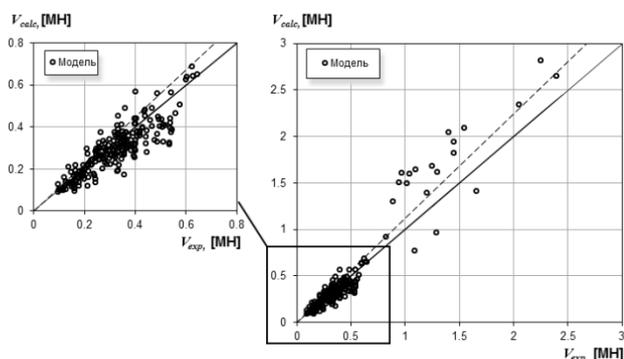


Рисунок 3 – Соотношение расчётных V_{calc} и экспериментальных V_{exp} значений перерезывающих сил

Следует отметить, что причины большого разброса данных могут заключаться как в недостатках самой модели, так и в неточностях, относящихся к данным экспериментальных исследований из-за неточностей интерпретаций, изложений, передачи через литературные источники.

Из рисунка 4 следует, что в среднем наиболее точные расчётные значения сопротивления срезу при продавливании получены для элементов с рабочей высотой плиты d , изменяющейся в пределах 0,1–0,15 м, с коэффициентом армирования ρ_l , изменяющимся в пределах 0,007–0,017 м, и со средней прочностью бетона f_{cm} , изменяющейся в пределах 25–35 МПа. Также можно отметить, что при увеличении рабочей высоты плит d в пределах от 0,15 м до 0,28 м, превышение расчётных значений перерезывающих сил V_{calc} над экспериментальными значениями V_{exp} изменяется в среднем в диапазоне от 0 % до 25 %. При изменении средней прочности бетона при осевом сжатии f_{cm} в пределах от 35 МПа до 120 МПа превышение V_{calc} над V_{exp} составляет 0–50 %. А при изменении коэффициента продольного армирования ρ_l в пределах от 0,017 до 0,052 отмечается снижение V_{calc} относительно V_{exp} в среднем в диапазоне от 0 % до 18–20 %.

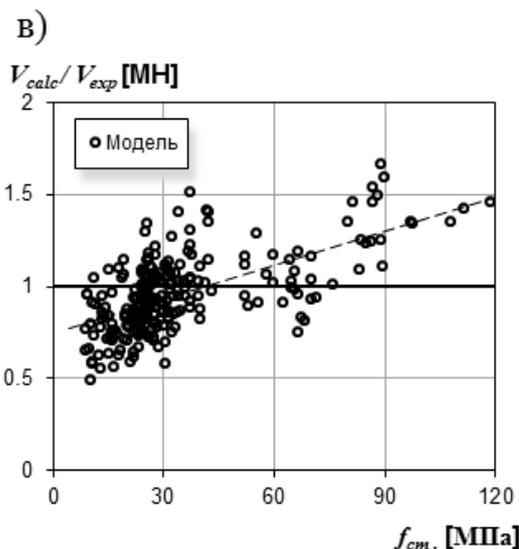
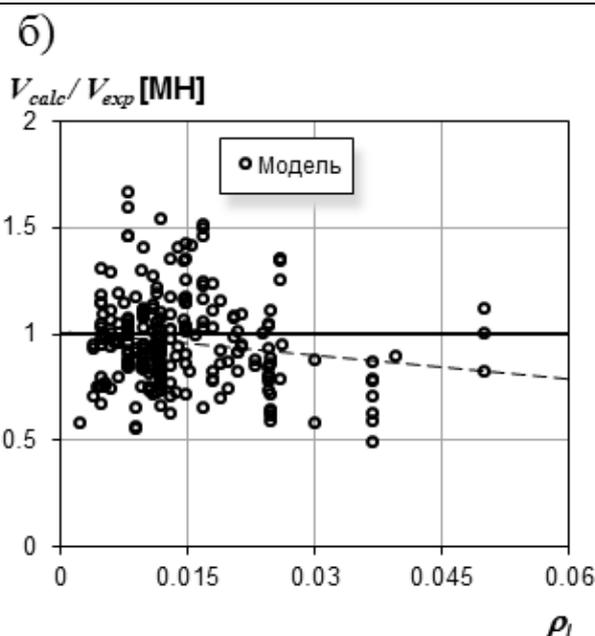
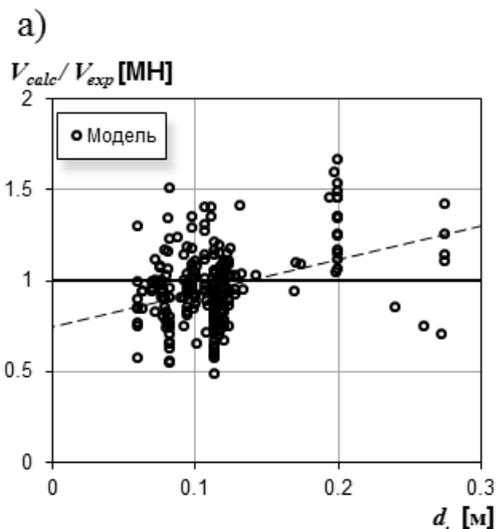


Рисунок 4 – Изменение отношений расчётных и экспериментальных значений сопротивления срезу при продавливании V_{calc} / V_{exp} в зависимости от величины рабочей высоты плиты d (а), коэффициента продольного армирования ρ_l (б) и средней прочности бетона при осевом сжатии f_{cm} (в)

Наименее точные значения расчётных перерезывающих сил рассматриваемая модель показывает при рабочей высоте d меньше 0,07 м, а также при одновременно рабочей высоте d , превышающей 0,2 м, и высокой средней прочности бетона f_{cm} , превышающей 60 МПа.

Заключение

Несмотря на указанные несовершенства, рассматриваемая расчётная модель показывает неплохое совпадение расчётных и экспериментальных значений перерезывающих сил, которое по статистическим оценочным параметрам, приведенным в таблице 2 настоящей работы, не уступает моделям сопротивления срезу при продавливании, принятым в действующих нормативных документах или в проектах нормативных документов [6–8], а также широко известной модели сопротивления срезу при продавливании, базирующейся на положениях модифицированной теории полей сжатия [1, 2]. Детальный сравнительный анализ моделей [1–2, 6–8] приведен в работе [3].

При этом рассматриваемая в данной работе расчётная модель базируется на уравнениях механики, обладает большим физическим смыслом и целесообразностью применения в сравнении с моделями [6–8], а также в дальнейшем может быть усовершенствована.

Список цитированных источников

1. Vecchio, F. J. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear / F. J. Vecchio, M. P. Collins // ACI Journal Proceedings. – 1986. – Vol. 83, iss. 2. – P. 219–231.
2. Тур, В. В. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил / В. В. Тур, А. А. Кондратчик // Брест : БрГТУ, 2000. – 400 с.
3. Молош, В. В. Сопrotivlenie srezu pri prodavlivanii samonapryazhenных плоских железобетонных элементов без поперечного армирования : дис. ... канд. тех. наук : 01.07.14 / В. В. Молош. – Брест, 2014. – 226 л.
4. Блещик, Н. П. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчёта и конструирования : учеб. пособие / Н. П. Блещик, Д. Д. Жуков, Д. Н. Лазовский ; под ред. проф. Т.М. Пецольда и проф. В. В. Тура. – Брест : БрГТУ, 2003. – 380 с., с ил.
5. Основы проектирования строительных конструкций = Основы проектирования будаунічных канструкцый : ТКП EN 1990-2011. – Введ. 15.11.2012. – Минск : CEN/TC 250 «Конструкционные Еврокоды» : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. – 70 с.
6. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий = Праектаванне жалезабетонных канструкцый. Частка 1-1. Агульныя правілы і правілы для будынкау : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 10.12.2009. – Минск : CEN/TC 250 «Еврокоды конструкций» : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 207 с.
7. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures : prEN 1992-1-1:2018 Eurocode 2. – Final draft of April 2018 by the Project Team SC2.T1 working on Phase 1 of the CEN/TC 250 work programme under Mandate M/515. – 293 p.
8. fib Model Code for Concrete Structures 2010. – Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland, 2013. – 432 p.

References

1. Vecchio, F. J. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear / F. J. Vecchio, M. P. Collins // ACI Journal Proceedings. – 1986. – Vol. 83, iss. 2. – P. 219–231.
2. Tur, V. V. Raschet zhelezobetonnih konstrukcij pri dejstvii pere-rezyvayushchih sil / V. V. Tur, A. A. Kondratchik // Brest : BrGTU, 2000. – 400 s.
3. Molosh, V. V. Soprotivlenie srezu pri prodavlivanii samonapryazhenных плоских zhelezobetonnih elementov bez poperechnogo armirovaniya : dis. ... kand. tekh. nauk : 01.07.14 / V. V. Molosh. – Brest, 2014. – 226 l.
4. Bleshchik, N. P. Zhelezobetonnnye konstrukcii. Osnovy teorii, raschyota i konstruirovaniya : ucheb. posobie / N. P. Bleshchik, D. D. Zhukov, D. N. Lazovskij ; pod red. prof. T. M. Pecol'da i prof. V. V. Tura. – Brest : BrGTU, 2003. – 380 s., s il.
5. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij = Asnovy praektavannya budaunichyh kanstrukcyj : TKP EN 1990-2011. – Vved. 15.11.2012. – Minsk : CEN/TS 250 «Konstrukcionnye Evrokody» : Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 2011. – 70 s.
6. Proektirovanie zhelezobetonnih konstrukcij. CHast' 1-1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy = Praektavanne zhelezabetonnyh kanstrukcyj. Chastka 1-1. Agul'nyya pravily i pravily dlya budynkau : TKP EN 1992-1-1-2009. – Vved. 10.12.2009. – Minsk : CEN/TS 250 «Evrokody konstrukcij» : Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 2009. – 207 s.
7. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures : prEN 1992-1-1:2018 Eurocode 2. – Final draft of April 2018 by the Project Team SC2.T1 working on Phase 1 of the CEN/TC 250 work programme under Mandate M/515. – 293 p.
8. fib Model Code for Concrete Structures 2010. – Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland, 2013. – 432 p.

Материал поступил в редакцию 01.07.2022

ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Никитин¹, С. К. Никитин²

¹ Д. т. н., профессор, профессор кафедры теоретической механики
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: nik_ol40@mail.ru
² Студент факультета электронно-информационных систем
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: sniki@protonmail.com

Реферат

С помощью теории обобщенной проводимости и геометрического моделирования структуры влажных капиллярно-пористых материалов получены зависимости для расчета их эффективной теплопроводности. В зависимости от значений влагосодержания пор установлены границы применения полученных формул. На примерах для глиняного кирпича продемонстрированы особенности расчета влажных капиллярно-пористых материалов. Установлено, что результаты расчетов достаточно точно предсказывают опытные данные.

Ключевые слова: эффективная теплопроводность, газосиликатные материалы, бимодальное распределение размеров пор, моделирование структуры влажного материала, теория обобщенной проводимости.

DEPENDENCIES FOR CALCULATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF WET CAPILLARY-POROUS WALL MATERIALS

V. I. Nikitin, S. K. Nikitin

Abstract

Using the theory of generalized conductivity and geometric modeling of the structure of wet capillary-porous materials, dependencies were obtained for calculating their effective thermal conductivity. Depending on the values of the moisture content of the pores, the limits of application of the obtained formulas are established. On examples for clay bricks, the features of the calculation of wet capillary-porous materials are demonstrated. It has been established that the results of calculations quite accurately predict the experimental data.

Keywords: Effective thermal conductivity, gas silicate materials, bimodal pore size distribution, wet material structure modeling, theory of generalized conductivity.

Введение

Результаты многочисленных натурных исследований, например [1–4], показывают, что влагосодержание Ψ капиллярно-пористых материалов наружных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий часто в разы превышает значения, принимаемые при проектировании этих конструкций. Повышенное влагосодержание материалов ограждающих конструкций приводит к снижению показателей их технического состояния. Прежде всего снижается теплоизолирующая способность ограждений, для прогнозирования которой нужно знать значения теплопроводности используемых материалов в зависимости от их влагосодержания, а также характера распределения влаги по объёму, меняющегося с изменением угла смачивания. Теплопроводность одного и того же материала с одинаковым влагосодержанием может в зависимости от распределения влаги в материале отличаться в несколько раз [5]. По этой и другим причинам, упомянутым в работах [5–7], экспериментальная оценка теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов не всегда даёт удовлетворительные результаты. Поэтому необходимо развивать инженерные методы расчёта теплопроводности материалов, основанные на математическом моделировании совместных процессов тепло- и влагопереноса.

Для этого, как и ранее [7], влажные капиллярно-пористые материалы будем рассматривать как неоднородные трёхкомпонентные системы, состоящие из твёрдого скелета 1, газа (паровоздушная смесь) 2 и жидкости 3. При построении зависимостей для определения эффективной теплопроводности таких систем использовались методы обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры [5].

Жидкость и газ в поровом пространстве твёрдого скелета модели представлялись как бинарная система, структура которой зависит от влагосодержания, определяемого из отношения влагосодержания Ψ к пористости P материала $\Psi_p = \Psi P$. Для выяснения вида структуры

бинарной системы нужно определить соотношение между фактическим Ψ_p и некоторыми граничными значениями Ψ_p' и Ψ_p'' ($\Psi_p < \Psi_p'$), при которых происходит переход от одной структуры к другой. Грубая оценка граничных значений Ψ_p' и Ψ_p'' может быть выполнена по графикам, приведенным в [5] и построенным только для одного значения пористости материала $P \approx 0,72$. Более точная оценка этих значений рассмотрена нами в [7,8]. Если установлено соотношение $\Psi_p' \leq \Psi_p$, то включения жидкости являются изолированными. При $\Psi_p' \leq \Psi_p \leq \Psi_p''$ жидкость становится непрерывной компонентой бинарной системы. И наконец, при $\Psi_p = \Psi_p''$ непрерывное распределение паровоздушной смеси сменится на распределение в виде изолированных включений в центре ячеек.

Расчёт эффективной теплопроводности материала во всём диапазоне изменения влагосодержания может быть выполнен методом последовательного приведения трёхкомпонентной системы к бинарной [5]. Согласно этому методу вначале рассматривается бинарная система, состоящая из газа и жидкости (поровое пространство), а затем следующая бинарная система из твёрдого скелета и порового пространства. При этом конечный результат расчёта будет зависеть от последовательности рассматриваемых компонентов. Другой недостаток заключается в том, что теплопроводность бинарной системы из паровоздушной смеси и жидкости предлагается определить по формулам, полученным при условии, что угол смачивания $\theta = 0^\circ$. Известно [8, 9], что идеальное смачивание не характерно для пористых строительных материалов и $\theta > 0^\circ$.

Упомянутые недостатки приводят к существенным погрешностям при расчётах [7], для устранения которых следует использовать более обоснованный подход, одновременно учитывающий теплопроводности и объёмные концентрации всех трёх компонент при углах смачивания θ от 0° до 90° . С помощью данного подхода были

получены зависимости для определения эффективной теплопроводности материала для структур с изолированными и непрерывными включениями жидкости [7]. Однако при влагосодержании пор Ψ_p и Ψ_p'' не обеспечивался плавный переход от одной структуры к другой, что приводило к погрешностям в расчётах. В данной работе построены дополнительные зависимости, позволяющие выполнить расчёт эффективной теплопроводности капиллярно-пористых материалов во всём возможном диапазоне изменения влагосодержания пор и устранить недостатки работы [7]. Рассмотрены особенности расчёта теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов, которые продемонстрированы на примерах с использованием опытных данных для образцов стеновой керамики.

Зависимости для определения эффективной теплопроводности влажных пористых материалов с замкнутыми газовыми включениями

В случае замкнутых газовых включений модель реальной структуры влажного пористого материала для восьмой части элементарной ячейки имеет вид, приведенный на рисунок 1, а и построенной с учетом допущений теории обобщенной проводимости [5]. Через рассматриваемую элементарную ячейку параллельно её боковым граням проходит общий тепловой поток G , состоящий из взаимосвязанных потоков $G_1 \dots G_4$, протекающих через её отдельные участки, суммарная площадь которых $S = L^2$.

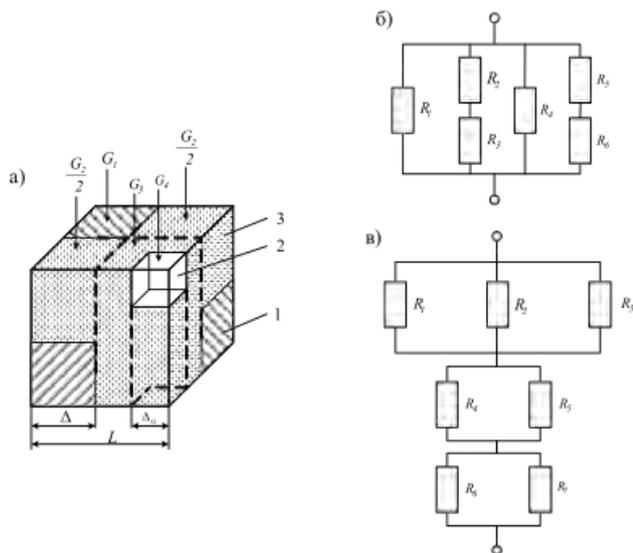


Рисунок 1 – Восьмая часть элементарной ячейки с изолированным включением газа и составляющими общего теплового потока $G_1 \dots G_4$ (а); схема соединения сопротивлений отдельных участков при адиабатическом (б) и изотермическом (в) делении элементарной ячейки 1, 2, 3 – твердая, газовая и жидкая компоненты соответственно

Рассмотрим вывод зависимости для определения эффективной теплопроводности λ_a данной элементарной ячейки при её делении бесконечно тонкими адиабатическими плоскостями параллельными потоку тепла G и непроницаемыми для линий тока. В результате объём элементарной ячейки оказался разбитым на 8 однородных частей (элементов). Термическое сопротивление i -го элемента вычисляется по формуле

$$R_i = \frac{l_i}{\lambda_i S_i}, \tag{1}$$

где l_i – длина линий тока (высота) i -й части, м;
 λ_i – коэффициент теплопроводности i -й части, Вт/(м·К);
 S_i – площадь поперечного сечения i -й части, м².

Тепловой поток G_1 проходит элемент твердого скелета, имеющий длину $l_1 = L$, поперечное $S_1 = \Delta^2$ и теплопроводность λ_1 . Согласно формуле (1) имеем сопротивление

$$R_1 = \frac{L}{\lambda_1 \Delta^2}. \tag{2}$$

Тепловой поток G_2 с поперечным сечением $S_2 = 2\Delta(L - \Delta)$ проходит через жидкую и твердую компоненты с сопротивлениями

$$R_2 = \frac{L - \Delta}{\lambda_3 2\Delta(L - \Delta)}, R_3 = \frac{\Delta}{\lambda_1 2\Delta(L - \Delta)}. \tag{3}$$

Тепловой поток G_3 с поперечным сечением $S_3 = (L - \Delta)^2 - \Delta_f^2$ проходит только через жидкую компоненту с сопротивлением

$$R_4 = \frac{L}{\lambda_3 [(L - \Delta)^2 - \Delta_f^2]}. \tag{4}$$

И наконец, тепловой поток G_4 с поперечным сечением $S_4 = \Delta_f^2$ проходит газовую и жидкую компоненты с сопротивлениями

$$R_5 = \frac{\Delta_f}{\lambda_2 \Delta_f^2}, R_6 = \frac{L - \Delta_f}{\lambda_3 \Delta_f^2}. \tag{5}$$

Схема соединения сопротивлений элементарной ячейки приведена на рисунке 1б. В этом случае общее термическое сопротивление элементарной ячейки R определяется следующим образом:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5 + R_6}. \tag{6}$$

Общее термическое сопротивление того же объема $V = L^3$, заполненного однородным веществом с теплопроводностью λ_a , находим по формуле

$$R = \frac{L}{\lambda_a L^2} = \frac{1}{\lambda_a L}. \tag{7}$$

Переписав формулу (6) с учетом (7) и (2) – (5) после несложных преобразований, получим зависимость для определения эффективной теплопроводности трехкомпонентной системы, газовая компонента которой является замкнутой, при адиабатическом делении элементарной ячейки

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_1} = c^2 + \frac{2v_2 c(1-c)}{1-c+v_2 c} + v_2 [(1-c)^2 - c_f^2] + \frac{v_1 v_2 c_f^2}{v_2 c_f + v_1(1-c_f)}, \tag{8}$$

где $c = \Delta/L, c_f = \Delta_f/L, v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1$.

Далее покажем вывод зависимости для определения эффективной теплопроводности той же трёхкомпонентной системы при изотермическом делении элементарной ячейки. Элементарную ячейку, приведенную на рисунке 1а, поделим двумя плоскостями перпендикулярными общему тепловому потоку, на три слоя различной толщины. Толщина первого (верхнего) слоя равна $h_1 = \Delta_f$, второго (среднего) слоя $h_2 = L - \Delta - \Delta_f$, третьего (нижнего) слоя $h_3 = \Delta$. В каждом слое компоненты разделены адиабатическими плоскостями, параллельными общему потоку тепла. В результате первый слой состоит из трех элементов, второй и третий слои из двух элементов, термическое сопротивление которых можно определить по формуле (1).

Для первого слоя получим следующие сопротивления:

$$R_1 = \frac{\Delta_r}{\lambda_1 \Delta^2}, R_2 = \frac{\Delta_r}{\lambda_2 \Delta_r^2}, R_3 = \frac{\Delta_r}{\lambda_3 (L^2 - \Delta^2 - \Delta_r^2)}. \quad (9)$$

Для второго слоя имеем следующие два сопротивления:

$$R_4 = \frac{L - \Delta - \Delta^2}{\lambda_1 \Delta^2}, R_5 = \frac{L - \Delta - \Delta^2}{\lambda_3 (L^2 - \Delta^2)}. \quad (10)$$

Два сопротивления имеем и для третьего слоя:

$$R_6 = \frac{\Delta}{\lambda_1 [L^2 - (L - \Delta)^2]}, R_7 = \frac{\Delta}{\lambda_3 (L - \Delta)^2}. \quad (11)$$

Схема соединения термических сопротивлений трёх слоёв элементарной ячейки показана на рисунке 1с. Для такой схемы общее термическое сопротивление элементарной ячейки R можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{R} = \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} \right)^{-1} \right]^{-1}. \quad (12)$$

После подстановки сопротивлений, определяемых по формулам (9) – (11), в соотношение (12) и учета формулы (7) получим зависимость для определения эффективной теплопроводности λ_u трехкомпонентной системы при изотермическом делении элементарной ячейки, показанной на рисунке 1а.

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_1} = \left[\frac{c_r}{c^2 + v_1 c^2 + v_2 (1 - c^2 - c^2)} + \frac{1 - c - c_r}{c^2 + v_2 (1 - c^2)} + \frac{c}{c(2 - c) + v_2 (1 - c)^2} \right]^{-1}, \quad (13)$$

где, как и в формуле (8), $c = \Delta/L, c_r = \Delta_r/L, v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1$.

При известной объёмной концентрации твердого скелета m_1 значение c можно определить по формуле [10]

$$c = 0,5 + \sin \left[\frac{\arcsin(2m_1 - 1)}{3} \right]. \quad (14)$$

С другой стороны, если известно значение c , то можно определить m_1 [10]

$$3c^2 - 2c^3 = m_1, \quad (15)$$

а также пористость материала

$$P = 1 - m_1 = 1 - 3c^2 + 2c^3. \quad (16)$$

Что же касается значения c_r , то здесь необходимо показать схему его расчета. При известном значении c и угле смачивания θ , определяем граничное значение влагосодержания пор ψ_P'' , используя результаты работы [7]. Если угол смачивания неизвестен, то на основе данных для кварцевого песка, песчаника [9] и полимера [8] его можно принимать равным 45° . Например, используя формулу (6) работы [7], при $\theta = 45^\circ$ и $c = 0,5$ получим $\psi_P'' = (5 + 13c)/[6(1 + 2c)] = 0,9583$. Тогда объёмная концентрация замкнутых включений газа в порах равна $1 - \psi_P'' = 0,0417$ и соответственно в материале

$m_{2r} = (1 - \psi_P'')P = 0,02135$. По определению

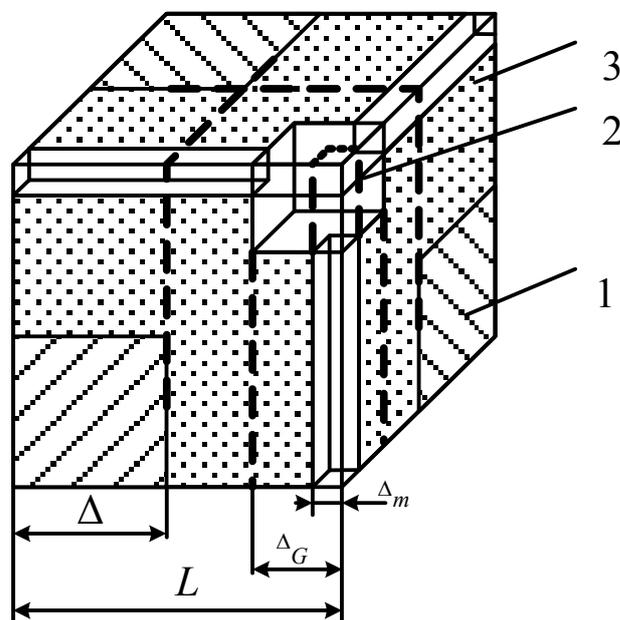
$c_r = \sqrt[3]{m_{2r}} = 0,2774$. С уменьшением угла смачивания θ значение c_r увеличивается. Так при $\theta = 0^\circ$ и $c = 0,5$ имеем $c_r = 0,4029$. Отметим, что при $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ и $0 < c < 1$ имеет место неравенство $c_r < 1 - c$.

Расчёты по формулам (8) и (13) дают нижнюю λ_a и верхнюю λ_u оценки эффективной теплопроводности влажного пористого материала, а её истинное значение целесообразно определять как среднее арифметическое $\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_u)$.

Далее рассмотрим вывод формулы для случая одновременной непрерывности газовой и жидкой компонент с взаимосвязанными структурами, который характеризуется влагосодержанием пор ψ_P между двумя граничными значениями $\psi_P' \leq \psi_P \leq \psi_P''$. При этом возможны два независимых подхода. При первом подходе в качестве основной задаётся структура газовой компоненты, а при втором – структура жидкой компоненты.

Теплопроводность трехкомпонентной системы с заданной структурой газовой компоненты

Данный случай в виде восьмой части элементарной ячейки представлен на рисунке 2. При выводе зависимостей принято, что размер $\Delta_r = c_r L$, найденный для замкнутого газового включения в центре ячейки, с увеличением объёмной концентрации газа $m_2 > m_{2r}$ не меняется ($c_r = \text{const}$). Тогда прирост m_2 приводит к увеличению только размера Δ_m поровых каналов, соединяющих поры размера Δ_r в центре ячеек. При этом должно выполняться условие $\Delta_m \leq \Delta_r$.



1, 2, 3 – твердая, газовая и жидкая компоненты

Рисунок 2 – Восьмая часть элементарной ячейки с заданной структурой непрерывной газовой компоненты

После деления элементарной ячейки, показанной на рисунке 2, адиабатическими плоскостями и реализации процедуры, использованной при вводе формулы (8), была получена зависимость для определения эффективной теплопроводности λ_a (нижняя оценка) трехкомпонентной системы с непрерывными включениями газовой компоненты заданной структуры

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_1} = c^2 + \frac{2v_2c(1-c-c_m)}{1-c+v_2c} + v_2 \left[(1-c-c_m)^2 - (c_r-c_m)^2 \right] + \frac{2v_1v_2cc_m}{v_2c_m+v_1(1-c-c_m)+v_1v_2c} + \frac{2v_1v_2c_m(1-c-c_r)}{v_1(1-c_m)+v_2c_m} + \frac{v_1v_2(c_r^2-c_m^2)}{v_1(1-c_r)+v_2c_r} + v_1c_m^2, \quad (17)$$

где $v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1, c = \Delta/L, c_r = \Delta_r/L, c_m = \Delta_m/L$.

После деления той же элементарной ячейки изотермическими плоскостями на четыре слоя и определения тепловых сопротивлений каждого слоя, а также преобразований, как при выводе формулы (13),

получим зависимость для определения эффективной теплопроводности λ_u (верхняя оценка) рассматриваемой трехкомпонентной системы

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_1} = \left[\frac{c_m}{c^2 + v_1[c_r^2 + 2c_m(1-c_r)] + v_2[1-c^2 - c_r^2 - 2c_m(1-c_r)]} + \frac{c_r - c_m}{c^2 + v_1c_r^2 + v_2(1-c^2 - c_r^2)} + \frac{1-c-c_r}{c^2 + v_1c_m^2 + v_2(1-c^2 - c_m^2)} + \frac{c}{c(2-c) + v_1c_m^2 + v_2[1-c(2-c) - c_m^2]} \right]^{-1}, \quad (18)$$

где, как и в формуле (17), $v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1, c = \Delta/L, c_r = \Delta_r/L, c_m = \Delta_m/L$.

Определим значение c_m при известной объемной концентрации газа $m_2 \geq c_r^3$. Из рисунка 2 следует, что объем поровых каналов равен $V_m = 3\Delta_m^2(L - \Delta_r)$. С другой стороны этот же объем равен $V_2 - \Delta_r^3$, где V_2 – общий объем газа в ячейке. После деления этих объемов на объем ячейки $V = L^3$ приходим к уравнению

$$3c_m^2(1-c_r) = m_2 - c_r^3, \quad (19)$$

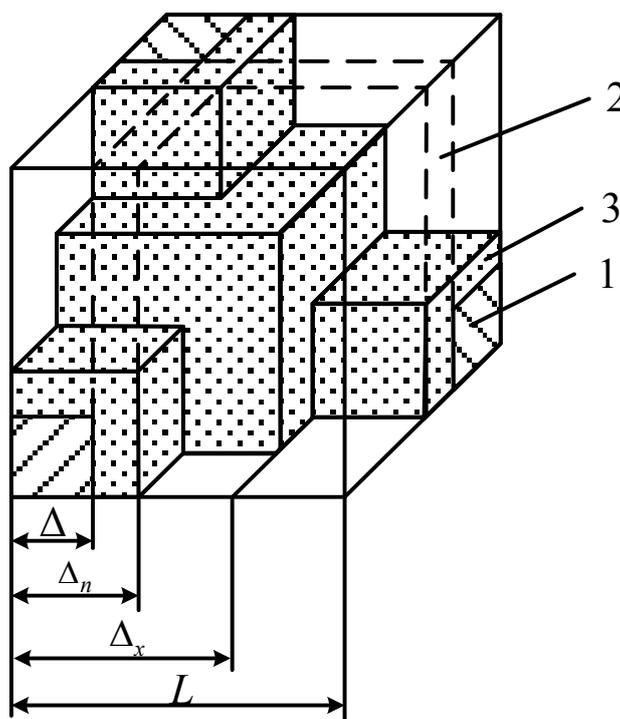
решая которое, находим значение c_m .

Согласно формуле (19) при $m_2 = c_r^3$ имеем $c_m = 0$. Это свидетельствует об исчезновении поровых каналов, соединяющих поры в центре ячеек, и формулы (17) и (18) приобретают вид, который

имеют формулы (8) и (13). В таком случае формулы (17) и (18) обеспечивают переход от структуры с непрерывными включениями газа (рисунок 2) к структуре с изолированными включениями газа (рисунок 1).

Теплопроводность трехкомпонентной системы с заданной структурой жидкой компоненты

В данном случае элементарная ячейка имеет вид, представленный на рисунке 3. Для рассмотренной элементарной ячейки описанным выше способом были получены зависимости для определения нижней λ_a и верхней λ_u оценок эффективной теплопроводности влажных пористых материалов.



1,2,3 – твердая, газовая и жидкая компоненты

Рисунок 3 – Восьмая часть элементарной ячейки с заданной структурой непрерывной жидкой компоненты

При делении элементарной ячейки (рисунок 3) адиабатическими плоскостями пришли к зависимости

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_a}{\lambda_1} = & c^2 + v_2(c_n - c)^2 + \frac{2v_2c(c_n - c)}{1 - c + v_2c} + \\ & + \frac{2v_1v_2c(c_x - c_n)}{v_2(1 - c_x) + v_1(c_x - c) + v_1v_2c} + \frac{2v_1v_2(c_x - c_n)(c_n - c)}{v_2(1 - c_x) + v_1c_x} + \\ & + \frac{v_1v_2(c_x - c_n)^2}{v_2(1 - c_x) + v_1c_x} + \frac{2v_1v_2c(1 - c_x)}{v_2(1 - c_n) + v_1(c_n - c) + v_1v_2c} + \\ & + \frac{2v_1v_2(c_n - c)(1 - c_x)}{v_2(1 - c_n) + v_1c_n} + v_1[(1 - c_n)^2 - (c_x - c_n)^2], \end{aligned} \quad (20)$$

где $v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1, c = \Delta/L, c_n = \Delta_n/L, c_x = \Delta_x/L$.

Зависимость, полученная при делении той же элементарной ячейки изотермическими плоскостями, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_u}{\lambda_1} = & \left[\frac{1 - c_x}{c^2 + v_2(c_n^2 - c^2) + v_1(1 - c_n^2)} + \frac{c_x - c_n}{c^2 + v_2(c_x^2 - c^2) + v_1(1 - c_x^2)} + \right. \\ & + \frac{c_n - c}{c^2 + v_2[2c_n(1 - c_x) + (c_x^2 - c^2)] + v_1[(1 - c_n)^2 - (c_x - c_n)^2]} + \\ & \left. + \frac{c}{c(2 - c) + v_2[2(c_n - c)(1 - c) - (c_n - c)^2 + (c_x - c_n)^2] + v_1[(1 - c_n)^2 - (c_x - c_n)^2]} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (21)$$

где, как и в формуле (20), $v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1, c = \Delta/L, c_n = \Delta_n/L, c_x = \Delta_x/L$.

Значение c_x связано с объёмом жидкости в узле решётки твердого скелета элементарной ячейки $V_y = \psi_y L^3$. Влагосодержание материала в узле решётки ψ_y определяется из условия, что влагосодержание пор равно нижнему граничному значению ψ'_p . Тогда получим $\psi_y = \psi'_p P$. Из рисунка 3 видно, что объём жидкости в узле решетки равен $(\Delta_x - \Delta)^3 + 3\Delta(\Delta_x - \Delta)^2 = \psi_y L^3$. Разделив левую и правую части этого выражения на объём элементарной ячейки $V = L^3$ и обозначив $c_x - c = d$, получим кубическое уравнение

$$d^3 + 3cd^2 = \psi_y, \quad (22)$$

решая которое определим физически оправданный корень $d = c_x - c$ (при известном значении $c = \Delta/L$) и, следовательно, значение c_x .

В соответствии с теорией протекания [5] принимаем, что с повышением общего влагосодержания материала $\psi > \psi_y$ влагосодержание в узле решетки ψ_y не меняется ($c_x = const$).

При известной разнице $(\psi - \psi_y)$ можно определить значение $c_n = \Delta_n/L$. Как видно из рисунка 3, объём жидкости $(\psi - \psi_y)L^3$, распределённой на длине $(L - \Delta_x)$ трёх стержней элементарной ячейки, равен $[(\Delta_n - \Delta) \cdot \Delta \cdot 2 + (\Delta_n - \Delta)] \cdot 3(L - \Delta_x) = 3(L - \Delta_x)(\Delta_n^2 - \Delta^2)$.

После деления этого равенства на объём ячейки $V = L^3$ приходим к квадратному уравнению с неизвестной c_n

$$3(1 - c_x)(c_n^2 - c^2) = \psi - \psi_y, \quad (23)$$

положительный корень которого даёт искомое значение c_n .

Если при расчёте по формуле (23) окажется, что $c_n > c_x$, то в этом случае при определении теплопроводности материала нужно использовать формулы (17) и (18).

Из формулы (23) следует, что при $\psi = \psi_y$ получим $c_n = c$. Тогда формулы (20) и (21) преобразуются к виду, который имеют формулы (23) и (28), представленные в [7] и описывающие структуру трехкомпонентной системы с изолированными включениями жидкости. Таким образом, формулы (20) и (21) обеспечивают плавный переход от структуры с непрерывными включениями жидкости к структуре с её изолированными включениями и наоборот. Кроме того, при отсутствии жидкой компоненты эти формулы приобретают вид, который имеют известные зависимости для системы с двумя взаимопроникающими компонентами [5] при адиабатическом

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_1} = c^2 + v(1 - c)^2 + 2vc(1 - c)(vc + 1 - c)^{-1} \quad (24)$$

и изотермическом

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_1} = \left[\frac{1 - c}{c^2 + v(1 - c^2)} + \frac{c}{c(2 - c) + v(1 - c)^2} \right]^{-1} \quad (25)$$

делении элементарной ячейки. Здесь $v = v_1 = \lambda_2/\lambda_1$.

Границы применения полученных формул

При установлении границ применения полученных формул будем использовать зависимость влагосодержания пор ψ_P от граничных значений ψ'_P и ψ''_P в следующем виде:

$$\psi_P = K(\psi'_P + \psi''_P), \quad (26)$$

где K – коэффициент, изменяющийся в пределах нижней $K_H = \psi'_P / (\psi'_P + \psi''_P)$ и верхней $K_B = \psi''_P / (\psi'_P + \psi''_P)$ границ. Очевидно, что $K_H + K_B = 1$.

Согласно принятым допущениям формулы (20) и (21), можно использовать при значениях коэффициента K от нижней границы K_H до некоторого K_m , при котором $C_n = C_x$. Нетрудно предположить, что результаты расчёта теплопроводности по формулам (20) и (21) будут отличаться от результатов, полученных по формулам (17) и (18), так как первые пренебрегают наличием газовой компоненты в центре элементарной ячейки, а вторые не учитывают неравномерное распределение жидкой компоненты. Представляло интерес определить значение K_m , до которого можно использовать формулы (20) и (21), и при этом K_m сравнить результаты, полученные по формулам (20), (21) и (17), (18). Аналогичные сравнения выполнить и при других значениях K из диапазона $K_H \leq K \leq K_B$. Для выяснения, сказанного по упомянутым формулам, были выполнены расчёты.

Эти расчёты были реализованы с использованием трёхкомпонентной системы с постоянной объёмной концентрацией твёрдого скелета $m_1 = 0,5$ ($c = 0,5, P = 1 - m_1 = 0,5$) и теплопроводностью $\lambda_1 = 1,0 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$. Теплопроводность газовой $\lambda_2 = 0,03 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$ и жидкой $\lambda_3 = 0,6 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$ компонент также были постоянными, а их концентрации изменялись в зависимости от влагосодержания системы. Угол смачивания θ на основе данных работ [8] и [9] был принят равным 45° .

Вначале определим граничные значения влагосодержания по ψ'_P и ψ''_P при угле смачивания $\theta = 45^\circ$.

Согласно [8]

$$\psi'_P = (1 - 8c) / [6(1 + 2c)] = 0,4167. \quad (27)$$

В соответствии с [7]

$$\psi''_P = (5 + 13c) / [6(1 + 2c)] = 0,9583. \quad (28)$$

Затем вычислим влагосодержание в узле ячейки $\psi_y = \psi'_P P = 0,20835$. Из решения кубического уравнения (22) нашли значение $c_x = 0,8368$. Задав K из диапазона $K_H \leq K \leq K_B$, по уравнению (26) вычислим влагосодержание пор ψ_P , по которому определим концентрацию жидкой компоненты $m_3 = \psi_P P = \psi$, и далее по уравнению (23) определим C_n . Методом последовательных приближений подобрали $K_m = 0,6237$, при котором $C_n = C_x$ (точность 0,0001). При этом K_m найдены значения концентраций $m_3 = 0,4288$ и $m_2 = P - m_3 = 0,0712$. Далее по формулам (20) и (21) определили теплопроводность $\lambda_a = 0,6149 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_u = 0,7324 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$ и оценку эффективной теплопроводности трёхкомпонентной системы $\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_u) = 0,6736 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$.

При тех же концентрациях компонент по формулам (17) и (18) были найдены соответствующие теплопроводности

$\lambda_a = 0,6163 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_u = 0,7324 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$ и $\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_u) = 0,6858 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$. Последний результат для λ превышал предыдущий $\lambda = 0,6736 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$ на 1,77 %. Наименьшее превышение на 1,1 % наблюдалось при $K = 0,52$, а наибольшее оказалось на нижней границе $K = K_H = 0,303$ и составило 9,68 %. На верхней границе $K = K_B = 0,697$ относительная разница равна 2,22 %. К аналогичным выводам пришли после выполнения расчётов и при других значениях параметров c и θ . С физической точки зрения более точный результат при $K_H \leq K \leq K_m$ должны давать формулы (20) и (21). Формулы (17) и (18) можно использовать в довольно узком диапазоне коэффициентов K от K_m до K_B .

Подготовка исходных данных для расчёта и примеры расчёта

Для выполнения расчётов по полученным формулам необходимо знать объёмные концентрации компонент m_i и их теплопроводности λ_i . При известной плотности ρ и влагосодержании ψ материала, а также плотности твёрдого скелета ρ_s , которую можно определить с помощью пикнометрии, концентрации компоненты m_i определяются довольно просто: $m_1 = \rho / \rho_s$, $m_3 = \psi$ и $m_2 = 1 - m_1 - m_3$.

Теплопроводность воды $\lambda_3 \text{ Bm/(m}\cdot\text{K)}$, (жидкая компонента) легко найти по формуле, полученной путём аппроксимации данных [11]

$$\lambda_3 = 0,552 + 0,256 \cdot 10^{-2} t - 0,124 \cdot 10^{-4} t^2, \quad (29)$$

где t – температура, $^\circ\text{C}$.

Теплопроводность паровоздушной смеси λ_2 (газовая компонента) складывается из теплопроводности сухого воздуха λ_{air} и теплопроводности пара λ_v , вызванной диффузионным переносом пара в поровом пространстве. Первое слагаемое определяется по формуле [6]

$$\lambda_{air} = 0,0257 [1 + 0,003(t - 20)]. \quad (30)$$

Значение λ_v определяется по формуле [5], базирующейся на зависимости Кришера [12],

$$\lambda_v = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot \frac{P_{va}}{P_{va} - P_v} \cdot \frac{dP_v}{dt} q_t, \quad (31)$$

где D – коэффициент диффузии водяного пара в неподвижном воздухе, m^2/c ;

μ – коэффициент сопротивления диффузии пара через поровое пространство;

M – молекулярная масса водяного пара, кг/моль ;

R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж/(моль}\cdot\text{K)}$;

T – температура водяного пара, K ;

P_{va} – суммарное давление водяного пара и воздуха, Па ;

P_v – парциальное давление водяного пара, Па ;

q_t – удельная теплота парообразования при температуре t , Дж/кг .

При определении коэффициента диффузии водяного пара, обычно используют формулу [12, 13]

$$D = \frac{2,305 \cdot 10^{-5}}{\rho_{va}} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81}, \rho_0 = 101323 \text{ Па}, \quad (32)$$

предложенную Схирмером (R. Schirmer) в 1938 г.

Производную dp_v/dt можно определить с помощью справочных данных или по формуле [12]

$$\frac{dp_v}{dt} = \frac{2,44314 \cdot 10^6}{(234,175 + t)^2} \cdot \exp\left(\frac{17,08085t}{234,175 + t}\right), \quad (33)$$

$(0^\circ \leq t \leq 109,9^\circ\text{C})$.

Температурная зависимость удельной теплоты парообразования после аппроксимации справочных данных имеет вид:

$$q_t = (2,5 - 0,0024t) \cdot 10^6. \quad (34)$$

Коэффициент сопротивления диффузии пара μ при непрерывной газовой компоненте (рисунок 2, $m_2 > c_r^3$), согласно [8, 14], можно определить по формуле

$$\mu = \frac{m_2}{c_*^4}, \quad (35)$$

где c_* вычисляется по формуле (14), в которую вместо концентрации твёрдой компоненты m_1 подставляется концентрация газовой компоненты m_2 . Для замкнутых газовых включений (рисунок 1, $m_2 = c_r^3$) $\mu = 1,0$.

Теплопроводность твёрдой компоненты λ_{1v} в первом приближении можно определить с помощью зависимостей (24) и (25), в которых λ_a и $\lambda_{и}$ принимаются равными теплопроводности сухого материала λ_0 и затем методом итераций находятся значения теплопроводности твёрдого скелета при адиабатическом λ_1^a и изотермическом λ_1^u делении элементарной ячейки. Для последующих расчётов принимается среднее значение $\lambda_1 = 0,5(\lambda_1^a + \lambda_1^u)$.

Особенности расчёта эффективной теплопроводности влажного капиллярно-пористого материала по представленным формулам продемонстрируем на примере с использованием опытных данных, полученных нами для обыкновенного (полнотелого) глиняного кирпича.

Для трех образцов кирпича при температуре 20°C были определены следующие средние значения: плотность $\rho = 1640 \text{ кг/м}^3$, плотность твёрдого скелета $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$, влагосодержание в состоянии свободного водонасыщения $\psi_w = 0,291$, теплопроводность сухого материала $\lambda_0 = 0,74 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и влажного $\lambda_w = 1,107 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при ψ_w . Теплопроводность образцов материала определялась согласно норме PN-EN1745:2012.

С помощью этих данных определены объёмные концентрации компонент: твёрдой $m_1 = \rho/\rho_s = 0,6189$, жидкой $m_3 = \psi_w = 0,291$ и газовой $m_2 = 1 - m_1 - m_3 = 0,0901$. Теплопроводность твёрдой компоненты найдена упомянутым выше методом последовательных приближений и равнялась $\lambda_1 = 1,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Теплопроводность воды $\lambda_3 = 0,597 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ была вычислена по формуле (29). При определении теплопроводности газовой компоненты λ_2 нужно учитывать ее структурные особенности. В водонасыщенных материалах жидкость заполняет мелкие капиллярные поры, а оставшиеся крупные поры следует рассматривать как замкнутые включения паровоздушной смеси. Теплопроводность сухого воздуха $\lambda_{air} = 0,0257 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ вычислена по формуле (30). Теплопроводность пара $\lambda_v = 0,0705 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ найдена с помощью формул (31) — (34) при коэффициенте сопротивления диффузии пара через замкнутое поровое пространство

$$\mu = 1. \text{ Тогда } \lambda_2 = \lambda_{air} + \lambda_v = 0,0962 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К}).$$

Отметим, что в рамках принятой геометрической модели структуры материала с замкнутыми газовыми включениями (рисунок 1) при $m_2 = 0,0901$ геометрический параметр $c_e = \sqrt[3]{m_2} = 0,4483 > 1 - c$

и определить теплопроводность трехкомпонентной системы по формулам (8) и (13) нельзя. В этом особом случае теплопроводность трехкомпонентной системы с замкнутыми газовыми включениями определим с использованием двух последовательных бинарных систем [5,7]. В начале определяется теплопроводность бинарной системы, состоящей из твёрдого скелета и жидкости; затем определяется эффективная теплопроводность всего материала.

Имеем объёмные концентрации взаимопроникающих компонент первой бинарной системы: твёрдой $m_1 = m_1/(m_1 + m_3) = 0,6802$ и жидкой $m_1 = m_3/(m_1 + m_3) = 0,3198$, где $m_1 + m_2 = 0,9099$. При m_1 по формуле (14) определим геометрический параметр твёрдого скелета $c = 0,6225$ и отношение $v = \lambda_3/\lambda_1 = 0,597/1,75 = 0,34114$. Далее по формулам (24) и (25) определяем значение $\lambda_a = 1,23889 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $\lambda_{и} = 1,32684 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, среднее которых даёт значение эффективной теплопроводности первой бинарной системы $\lambda' = 1,28236 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Теплопроводность следующей бинарной системы с изолированными газовыми включениями определим с использованием формул работы [5], полученных для элементарной ячейки в виде куба в кубе.

При дроблении этой ячейки адиабатическими плоскостями получена зависимость

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_{и}} = \frac{v - (v - 1)(1 - m_2^{2/3})m_2^{1/3}}{v - m_2^{1/3}(v - 1)}, \quad (36)$$

а при дроблении изотермическими плоскостями имеем:

$$\frac{\lambda_{и}}{\lambda_1} = \frac{1 + (v - 1)m_2^{2/3}}{1 + (v - 1)m_2^{2/3}(1 - m_2^{1/3})}. \quad (37)$$

Расчёты по этим формулам с использованием полученных данных $\lambda_1 = \lambda' = 1,28236 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $v = \lambda_2/\lambda_1 = 0,075018$; $m_2 = 0,0901$ дали следующие результаты: $\lambda_a = 1,064 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $\lambda_{и} = 1,1633 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Расчетная эффективная теплопроводность материала $\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_{и}) = 1,1136 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ оказалась больше опытной на 0,6 %.

При влагосодержании материала $0 < \psi < \psi_w$ объём мелких капиллярных пор делится на две части. Одна часть заполнена жидкостью, а другая – паровоздушной смесью. Тогда, с учетом объёма твёрдого скелета, получим трехкомпонентную систему, расчет теплопроводности которой, согласно [7], целесообразно выполнять без ее деления на две бинарные системы. Это можно реализовать с помощью формул (20) и (21) или их преобразований, учитывающих структурные изменения трехкомпонентной элементарной ячейки при $c_n = c$ и $c_n \geq c_x$ и описанных выше. Теплопроводность всего материала определяется по формулам (36) и (37). После расчетов при значениях влагосодержания из указанного диапазона установлено, что зависимость теплопроводности материала близка линейной.

Рассмотрим еще два примера расчета теплопроводности влажного капиллярно-пористого материала с использованием опытных данных, приведенных в [15] для глиняного кирпича плотностью 1600 и 1820 кг/м³. Однако в этой работе отсутствовали значения плотности скелета ρ_s , что не позволяло выполнить расчет теплопроводности материала по предлагаемому двухэтапному методу.

Для определения плотности скелета глиняного кирпича нами по данным восьми пар значений плотности ρ от 1360 до 2120 кг/м³ и плотности ρ_s от 2604 до 2730 кг/м³ было построено линейное уравнение регрессии.

$$\rho_s = 2388 + 0,162\rho. \quad (38)$$

Для оценки эффективности этого уравнения был использован опытный F-критерий Фишера, который определялся как отношение рассеяния данных относительно среднего выборочного со степенью свободы $v_1 = 8 - 1 = 7$ к рассеянию относительно уравнения (38)

со степенью свободы $\nu_2 = 8 - 2 = 6$. Это отношение оказалось равным $F = 4,63$ и при уровне значимости $\alpha = 0,05$ превышало критическое значение $F_{0,05;7;6} = 4,21$. Следовательно уравнение (38) эффективно с доверительной вероятностью 0,95. Кроме того, выборочный коэффициент корреляции $r = 0,906$ близок к 1,0 и поэтому зависимость между ρ_s и ρ является практически линейной.

По данным работы [15] глиняный кирпич плотностью $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ в сухом состоянии имел теплопроводность $\lambda_0 = 0,63 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а в водонасыщенном состоянии ($\psi_w = 0,3$) она составляла $\lambda_w = 1,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Плотность скелета материала $\rho_s = 2647 \text{ кг/м}^3$ была определена по формуле (38). Соответственно, для глиняного кирпича плотностью $\rho = 1820 \text{ кг/м}^3$ имели: $\lambda_0 = 0,69 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_w = 1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при $\psi_w = 0,23$ и $\rho_s = 2683 \text{ кг/м}^3$. Остальные исходные данные, как и в первом примере, были определены расчетным путем.

Результаты расчетов теплопроводности глиняного кирпича вплоть до водонасыщения по предлагаемому методу, особенности которого подробно описаны в первом примере, и опытные данные приведены на рисунке 4, из которого видно, что результаты расчета достаточно точно предсказывают опытные данные. Так, для водонасыщенного кирпича плотностью $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ результаты расчета превышают опытные значения на 2,25 %, а для кирпича плотностью $\rho = 1820 \text{ кг/м}^3$ меньше опытного на 1,27 %. В первом примере эта разница составила лишь +0,6 %. Из рисунка 4 следует, что в первом приближении расчетную зависимость λ от ψ можно принять линейной. Это вполне соответствует линейным зависимостям, построенным по многочисленным опытным данным и представленным в различных работах, например [15,16].

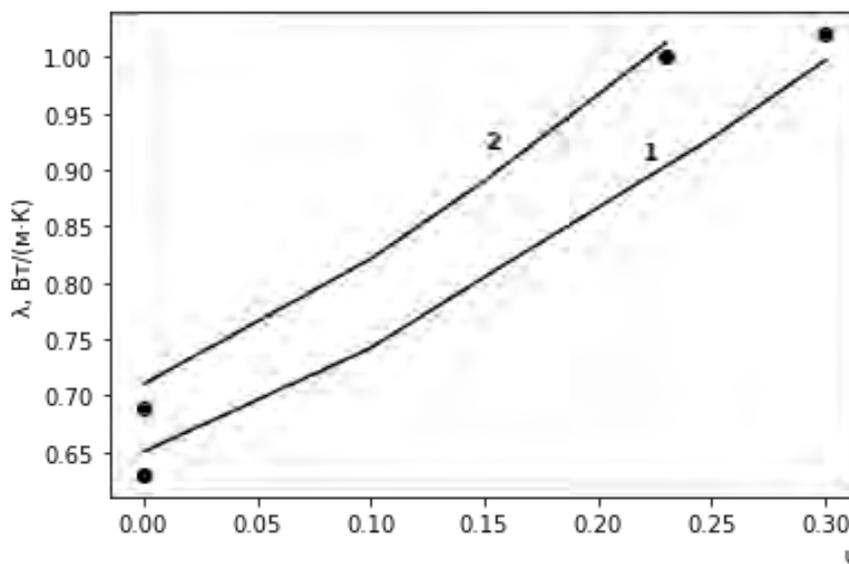


Рисунок 4 – Зависимость эффективной теплопроводности λ глиняного кирпича различной плотности от влагосодержания ψ 1 – $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho = 1820 \text{ кг/м}^3$; кружки – опытные данные

Заключение

Построен ряд зависимостей для определения эффективной теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов, влагосодержание пор которых при свободном впитывании жидкости может измениться от гигроскопического вплоть до насыщения. Эти материалы рассматривались как неоднородные трехкомпонентные системы, состоящие из твердого скелета, газа (паровоздушной смеси) и жидкости (вода). При анализе переноса тепла в таких системах одновременно учитывались теплопроводности и объемные концентрации всех компонент и использовались методы теории обобщенной проводимости, а структура твердого скелета моделировалась упорядоченной структурой из одинаковых элементарных ячеек наиболее простой кубической формы.

Изменения бинарной структуры из взаимосвязанных жидкости и газа отслеживались по мере заполнения пор жидкостью. Вначале имеем изолированные включения жидкости, затем непрерывные компоненты жидкости и газа и, наконец, замкнутые включения газа. Геометрическая модель элементарной трехкомпонентной ячейки каждой из этих структур описывалась согласно теории протекания и для каждой элементарной ячейки были построены зависимости для определения её теплопроводности при адиабатическом и изотермическом делении и определены границы их применения.

С физической и практической точек зрения целесообразно в первую очередь использовать формулы (20) и (21), которые

обеспечивают плавный переход от структуры с непрерывными включениями жидкости к структуре с её изолированными включениями и наоборот и позволяют определить теплопроводность влажного материала вплоть до состояния свободного насыщения водой. Рассмотрена подготовка исходных данных для расчёта. Особенности расчёта по предложенным формулам продемонстрированы на примерах с использованием опытных данных для глиняного кирпича. Установлено, что предложенный метод расчета способен с достаточной точностью прогнозировать теплопроводность влажных капиллярно-пористых стеновых материалов.

Список цитированных источников

1. Blocken, B. J. A review of wind-driven rain research in building science / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – № 92 (13). – P. 1079–1130.
2. Künzle, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameter / H. M. Künzle. – Stuttgart: IRB Verlag, 1995.
3. Evaluation of the influence of wind-driven rain in moisture in cellular concrete wall boards / A. Alsabry [et al.] // Int. J. Appl. Mech. Eng. – 2017. – № 22. – P. 509–519.
4. Blocken, B. J. On the validity of the cosine projection in wind-driven rain calculations on buildings / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // Building and Environment. – 2006. – № 41 (9). – P. 1182–1189.

5. Дульнев, Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
6. Гурьев, В. В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / В. В. Гурьев, В. С. Жолудов, В. Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 2003. – 416 с.
7. Alsabry, A. Dependencies for determining the thermal Conductivity of moist capillary-porous materials / A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska, V. I. Nikitsin // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 3211.
8. A model of moist polymer foam and a scheme for the calculation of its thermal conductivity / V. I. Nikitsin [et al.] // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 520.
9. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity of high moisture levels. Report TVBM-3076, Division of Building Materials / M. Janz. – Lund : Lund Institute of Technology, 1997.
10. Nikitsin, V. I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials / V. I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2013. – № 56. – P. 30–34.
11. Gawin, D. Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych / D. Gawin. – Łódź : Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2000.
12. Ochs, F. Effective thermal conductivity of moisture isolation as a function of temperature / F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2008. – № 51. – P. 539–552.
13. Sheffer, G. A whole range higric material model. Modeling liquid and vapour transport properties in porous media / G. Sheffer, R. Plagge // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2010. – № 53. – P. 286–296.
14. Epstein, N. On tortuosity and tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // *Chemical Eng. Science*. – 1989. – № 44 (3). – P. 777–779.
15. Wyrwal, J. Problemy zawilgocenia przegród budowlanych / J. Wyrwal, J. Świrska. – Warszawa : Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN, 1998. – 108 s.
16. Ясин, Ю. Д. Влияние плотности, влажности и количества криофазы на теплофизические свойства строительных материалов / Ю. Д. Ясин, Н. Н. Кузнецова // *Строительные материалы*. – 1988. – № 7. – С. 24–25.
8. A model of moist polymer foam and a scheme for the calculation of its thermal conductivity / V. I. Nikitsin [et al.] // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 520.
9. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity of high moisture levels. Report TVBM-3076, Division of Building Materials / M. Janz. – Lund : Lund Institute of Technology, 1997.
10. Nikitsin, V. I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials / V. I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2013. – № 56. – P. 30–34.
11. Gawin, D. Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych / D. Gawin. – Łódź : Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2000.
12. Ochs, F. Effective thermal conductivity of moisture isolation as a function of temperature / F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2008. – № 51. – P. 539–552.
13. Sheffer, G. A whole range higric material model. Modeling liquid and vapour transport properties in porous media / G. Sheffer, R. Plagge // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2010. – № 53. – P. 286–296.
14. Epstein, N. On tortuosity and tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // *Chemical Eng. Science*. – 1989. – № 44 (3). – P. 777–779.
15. Wyrwal, J. Problemy zawilgocenia przegród budowlanych / J. Wyrwal, J. Świrska. – Warszawa : Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN, 1998. – 108 s.
16. Yasin, Yu. D. Vliyanie plotnosti, vlazhnosti i kolichestva kriofazy na teplofizicheskie svojstva stroitel'nyh materialov / Yu. D. Yasin, N. N. Kuznecova // *Stroitel'nye materialy*. – 1988. – № 7. – S. 24–25.

Материал поступил в редакцию 17.05.2022

References

1. Blocken, B. J. A review of wind-driven rain research in building science / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2004. – № 92 (13). – P. 1079–1130.
2. Künzle, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameter / H. M. Künzle. – Stuttgart : IRB Verlag, 1995.
3. Evaluation of the influence of wind-driven rain in moisture in cellular concrete wall boards / A. Alsabry [et al.] // *Int. J. Appl. Mech. Eng.* – 2017. – № 22. – P. 509–519.
4. Blocken, B. J. On the validity of the cosine projection in wind-driven rain calculations on buildings / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // *Building and Environment*. – 2006. – № 41 (9). – P. 1182–1189.
5. Dul'nev, G. N. Processy perenosa v neodnorodnyh sredah / G. N. Dul'nev, V. V. Novikov. – L. : Energoatomizdat, 1991. – 248 s.
6. Gur'ev, V. V. Teplovaya izolyaciya v promyshlennosti. Teoriya i raschet / V. V. Gur'ev, V. S. Zholudov, V. G. Petrov-Denisov. – M. : Strojizdat, 2003. – 416 s.
7. Alsabry, A. Dependencies for determining the thermal Conductivity of moist capillary-porous materials / A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska, V. I. Nikitsin // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 3211.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРАМБОВКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УПЛОТНЯЕМОГО ГРУНТА

П. С. Пойта¹, Н. Н. Шалобыта², Т. П. Шалобыта³, А. А. Четырбок⁴

¹Д. т. н., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: ppsbrest@mail.ru

²К. т. н., проректор по научной работе Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

³К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: t_shalobyta@mail.ru

⁴Студентка Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: chebrtok@gmail.com

Реферат

Проведены численные исследования и анализ напряженно-деформированного состояния грунтового основания для различных форм подошв трамбовки: плоской, выпуклой и вогнутой при статическом действии нагрузки.

Ключевые слова: основание фундаментов, несущая способность грунта, напряженно-деформированное состояние, уплотнение грунтов, трамбовка.

INFLUENCE OF THE RAMMING CONTACT SURFACE SHAPE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPACTED SOIL

P. S. Poyta, N. N. Shalobyta, T. P. Shalobyta, A. A. Chetyrbok

Abstract

There have been carried out numerical studies and analysis of the stress-strain state of soil foundation for various ramming base shapes: flat, convex and concave under static load.

Keywords: foundation base, soil bearing capacity, stress-strain state, soil compaction, ramming.

Введение

Одним из современных путей получения экономически и технологически эффективных конструкций фундаментов, применяемых в сложных инженерно-геологических условиях, является усовершенствование формы их контактной поверхности с грунтом. К настоящему времени накоплен определенный опыт исследований напряженно-деформированного состояния оснований для разработки более экономичных конструкций фундаментов за счет рационального распределения реактивного давления грунта либо применения новых подходов к построению расчетной схемы. Наряду с широко применяемыми фундаментами с плоской подошвой разработаны их конструкции со ступенчатой, выпуклой, вогнутой и др. формами поверхностями передачи нагрузки на основания [1–6]. На основании результатов исследований установлены пределы применимости фундаментов со ступенчатым и криволинейным очертанием контактной поверхности, доказана возможность увеличения несущей способности основания до 100 % для различных по шероховатости поверхностей, контактирующих с грунтом. Определяющее значение имеют конструктивные особенности фундамента (стрела подъема кривизны, характер контактной поверхности), глубина его заложения, а также прочностные и деформативные характеристики грунта основания. Следовательно, вопрос влияния формы контактной поверхности фундаментов на напряженно-деформированное состояние грунтового основания значительно изучен.

Вместе с тем влияние формы контактной поверхности трамбовки на напряженно-деформированное состояние уплотненного грунта основания является вопросом открытым, требующим более детального изучения.

Особенностью проектирования и строительства фундаментов в инженерно-геологических условиях Республики Беларусь является наличие значительных территорий, представленных грунтами большой деформативности и незначительной прочности. Применение уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками позволяет в ряде случаев весьма эффективно решить указанные проблемы в практике производства земляных работ и, естественно, способствует улучшению качества грунтового основания, то есть позволяет снизить сжимаемость и повысить прочность грунтов.

Методика исследований

В строительной практике применяют в основном трамбовки, круглые или многоугольные в плане, диаметром от 0,7 м до 3 м с плоской подошвой (рисунок 1). Масса трамбовки колеблется, как правило, от 3 до 16 т. В отдельных случаях используются более тяжелые трамбовки $d = 5,0$ м с куполообразной формой днища малой кривизны [7, 8].

Исследования и производственный опыт показывают, что при поверхностном уплотнении грунтовых оснований тяжелыми трамбовками, снижению трудоемкости, повышению экономичности принимаемых решений способствует совершенствование не только технологических, но и конструктивных параметров [9]. Изменение плоской формы подошвы трамбовки на криволинейную позволяет обеспечить более однородную степень уплотнения по всей глубине и по всей площади уплотняемой толщине грунта [9].

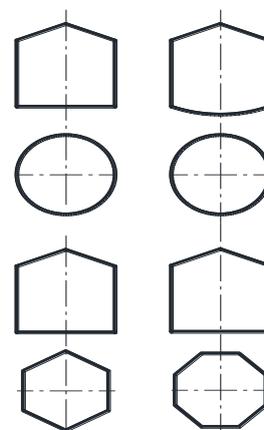


Рисунок 1 – Формы трамбовок для уплотнения грунта

Учитывая сложность оценки параметров взаимодействия системы «фундамент–основание» при динамических воздействиях, нами выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния грунтового основания при различной форме подошвы

трамбовки (плоской, выпуклой, вогнутой) и различными вариантами эпюр вертикальных контактных давлений при статическом нагружении (рисунок 2). Такой подход возможен, так как исследования реактивного сопротивления грунта в основании круглого штампа при кратковременных динамических нагрузках показали, что распределение контактных напряжений по фундаментной плите согласуется с соответствующими данными статистических испытаний [10].

Расчеты напряжений выполнены для прямоугольной трамбовки шириной 1,2 м и массой 9 т. При назначении массы трамбовки исходили из того, чтобы статическое давление на грунты составляло не менее 15,0 кПа для песков, 20,0 кПа для глинистых грунтов [7]. При проведении анализа принят вариант, когда нагрузка на грунтовое основание передается равномерно по всей плоскости контакта с различной интенсивностью, что позволило идеализировать схему работы и решить задачу в плоской постановке. Оценка характера распределения вертикальных и горизонтальных напряжений произведена при различных вариантах эпюр контактных давлений при изменяющихся значениях вертикального нагружения по ширине трамбовки (рисунки 3, 4).

Напряжения в грунтовом массиве от действия вертикальной нагрузки определяли согласно решению Г. В. Колосова [11], представленному в декартовых координатах:

$$\sigma_z = \frac{P}{\pi} \left(\arctg \frac{b-x}{z} + \arctg \frac{b+x}{z} \right) - \frac{2bP}{\pi} \cdot \frac{z(x^2 - z^2 - b^2)}{\left[(x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2z^2 \right]} \quad (1)$$

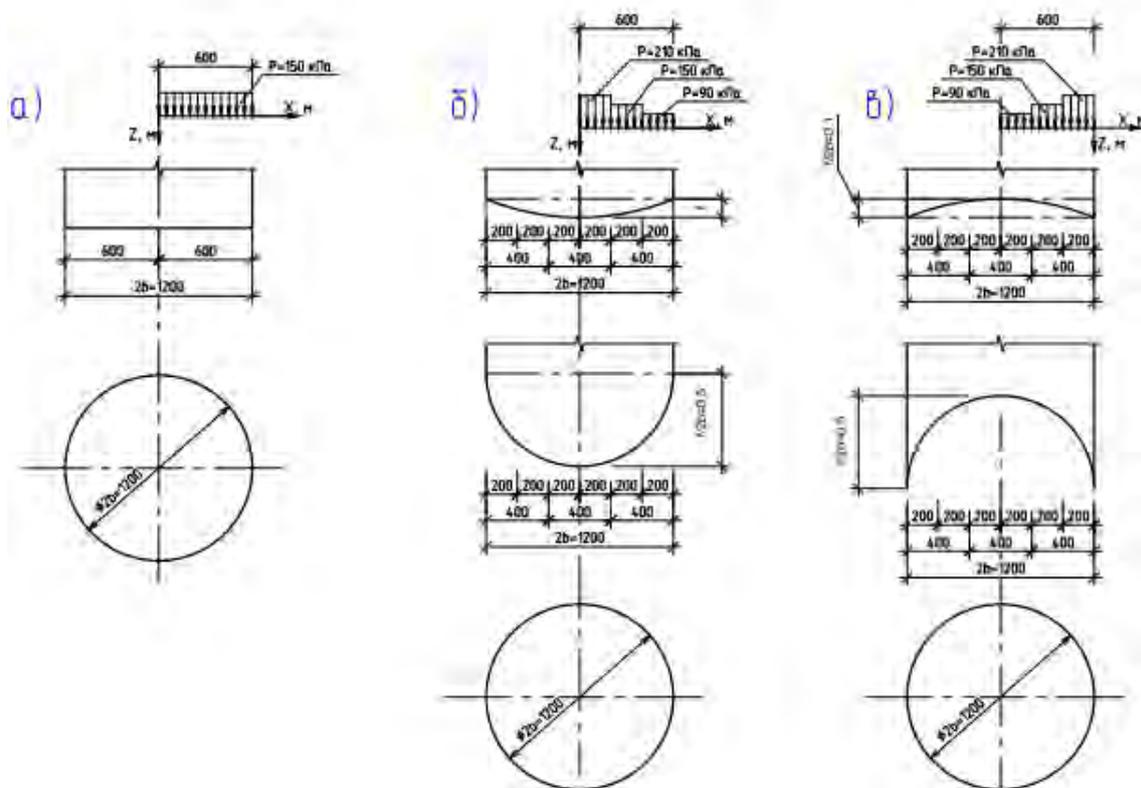
$$\sigma_x = \frac{P}{\pi} \left(\arctg \frac{b-x}{z} + \arctg \frac{b+x}{z} \right) + \frac{2bP}{\pi} \cdot \frac{z(x^2 - z^2 - b^2)}{\left[(x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2z^2 \right]} \quad (2)$$

$$\tau_{xz} = \frac{4bP}{\pi} \cdot \frac{xz^2}{\left[(x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2z^2 \right]} \quad (3)$$

где P – интенсивность нагрузки;
 b – половина ширины трамбовки;
 x – расстояние по горизонтали от оси Z до рассматриваемой точки;
 z – расстояние по вертикали от оси X до рассматриваемой точки.

Величины напряжений определяли в узловых точках расчетной сетки. Для этого область под подошвой фундамента была разбита сеткой с горизонтальным шагом 10 см от оси симметрии нагрузки и вертикальным шагом 10 см от оси X , совмещенной с плоскостью подошвы трамбовки. Распределение нагрузки принимали из условия равенства суммарного нагружения основания. В качестве эталонной задачи рассматривалась схема с равномерно-распределенным давлением по плоской подошве контактной поверхности трамбовки (рисунок 2а).

Очертания давления принимали равномерного типа с максимальными значениями у края (рисунок 2в, схемы нагружения 4 и 5) и у центра полосы нагружения (рисунки 2б, схемы нагружения 2 и 3), что соответствует трамбовкам с различной формой контактной поверхности. Определение суммарного напряженного состояния для схем нагружения производили в несколько этапов путем суммирования полей напряжений от отдельных участков распределенной нагрузки.



а) – схема 1 (плоская),
 б) – схема 2 и 3 (выпуклой, с различной стрелой подъема),
 в) – схема 4 и 5 (вогнутой, с различной стрелой подъема)

Рисунок 2 – Схемы нагружения основания для различных форм подошвы трамбовки

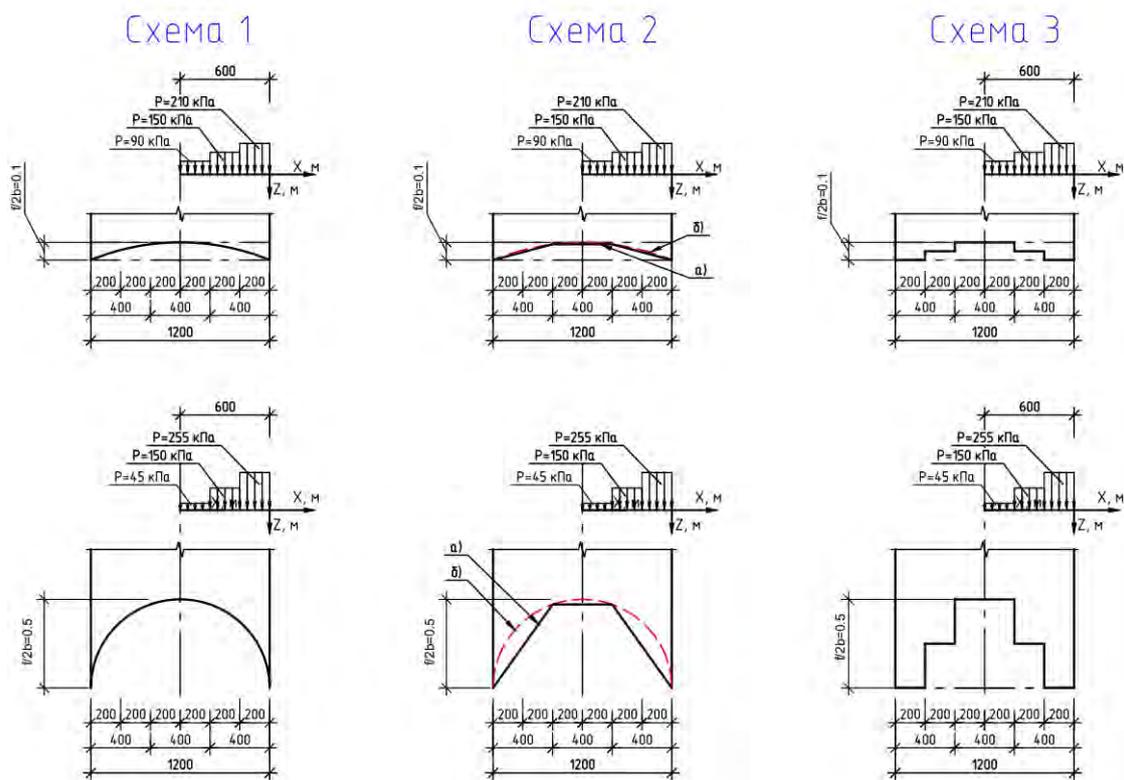


схема 1 – исходная схема;
схема 2 – приведение поверхности трамбовки к ломаной форме;
схема 3 – принятая к расчета упрощенная расчетная схема
а) – по окружности, б) – ломаная в форме трапеции

Рисунок 3 – Схемы нагружения основания трамбовками с вогнутой поверхностью и различной стрелой подъёма

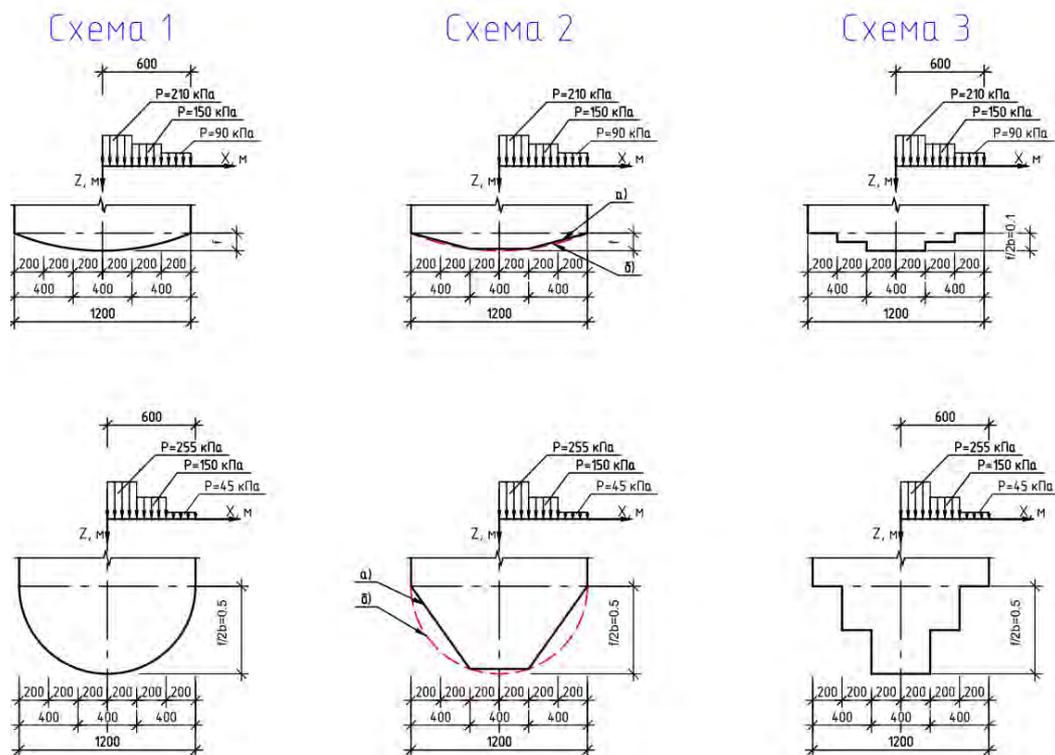


схема 1 – исходная схема;
схема 2 – приведение поверхности трамбовки к ломаной форме;
схема 3 – принятая к расчета упрощенная расчетная схема
а) – по окружности, б) – ломаная в форме трапеции

Рисунок 4 – Схемы нагружения основания трамбовками с выпуклой поверхностью и различной стрелой подъёма

Результаты расчета и их анализ

Эпюры распределения вертикальных напряжений σ_z по глубине грунтовой толщи на различном удалении от оси симметрии представлены на рисунках 5 и 6. Их анализ показывает, что основное различие в величине и характере изменения вертикальных напряжений σ_z происходит в поверхностном слое мощностью, равной 1,3 ширины трамбовки. Наибольшие различия имеют напряжения по оси симметрии нагружения ($x = 0$). Для разных схем нагружения это различие у поверхности достигает более чем в 3,5 раза. При увеличении глубины вертикальные напряжения σ_z быстро уменьшаются и на расстоянии около 1,6 м от поверхности при различных схемах нагружения почти совпадают. Следует отметить, на данном участке вертикальные напряжения при схемах нагружения 4 и 5 меньше напряжений от действия равномерно-распределенной нагрузки (схема 1, рисунок 2а, при этом напряжение от действия нагрузки по схемам 2 и 3 значительно больше, чем при схеме 1.

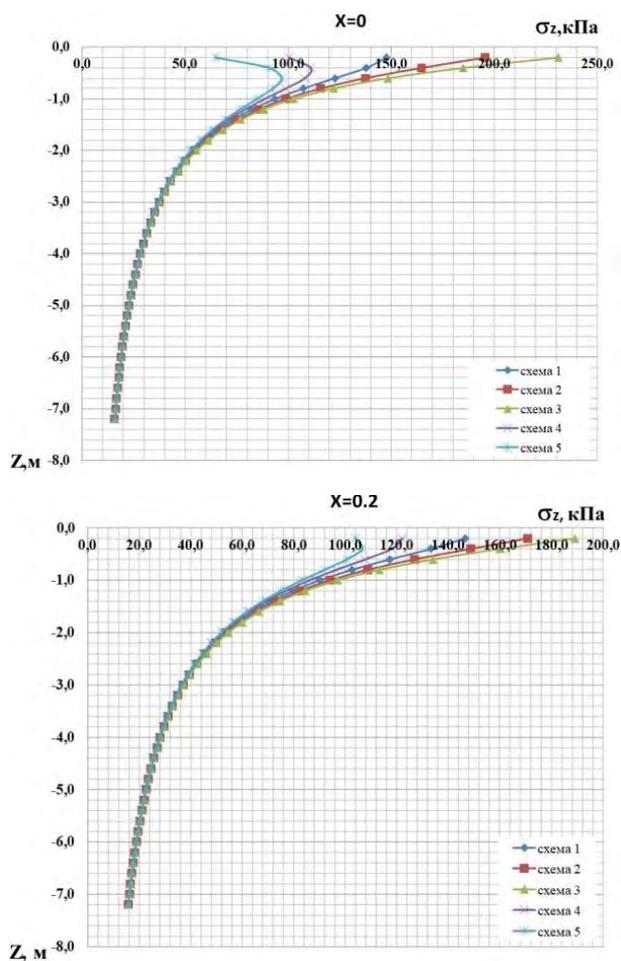


Рисунок 5 – Распределение вертикальных напряжений σ_z по глубине основания

Аналогичная картина распределения вертикальных напряжений σ_z наблюдается и при $x = 0,2$ м, хотя диапазон их изменения значительно меньше. Таким образом, максимальные вертикальные напряжения при $x = 0$ м имеем при действии нагрузки, приложенной к контактной поверхности по схемам 2 и 3. При удалении от оси симметрии действующей нагрузки на расстояние, равном b , картина распределений напряжений σ_z кардинально меняется. Напряжения σ_z по схемам 4 и 5 на уровне контакта поверхности трамбовки с грунтом превышают соответствующие напряжения от действия равномерно распределенной нагрузки больше в 1,3...1,5 раза. И это превышение, в меньших пределах, сохраняется до глубины 1,0 м. При увеличении расстояния от оси приложения нагрузки до 0,8...1,0 м, напряжения σ_z , определенные от действия нагрузки по схемам 4 и 5

в пределах глубины 3,7 м (2.2b) больше σ_z , определенных по другим схемам загрузки основания. И чем больше удаление от оси симметрии нагрузки до вертикали определения напряжений σ_z , тем различие напряжений уменьшается с увеличением глубины. При удалении от оси симметрии на $x = 0,8$ м выравнивание напряжений σ_z происходит на глубине 1,4 м от поверхности, а при удалении от оси 0-z на 1,0 м выравнивание происходит на глубине 1,7 м. При этом напряжения, определенные от действия нагрузки по схемам 4 и 5 больше напряжений, определенных по остальным схемам, а это в свою очередь свидетельствует о более эффективном воздействии нагрузки по схемам 4 и 5 на грунты основания, т. к. вертикальные напряжения большей величины действуют на большей глубине.

Распределение горизонтальных напряжений при сравнении рассматриваемых схем нагружения (рисунки 7 и 8) имеет существенные различия до глубины, равной 1,3b. Разброс значений в активной зоне основания лежит в диапазоне от 5,0 до 60 %. Ближе к поверхности нагруженного слоя грунта имеют место более значительные расхождения. При этом величины σ_x при удалении от оси симметрии нагружения до 0,6 м для различных схем претерпевают значительные изменения. При $x = 0$ меньшие значения σ_x характерны для схем 2 и 3. Однако при $x = 0,6$ м, т. е. $x = b$, меньшие значения σ_x характерны для схем 4 и 5. Данная тенденция сохраняется и при большем удалении от оси симметрии нагружения.

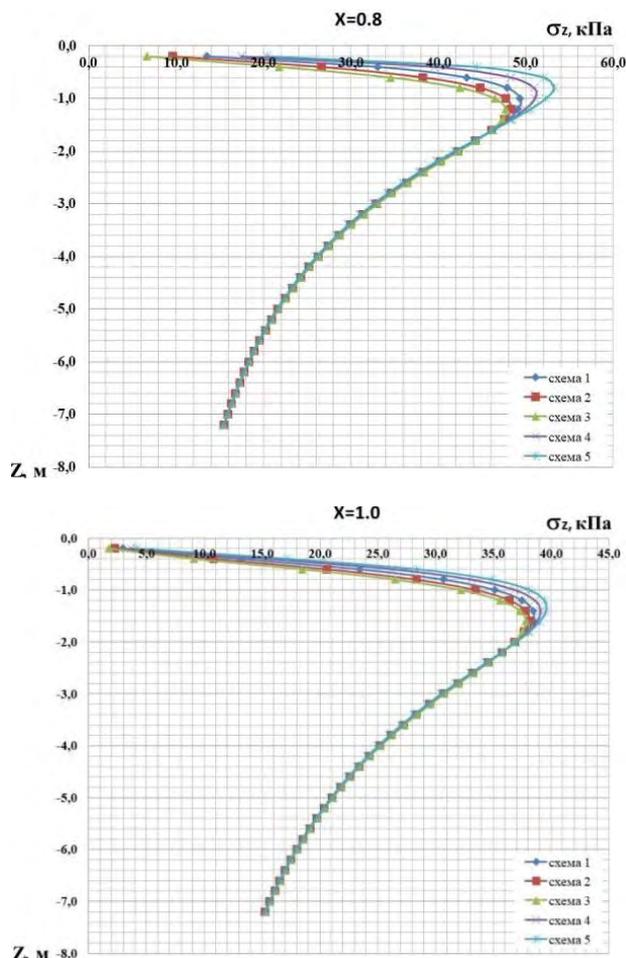


Рисунок 6 – Распределение вертикальных напряжений σ_z по глубине основания

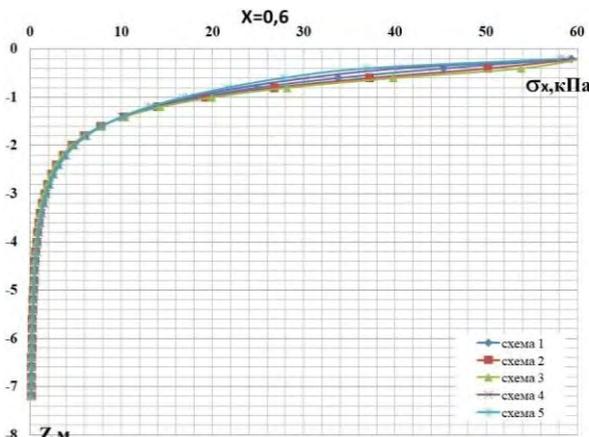
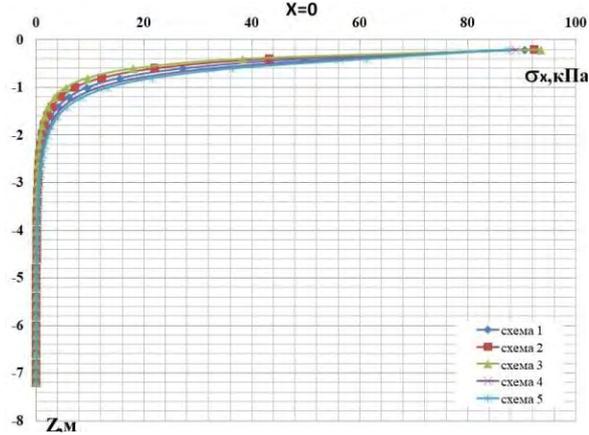


Рисунок 7 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x по глубине основания

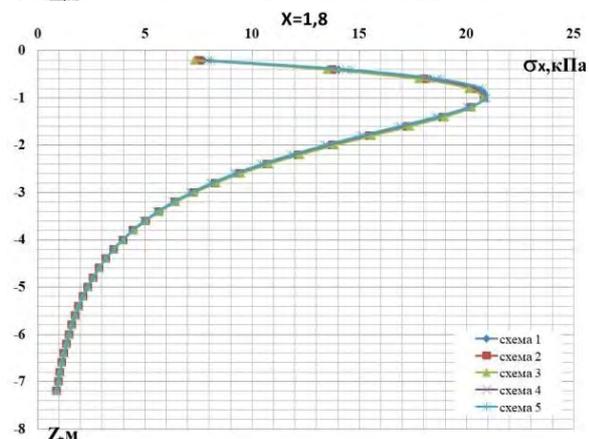
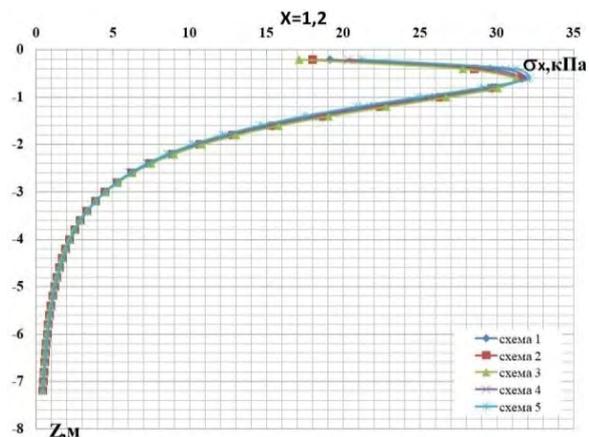


Рисунок 8 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x по глубине основания

Такой характер распределения напряжений подтверждается эпюрами изменения σ_x , показанными на рисунке 9. На всех рассмотренных глубинах напряжения σ_x , определенные по схемам 4 и 5, по оси симметрии нагружения всегда больше, чем по схемам 1...3. И чем больше глубина, на которой определены напряжения σ_x , тем дальше от оси симметрии нагружения точка, в которой σ_x одинаковы. На глубине $z = b$ напряжения σ_x равны в точке по вертикали, отстоящей от оси симметрии нагружения на 0,36 м, что равно $0,6b$. На глубине $z = 2b = 1,2$ м – на 0,48 м ($0,8b$), на глубине $4b = 2,4$ м – 0,9 м ($1,5b$). Все это подтверждает более эффективное действие нагрузки по схемам 4 и 5 практически на всех рассматриваемых глубинах в области грунтового массива, расположенного в пределах $(0,6 \dots 1,0)b$ от оси симметрии нагружения. При большем удалении от оси $0-z$ в большей степени проявляется действие нагрузки по схемам 2 и 3. Такой характер распределения напряжений σ_z и σ_x при рассмотренных схемах нагружения грунтового основания позволяет сделать вывод о формировании различных зон уплотнения грунта, образованных при использовании трамбовок с различной контактной поверхностью (рисунок 10).

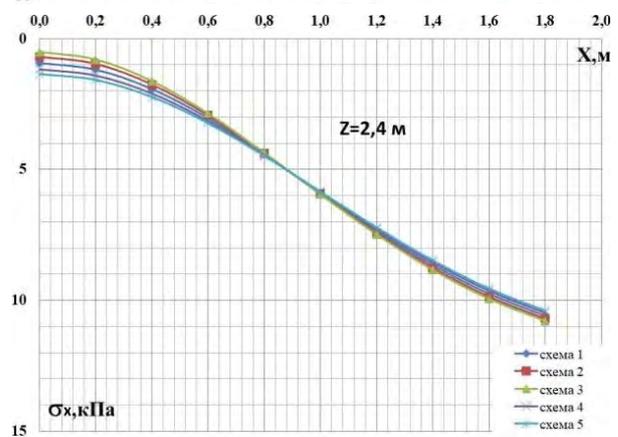
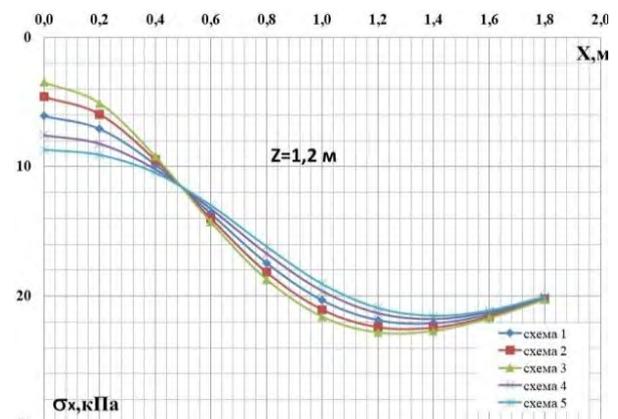
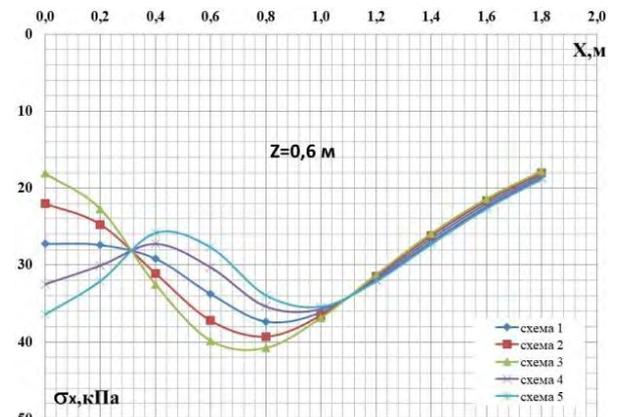
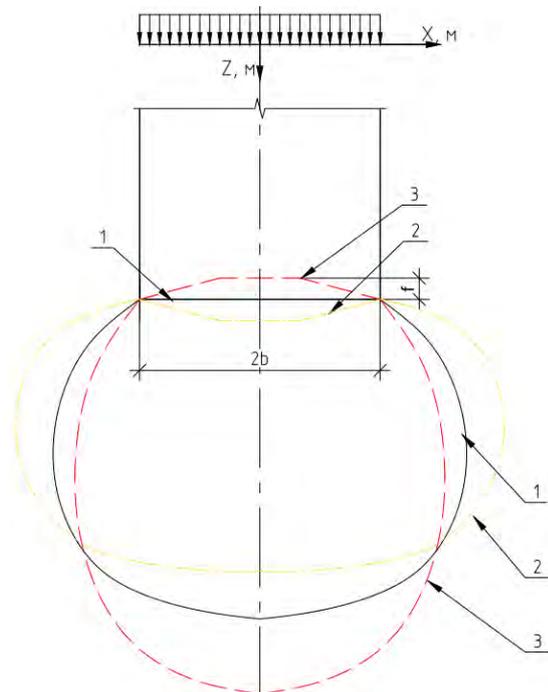


Рисунок 9 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в зависимости от расстояния от оси нагружения по глубине основания

Следовательно, изменяя форму контактной поверхности трамбовки, можно регулировать глубину и ширину зоны уплотнения грунта. Если требуется произвести уплотнение толщи грунта с достижением максимальной глубины уплотнения, то здесь более эффективны трамбовки с вогнутой формой подошвы (рисунок 3). Следует отметить, что трапецевидная форма подошвы более проста при ее изготовлении, чем куполообразная. Вместе с тем глубину уплотнения грунта можно регулировать и углом наклона боковых граней. Такой тип трамбовки особенно эффективен при уплотнении грунтов под ленточные фундаменты. Использование такой трамбовки позволяет получить сплошной массив уплотненного грунта по всей длине проектируемого фундамента.

Если требуется уплотнить толщу грунта мощностью до 2,0 м, однако значительной площади в плане, то в данном случае более эффективно применение трамбовки с выпуклой подошвой (рисунок 4). В данном случае, регулируя наклон боковых граней подошвы трамбовки, можно получить уплотненную зону значительной ширины при меньшей ее глубине (рисунок 10).



1 – плоская подошва трамбовки; 2, 3 – соответственно, выпуклая и вогнутая контактные поверхности трамбовки

Рисунок 10 – Формы зон уплотнения грунта при использовании трамбовок с различным очертанием контактной поверхности трамбовки с грунтом

Заключение

Форма контактной поверхности трамбовки существенным образом влияет на напряженно-деформированное состояние уплотненного грунта, следовательно и на эффективность работ по устройству искусственных оснований. Изменяя форму контактной поверхности трамбовки с грунтом, получаем возможность регулировать глубину и ширину уплотняемой зоны. В комплексе подобные эффекты имеют большое значение при подготовке слабых оснований или отсыпанных слоев грунта различной мощности под разнообразные типы фундаментов.

Список цитированных источников

1. Сорочан, Е. А. Исследование работы железобетонных фундаментных блоков / Е. А. Сорочан // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1981. – № 2. – С. 8–11.
2. Сорочан, Е. А. Фундаменты промышленных зданий / Е. А. Сорочан. – М. : Стройиздат, 1986. – 304 с.
3. Грицук, М. С. Рациональные конструкции плитных фундаментов / М. С. Грицук. – Брест : Брестский политехнический институт, 1997. – 218 с.

4. Пронозин, Я. А. Теоретические обоснования повышения жесткости грунтового основания, нагруженного по выпуклой вверх криволинейной поверхности / Я. А. Пронозин, Ю. В. Наумкина, Д. В. Рачков // Геотехника. International Journal Geotechnics. – 2015. – № 2. – С. 4–9.
5. Пронозин, Я. А. Цилиндрические фундаменты-оболочки / Я. А. Пронозин. – М. : АСВ, 2010. – 168 с.
6. Тетиор, А. Н. Железобетонные фундаменты в форме плит и оболочек : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / А. Н. Тетиор. – Симферополь, 1984. – 376 с.
7. Справочник геотехника. Основание, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Менчужева. – М. : АСВ, 2014. – 728 с.
8. Зарецкий, Ю. К. Глубинное уплотнение грунтов ударным нагружением / Ю. К. Зарецкий, М. Ю. Гарицелов. – И. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
9. Клебанюк, Д. Н. Особенности методики выбора технологических параметров при уплотнении грунтов оснований тяжелыми трамбовками / Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта, П. В. Шведовский // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2013. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 77–81.
10. Рыков, Г. В. Экспериментальные исследования реактивного сопротивления грунта в основании круглого штампа при кратковременных динамических нагрузках / Г. В. Рыков, В. П. Кузнецов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – №3. – С. 10–12.
11. Пилягин, А. В. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений : учеб. пособие / А. В. Пилягин. – М. : АСВ, 2006. – 248 с.

References

1. Sorochan, E. A. Issledovanie raboty zhelezobetonnykh fundamentnykh blokov / E. A. Sorochan // Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov. – 1981. – № 2. – S. 8–11.
2. Sorochan, E. A. Fundamentey promyshlennykh zdaniy / E. A. Sorochan. – M. : Strojizdat, 1986. – 304 s.
3. Gricuk, M. S. Racional'nye konstrukcii plitnykh fundamentov / M. S. Gricuk. – Brest : Brestskij politekhnicheskij institut, 1997. – 218 s.
4. Pronozin, Ya. A. Teoreticheskie obosnovaniya povysheniya zhestkosti gruntovogo os-novaniya, nagruzhennogo po vypukloj vverh krivolineynoj poverhnosti / Ya. A. Pronozin, Yu. V. Naumkina, D. V. Rachkov // Geotekhnika. International Journal Geotechnics. – 2015. – № 2. – S. 4–9.
5. Pronozin, Ya. A. Cilindricheskie fundamentey-obolochki / Ya. A. Pronozin. – M. : ASV, 2010. – 168 s.
6. Tetior, A. N. Zhelezobetonnye fundamentey v forme plit i obolochek. : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.01 / A. N. Tetior. – Simferopol', 1984. – 376 s.
7. Spravochnik geotekhnika. Osnovanie, fundamentey i podzemnye sooruzheniya / pod obshch. red. V. A. Il'icheva, R. A. Menchuzheva. – M. : ASV, 2014. – 728 s.
8. Zareckij, Yu. K. Glubinnoe uplotnenie gruntov udarnym nagruzheniem / Yu. K. Zareckij, M. Yu. Garicelov. – I. : Energoatomizdat, 1989. – 192 s.
9. Klebanyuk, D. N. Osobennosti metodiki vybora tekhnologicheskikh parametrov pri uplotnenii gruntov osnovanij tyazhelymi trambovkami / D. N. Klebanyuk, P. S. Pojta, P. V. Shvedovskij // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – № 1 : Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 77–81.
10. Rykov, G. V. Eksperimental'nye issledovaniya reaktivnogo soprotivleniya grunta v osnovanii kruglogo shtampa pri kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzkah / G. V. Rykov, V. P. Kuznecov // Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov. – 1990. – №3. – S. 10–12.
11. Pilyagin, A. V. Proektirovanie osnovanij i fundamentov zdaniy i sooruzhenij : ucheb. posobie / A. V. Pilyagin. – M. : ASV, 2006. – 248 s.

Материал поступил в редакцию 29.06.2022

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ МУНТ И SiO₂ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА: ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ

Е. Н. Полонина¹, С. Н. Леонович², В. В. Потапов³, С. А. Жданок⁴

¹ Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологии строительства Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: grushevskaya_en@tut.by

² Д. т. н., профессор, декан строительного факультета

Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: sleonovich@mail.ru

³ Д. т. н., профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского геотехнологического центра ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, e-mail: vadim_p@inbox.ru

⁴ Д. физ.-мат. н., профессор, академик НАН Беларуси, главный научный сотрудник

ООО «Передовые исследования и технологии», Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: ceo@art-pte.com

Реферат

Применение комбинированной добавки, содержащей малые дозы наночастиц (НЧ) SiO₂ и многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), позволило улучшить технологию портландцементного композита за счет синергетического влияния на наноструктуру геля гидросиликатов кальция. Для обоснования механизма действия наночастиц были выдвинуты различные гипотезы, которые в совокупности были подтверждены комплексом приборных методов нанотехнологий: методом ИК-спектроскопии установлено, что ввод наночастиц повышает кинетику и степень их поликонденсации кремнекислородного тетраэдра; методом рентгенофазового анализа – снижение отношения Ca/Si и повышение упорядоченности структуры CSH-геля; методом наноиндентирования – существенное смещение объемной доли фаз CSH геля в область больших средних значений M и H и уменьшение отношения StDev/M, H для выделенных фаз, что свидетельствует о большей плотности упаковки частиц геля более высокой структурированности вещества геля, и может быть соотнесено с различиями характеристик (E, G, ρ, f_c, f_i) портландцементного композита.

Ключевые слова: комбинированная добавка, наночастицы SiO₂, многослойные углеродные нанотрубки, синергия.

SYNERGETIC EFFECT OF THE EFFECT OF MUNT AND SiO₂ NANOPARTICLES ON CHARACTERISTICS OF PORTLAND CEMENT COMPOSITE: EXPERIMENT AND THEORETICAL EXPLANATION

E. N. Polonina, S. N. Leonovich, V. V. Potapov, S. A. Zhdanok

Abstract

The use of a combined additive containing small doses of SiO₂ nanoparticles (NPs) and multiwalled carbon nanotubes (MWNTs) made it possible to improve the technology of Portland cement composite due to the synergistic effect of calcium hydrosilicates on the nanostructure of the gel. To substantiate the mechanism of action of nanoparticles, various hypotheses were put forward, which, taken together, were confirmed by a complex of instrumental methods of nanotechnology: it was found by IR spectroscopy that the introduction of nanoparticles increases the kinetics and degree of their polycondensation of the silicon-oxygen tetrahedron; X-ray phase analysis - reduction of the Ca/Si ratio and increase in the orderliness of the CSH gel structure; by the nanoindentation method - a significant shift in the volume fraction of the CSH phases of the gel to the region of large average values of M and H and a decrease in the StDev/M, H ratio for the isolated phases, which indicates a higher packing density of the gel particles, a higher structuring of the gel substance, and can be correlated with the differences in characteristics (E, G, ρ, f_c, f_i) of the portland cement composite.

Keywords: combined additive, SiO₂ nanoparticles, multilayer carbon nanotubes, synergy.

Введение

Ввод наночастиц (НЧ) разного химического состава с высокой удельной площадью поверхности (до 1000 м²/г) и высокой физико-химической активностью поверхности в водоцементную систему стал перспективным приемом повышения характеристик цементных материалов [1-5].

Эффективным набором методов исследования влияния используемых наночастиц на структурные характеристики цементных материалов были приняты [6–18]:

- рентгенофазовый анализ и термогравиметрия, позволяющие определять содержание клинкерных минералов, гидратной воды и портландита и оценивать влияние наночастиц на кинетику гидратации алита и скорость пуццолановой реакции [19–20];
- ИК-спектроскопия в сочетании с ЯМР изотопа ²⁹Si, позволяющие оценить эффект ускорения поликонденсации и повышения степени поликонденсации кремнекислородных тетраэдров и повышения координационного числа атома Si, т. е. параметров упорядоченности внутренней структуры наногранул CSH-геля, как следствие, объемной плотности упаковки наногранул [21];
- метод наноиндентирования, дающий прямую количественную информацию о механических характеристиках (приведенный модуль упругости, твердость) и объемной доли разных фаз CSH-геля и ультразвуковые исследования [22–23].

Материалы и методы

При проведении исследований влияния НЧ на свойства бетона применялись следующие компоненты: в качестве вяжущего – портландцемент ПЦ 500 Д0, мелкого заполнителя – природный песок, крупного заполнителя – щебень гранитный фракцией 5–20 мм; модифицирующие вещества – золь гидротермального нанокремнезема (NS), производитель ООО НПФ «Наносилика» РФ (ТУ 2111-001-97849280-2014), и углеродный наноструктурированный материал (NC) МУНТ, производимый отечественной компанией «Передовые исследования и технологии» (ТУ ВУ 691460594.002-2016); а также суперпластификатор (СП) на основе поликарбоксилатного сополимера (SP) и вода затворения.

Гипотезы и результаты

Первая и вторая предложенные версии могли бы быть справедливыми при больших дозах наночастиц.

Версия 1: Как известно, большие молекулы полимеров свернуты в клубки. Добавки суперпластификаторы не являются исключением. Как установлено [24, 25], с увеличением молекулярной массы молекулы добавок пластификаторов сворачиваются, при этом количество активных функциональных групп молекулы уменьшается, снижается дипольный момент молекулы и пластифицирующая эффективность в цементном геле.

Под действием кавитации или постоянного магнитного поля молекулы полимеров способны распрямиться [26], при этом количество

активных функциональных групп возрастает, а следом и пластифицирующая способность добавки (что установлено авторами).

Наночастицы УНМ способны к сильной агрегации. Кавитационная обработка в ультразвуковом поле разрушает агрегаты частиц, растет количество активных центров с большой поверхностной энергией. Кроме того, в процессе обработки наночастицы способны, видимо, адсорбироваться на поверхности молекулы пластификатора.

Далее, как установлено зарубежными исследователями [27], частицы УНМ с карбоксильными группами ускоряют образование гидросиликатов кальция, т. е. являются центрами кристаллизации.

Поскольку энергия взаимодействия функциональных групп добавок пластификаторов с гидратированной поверхностью C_3S в два раза превышает энергию взаимодействия воды, в соответствии с работами [28, 29] можно рассмотреть вариант проникновения органических молекул добавки в структуру геля CSH с выталкиванием оттуда некоторого количества воды.

Версия 2: Молекула пластификатора на основе поликарбоксилатного эфира, обладая достаточными размерами, является своего рода блокатором на поверхности цементного зерна, оттягивая время наступления индукционного периода гидратации. Наблюдается интенсивное растворение клинкерных минералов. Но при этом нет блокирующей оболочки из пленки CSH. Кроме того, наночастицы выступают в качестве центров кристаллизации. Возможность более интенсивного растворения цементного зерна с последующим прессыщением позволяет прогнозировать увеличение количества т. н. внешнего CSH. Изменение времени индукционного периода, которое как раз и вызвано образованием высокоосновных гидросиликатов в традиционных цементных системах, приводит к снижению основности CSH, отсюда и более тонкозернистая однородная морфология продуктов гидратации [30].

На основании предложенных версий и собственных экспериментов доказано – синергетический эффект действия комбинированной добавки основывается на вкладе каждого из ее компонентов в процесс образования и дальнейшей эволюции C-S-H-геля (т. е. каждый из них выполняет свою функцию) [19–22, 31, 32]:

- наночастицы SiO_2 из-за малых размеров (по диаметру 5 нм) и избытка поверхностной энергии ($500 \text{ м}^2/\text{г}$) создают дополнительные центры новообразований; в то же время, имея шарообразную форму, частицы оксида кремния могут входить в гелевые поры, т. е. в пространство между наногранулами CSH геля, способствуя росту его упругих свойств;
- наночастицы МУНТ также обладают высоким энергетическим потенциалом, особенно на изломе трубок, способствуют ускорению и углублению реакции цемента с водой (физический процесс воздействия);
- наночастицы SiO_2 и в большей степени наночастицы МУНТ увеличивают степень полимеризации гидросиликатов кальция и координационное число атома Si;
- поликарбоксилатный суперпластификатор интенсифицирует образование новой фазы в приповерхностных областях зерен цемента за счет стерического эффекта и электростатического отталкивания и ускорения кинетики гидратации алита и белита.

Как показали результаты исследования структуры цементного камня методом РФА (рисунок 1), комбинированная добавка способствует повышению доли низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(II) и томберморитподобных структур с пониженными значениями отношения Ca/Si в составе фаз CSH-геля, а также повышению упорядоченности структуры наночастиц и фаз CSH-геля.

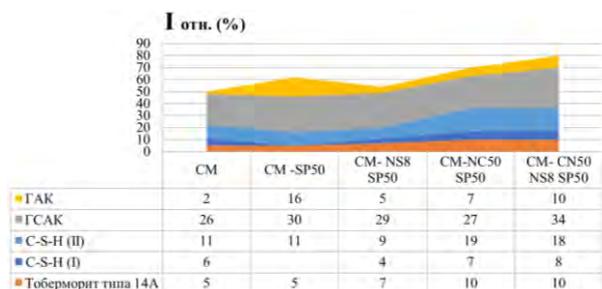


Рисунок 1 – Влияние добавок на относительную интенсивность дифракционных пиков для фаз ГАК (гидроалюминат кальция), ГСАК (гидросульфалюминат кальция), томберморит типа 14А, C-S-H (II) и CSH(I) в возрасте 28 суток

Повышение интенсивности пиков фаз с низким отношением Ca/Si и увеличение базельных расстояний согласуется с результатами ИК-спектроскопии, показавшими более высокую степень полимеризации кремнекислородных тетраэдров в образцах, модифицированных наночастицами, и, соответственно, более высокую упорядоченность структуры CSH-геля на разных стадиях созревания бетона (рисунок 2).

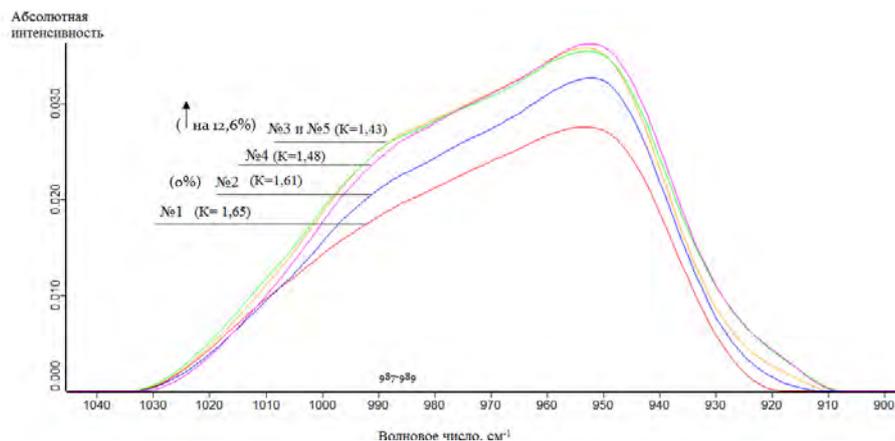
Для возраста 28 сут в ИК-спектрах образцов № 29–33 (рисунок 2) выделены две точки перегиба в районе $993\text{--}996 \text{ см}^{-1}$, $1016\text{--}1018 \text{ см}^{-1}$, расположенные в более коротковолновой области по сравнению с точкой перегиба в возрасте 1 сут. Это указывало на переход гидросиликатов со степенями поликонденсации кремнекислородных тетраэдров, близким к 1, наблюдавшихся в ИК-спектрах в возрасте 1 сут, за счет их объединения в структуры с более высокой степенью поликонденсации (28 сут.). По отношению абсолютных интенсивностей в основном максимуме содержания гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации n_1 в образце состава № 31 (СП + НЧ SiO_2) было выше по сравнению с образцом состава № 30 (СП, без НЧ) на 14,6 %. Содержание гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации n_4 , соответствующей первой точке перегиба, в образцах состава № 31 (СП + НЧ SiO_2), № 32 (СП + НЧ МУНТ) по сравнению с образцом состава № 30 было выше на 18,1; 10,4 %. По величине коэффициента K_1 отношение содержаний гидросиликатов со степенью поликонденсации n_4 и n_1 для образца состава № 33 было выше для образца состава № 30 на 20 % (12,6 % в возрасте 1 сут.) вследствие более высокой скорости поликонденсации ККТ кремнекислородных тетраэдров в образцах, модифицированных комбинацией наночастиц (SiO_2 + МУНТ). Содержание гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации кремнекислородных тетраэдров n_5 , соответствующих второй точке перегиба, было выше на 13,3 % в образце состава № 31 по сравнению с образцом 30. По величине коэффициента K_2 доля гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации ККТ n_5 по отношению к гидросиликатам со степенью поликонденсации n_1 выше на 24,4 % в образце № 33, по сравнению с образцом, вследствие ускорения кинетики поликонденсации ККТ и образования структур с повышенной степенью поликонденсации n_5 в присутствии комбинации наночастиц SiO_2 + МУНТ.

Вследствие этого возрастает объемная плотность укладки частиц CSH, увеличиваются модуль упругости в фазах геля, механические характеристики и трещиностойкости бетона (рисунок 3).

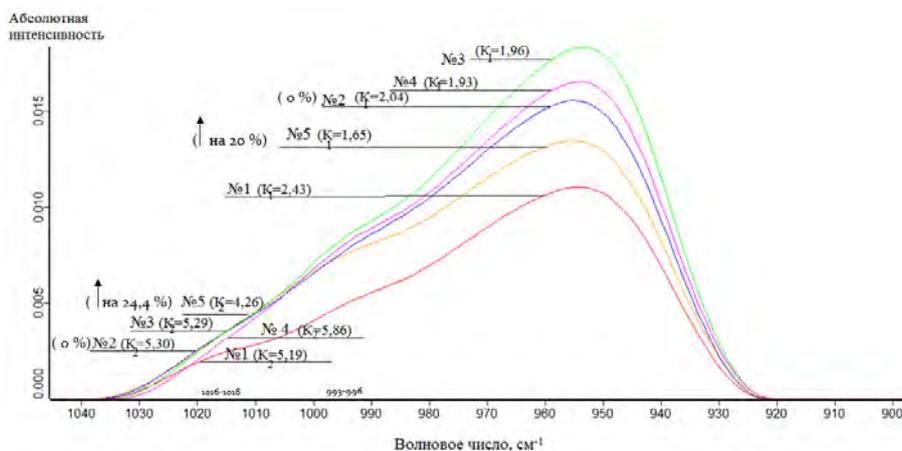
Полученные результаты показывают, что гистограммы распределения объема по приведенному модулю упругости M (и твердости H) в модифицированных образцах сдвинулись в область больших средних значений по сравнению с образцом, содержащим только СП (состав № 30). При этом уменьшилась объемная доля фазы 1 с меньшими средними значениями M (H) и возросла объемная доля фаз 2 и 3 с большими средними значениями M (H) и с более плотной объемной упаковкой частиц геля CSH, более высокой структурированности вещества геля и может быть соотнесено с различиями характеристик (E , G , ρ , f_c , f_t). Повышение модуля упругости указывает на снижение коэффициента ползучести бетона, что важно при длительном стоянии конструкции под нагрузкой.

При испытаниях комплексной добавки в бетонных составах были достигнуты необходимые по ГОСТам реологические показатели:

- подвижность по удобоукладываемости класса П4–П5 при сохранности 180 мин., для самоуплотняющихся смесей – Р6 при сохранности 120 мин.; класса по вязкости, определяемые по времени Т500 (времени, необходимому для распыла стандартного конуса бетонной смеси до диаметра 500 мм) – VS1 (1,25–2,14), класса по способности бетонной смеси преодолевать препятствия, определяемые способностью преодолевать сопротивление арматурных стержней в L-образном ящике – PA1 (0,64–0,98), класса по устойчивости к расслаиванию, определяемые при испытании бетонной смеси на устойчивость к расслаиванию с использованием сита – SR1 (2,3–10,0 %);
- раннюю прочность бетона при сжатии (f_c) увеличивали до 60 % по сравнению с добавками, используемыми на БелАЭС; прочность при сжатии в возрасте 28 суток до 39,5 %; прочность бетона при осевом растяжении доводили до 2,9 МПа; прочность бетона на растяжение (f_t) при четырехточечном изгибе до 6,5 МПа; повышение марки бетона по водонепроницаемости и морозостойкости до W20 и до F500 соответственно.



а)



б)

а) в возрасте 1 сут; б) в возрасте 28 сут для образца № 1 – контрольный, без наночастиц СМ (красный); образца № 2 – содержащего только СП СМ-SP (синий), образца № 3 – содержащего СП + НК СМ-NS8 SP50 (зеленый), образца № 4 – содержащего СП+МУНТ СМ-NC50 SP50 (розовый), образца № 5 – содержащего СП+ МУНТ+НК СМ-NC50 NS8 SP50 (оранжевый)

Рисунок 2 – Сравнение контура полосы поглощения валентных колебаний кремнекислородного тетраэдра по абсолютным интенсивностям гидратированных:

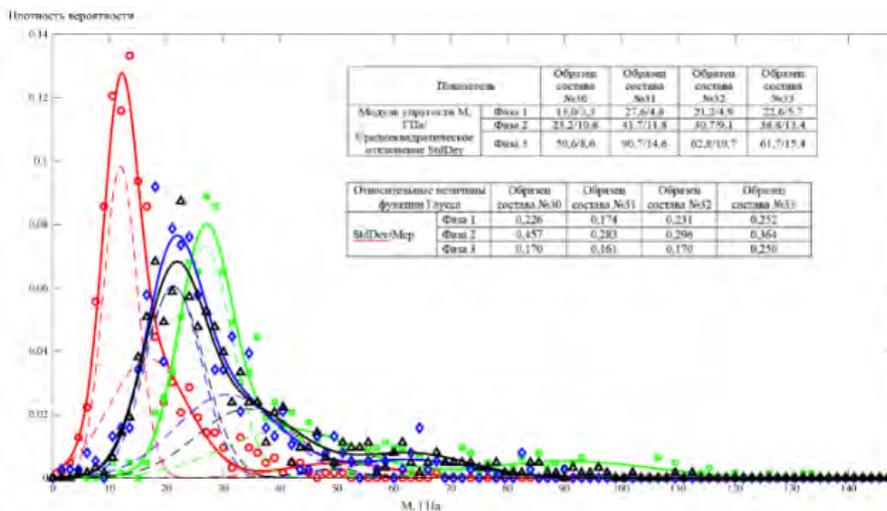


Рисунок 3 – Гистограмма распределения точек наноиндентирования по модулю упругости М для образцов в возрасте 4 месяца составов СМ- SP – № 30 (красный); СМ- NS8 SP50 – № 31 (зеленый); СМ- NC50 SP50 – № 32 (синий); СМ- NC50 NS8 SP50 – № 33 (черный)

Выявлено, что приращение прочности бетона в случае применения комбинации наночастиц SiO_2 и МУНТ превышало сумму приращений вводе наночастиц SiO_2 и МУНТ отдельно в возрасте 1 сут. до 35 %, 7 сут. – 15,0 %, 28 сут. – 14,6 %. При этом установлено, что введение комплексной добавки обеспечивает рост прочности к проектному возрасту для цементного бетона до 57 %, по сравнению с бетоном, содержащим равное количество применяемого в добавке пластификатора, и до 77 % в сравнении с бетоном без добавок.

Трещиностойкость бетона по значениям коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) K_{Ic} при нормальном отрыве для варианта ввода комбинации наночастиц SiO_2 и МУНТ по сравнению с вариантом ввода наночастиц МУНТ отдельно была выше на 15,6 %.

Заключение

На этом основании можно сделать вывод, что модифицирование структуры и улучшение свойств портландцементного бетона, за счет прямого действия комбинированной добавки на скорость формирования и характеристики структуры геля гидросиликатов кальция может привести к развитию технологии бетона.

Экспериментально обоснован механизм повышения прочности модифицированных цементных композитов комплексом методов:

- по РФА – комбинированная добавка способствуют повышению доли низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(I) и томберит-подобных структур с пониженными значениями отношения Ca/Si в составе фаз CSH-геля, повышению упорядоченности структуры наночастиц и фаз CSH-геля;
- ИК спектральным анализом за счет повышения скорости и степени полимеризации-поликонденсации кремнекислородных тетраэдров – продуктов гидратации алита, приводящей к повышению упорядоченности и однородности структуры, формы частиц CSH-геля и самого CSH-геля;
- методом упругих уз-волн повышение модулей E и G;
- методом наноиндентирования – повышением модуля упругости и твердости CSH-геля, которые прямо пропорциональны объемной плотности упаковки наночастиц.

Таким образом, за счет изменения в структуре цементного композита повысили модуль упругости, пределы прочности при сжатии и изгибе, КИН, водонепроницаемость, морозостойкость при достижении ГОСТовских показателей свежей бетонной смеси; повышение E, f, КИН создает основу для утонения конструкций и сокращения расхода портландцемента.

Список цитированных источников

1. Engineering of SiO_2 Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials / K. Sobolev [et al.] // *Nanotechnology in Construction* 3. – 2009. – P. 139–148.
2. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World / K. Sobolev, M. Ferrada Gutierrez // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2009. – P. 113–116.
3. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World// K. Sobolev, M. Ferrada Gutierrez // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2009. – P. 117–120.
4. Sobolev, K. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites / K. Sobolev, R. Hermosillo, L. M. Torres-Martinez // *Proceedings of ASI Session on «Nanotechnology Concrete: Recent Developments and Future Perspectives»*. – 2006. – P. 117–120.
5. Sanchez, F. Nanotechnology in concrete – A review / F. Sanchez, K. Sobolev // *Construction and Building Materials*. – 2010. – Vol. 24, №5. – P. 2060–2071.
6. Combinatorial molecular optimization of cement hydrates / M. J. Abdolhosseini Qomi [et al.] // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5, № 4960. – P. 1–10.
7. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement / J. Björnström [et al.] // *Chemical Physics Letters*. – 2004. – Vol. 392, № 1–3. – P. 242–248.
8. Effect of particle size of nanosilica on microstructure of C-S-H and its impact on mechanical strength / U. Sharma [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – Vol. 97. – P. 312–321.
9. Effect of Particle Size of Silica Nanoparticles on Hydration Reactivity and Microstructure of C-S-H Gel / U. Sharma [et al.] // *Advances in Civil Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 8, № 3. – P. 346–360.
10. Sharma, U. Formation of C–S–H nuclei using silica nanoparticles during early age hydration of cementitious system / U. Sharma, D. Ali, L. P. Singh // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2019. – P. 1–13.
11. Quantification and characterization of C-S-H in silica nanoparticles incorporated cementitious system / L. P. Singh [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2017. – Vol. 79. – P. 106–116.
12. Ulm, F.-J. Concrete innovation potential: from atoms to green infrastructure / F.-J. Ulm // *Beton-UND Stahlbetonbau*. – 2012. – Vol. 107. – P. 504–509.
13. A realistic molecular model of cement hydrates / R.J.M. Pellenq [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2009. – Vol. 106, № 38. – P. 16102–16107.
14. Constantinides, G. The nanogranular nature of C–S–H / G. Constantinides, F. J. Ulm // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2007. – Vol. 55, № 1. – P. 64–90.
15. Санчес, Ф. Нанотехнологии в производстве бетонов. Обзор / Ф. Санчес, К. Соболев // *Вестник ТГАСУ*. – 2013. – № 3(40). – С. 262–289.
16. Investigation of the surface structure and elastic properties of calcium silicate hydrates at the nanoscale / C. Plassard [et al.] // *Ultramicroscopy*, Elsevier. – 2004. – № 100. – P. 331–338.
17. Ulm, F.-J. Nano-Engineering of Concrete / F.-J. Ulm // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 37, № 2. – P. 481–488.
18. Modification effects of colloidal nano SiO_2 on cement hydration and its gel property / H. Pengkun [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2013. – Т 45, № 1. – P. 440–448.
19. Исследование структуры цементного композита, модифицированного гидротермальными наночастицами SiO_2 И МУНТ, методом рентгенофазового анализа / Е. Н. Полонина [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2023. № 1.
20. Механизм повышения прочности цементного материала, модифицированного наночастицами SiO_2 и МУНТ / Е. Н. Полонина [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2021. – Том 94, №1. – С. 72–83.
21. Исследование структуры цементного композита, модифицированного гидротермальными наночастицами SiO_2 И МУНТ, методом ИК-спектроскопии / Е. Н. Полонина [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2022. – № 6.
22. Применение метода наноиндентирования для изучения структуры модифицированного цементного камня/ Е. Н. Полонина [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2021. – Том 94, № 5. – С. 1221–1234.
23. Модификация цементных бетонов добавками, содержащими наноразмерные / С. А. Жданок [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2020. – Том 93, № 3 (май – июнь). – С. 669–673.
24. Юхневский, П. И. Квантово-химические расчеты структурных и энергетических характеристик молекул полиметиленафталинсульфонатного суперпластификатора цементных систем С-3 / П. И. Юхневский, В. М. Зеленковский, В. С. Солдатов // *Доклады НАН Беларуси*. – 2011. – Т. 55. № 1. – С. 71–74.
25. Юхневский, П. И. Квантово-химическое моделирование взаимодействия полиметиленафталинсульфонатов натрия (добавка С-3) с гидратированной поверхностью алита (C_3S) / П. И. Юхневский, В. М. Зеленковский, В. С. Солдатов // *Технологии бетонов*. – 2010. – № 5–6. – С. 31–33.
26. Кулагин, В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации : дис. д-ра техн. наук : 01.04.14, 01.02.05 / В. А. Кулагин. – Красноярск, 2004. – 406 с.
27. Effect of Carbon-Based Materials on the Early Hydration of Tricalcium Silicate / A. Sobolkina [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* 99. – P. 2181–2196.
28. Юхневский, П. И. Влияние молекулярно-структурного строения пластифицирующих и кремнеземсодержащих добавок на процессы гидратационного твердения и свойства цементного бетона : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.23.05 / П. И. Юхневский ; Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2014. – 44 с.
29. Юхневский, П. И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов / П. И. Юхневский. – Минск : БНТУ, 2013. – 309 с.
30. Павлова, И. П. Прогнозирование собственных деформаций и напряжений напрягающего бетона на основе структурно-механической модели расширяющегося композита : автореф.

- дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И. П. Павлова ; Брестский государственный технический университет. – Брест, 2005. – 20 с.
31. Кошевар, В. Д. Особенности реологии водных дисперсий суперпластифицированных портландцементов / В. Д. Кошевар, А. А. Ратко // Технологии бетонов. – 2021. – № 5. – С. 57–62.
 32. Impact Resistance of the Cement–Mortar Composite Modified with SiO₂ Nanoparticles and Microfiber / V. Potapov [et al.] // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 34. №. 7:04022135.
- References**
1. Engineering of SiO₂ Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials / K. Sobolev [et al.] // Nanotechnology in Construction 3. – 2009. – P. 139–148.
 2. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World / K. Sobolev, M. Ferrada Gutierrez // American Ceramic Society Bulletin. – 2009. – P. 113–116.
 3. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World// K. Sobolev, M. Ferrada Gutierrez // American Ceramic Society Bulletin. – 2009. – P. 117–120.
 4. Sobolev, K. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement compo-sites / K. Sobolev, R. Hemosillo, L. M. Torres-Martinez // Proceedings of ASI Session on «Nano-technology Concrete: Recent Developments and Future Perspectives». – 2006. – P. 117–120.
 5. Sanchez, F. Nanotechnology in concrete – A review / F. Sanchez, K. Sobolev // Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24, №5. – P. 2060–2071.
 6. Combinatorial molecular optimization of cement hydrates / M. J. Abdolhosseini Qomi [et al.] // Nature Communications. – 2014. – Vol. 5, № 4960. – P. 1–10.
 7. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement / J. Björnström [et al.] // Chemical Physics Letters. – 2004. – Vol. 392, № 1–3. – P. 242–248.
 8. Effect of particle size of nanosilica on microstructure of C-S-H and its impact on mechanical strength / U. Sharma [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2019. – Vol. 97. – P. 312–321.
 9. Effect of Particle Size of Silica Nanoparticles on Hydration Reactivity and Microstructure of C-S-H Gel / U. Sharma [et al.] // Advances in Civil Engineering Materials. – 2019. – Vol. 8, № 3. – P. 346–360.
 10. Sharma, U. Formation of C–S–H nuclei using silica nanoparticles during early age hydration of cementitious system / U. Sharma, D. Ali, L. P. Singh // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2019. – P. 1–13.
 11. Quantification and characterization of C-S-H in silica nanoparticles incorporated cementitious system / L. P. Singh [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2017. – Vol. 79. – P. 106–116.
 12. Ulm, F.-J. Concrete innovation potential: from atoms to green infrastructure / F.-J. Ulm // Beton-UND Stahlbetonbau. – 2012. – Vol. 107. – P. 504–509.
 13. A realistic molecular model of cement hydrates / R.J.M. Pellenq [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2009. – Vol. 106, № 38. – P. 16102–16107.
 14. Constantinides, G. The nanogranular nature of C–S–H / G. Constantinides, F. J. Ulm // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2007. – Vol. 55, № 1. – P. 64–90.
 15. Sanchez, F. Nanotekhnologii v proizvodstve betonov. Obzor / F. Sanchez, K. Sobolev // Vestnik TGASU. – 2013. – № 3(40). – С. 262–289.
 16. Investigation of the surface structure and elastic properties of calcium silicate hydrates at the nanoscale / S. Plassard [et al.] // Ultramicroscopy, Elsevier. – 2004. – № 100. – P. 331–338.
 17. Ulm, F.-J. Nano-Engineering of Concrete / F.-J. Ulm // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2012. – Vol. 37, № 2. – P. 481–488.
 18. Modification effects of colloidal nanoSiO₂ on cement hydration and its gel property / H. Pengkun [et al.] // Composites Part B: Engineering. – 2013. – T 45, № 1. – P. 440–448.
 19. Issledovanie struktury cementnogo kompozita, modificirovannogo gidro-termal'nymi nanochasticami SiO₂ I MUNT, metodom rentgenofazovogo analiza / E. N. Polonina [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2023. – № 1.
 20. Mekhanizm povysheniya prochnosti cementnogo materiala, modificirovannogo nanochasticami SiO₂ i MUNT / E. N. Polonina [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2021. – Tom 94, №1. – С. 72–83.
 21. Issledovanie struktury cementnogo kompozita, modificirovannogo gidro-termal'nymi nanochasticami SiO₂ I MUNT, metodom IK-spektroskopii / E. N. Polonina [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2022. № 6.
 22. Primenenie metoda nanoindentirovaniya dlya izucheniya struktury modificirovannogo cementnogo kamnya/ E. N. Polonina [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2021. – Tom 94, № 5. – С. 1221–1234.
 23. Modifikaciya cementnyh betonov dobavkami, sodержashchimi nanorazmernye / S. A. Zhdanok [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2020. – Tom 93, № 3 (maj – iyun'). – С. 669–673.
 24. Yuhnevskij, P. I. Kvantovo-himicheskie raschety strukturnyh i energeticheskikh harakteristik molekul polimetilenaftalinsulfonatnogo superplastifikatora cementnyh sistem S-3 / P. I. Yuhnevskij, V. M. Zelenkovskij, V. S. Soldatov // Doklady NAN Belarusi. – 2011. – T. 55. № 1. – S. 71–74.
 25. Yuhnevskij, P. I. Kvantovo-himicheskoe modelirovanie vzaimodejstviya poli-metilenaftalinsulfonатов natriya (dobavka S-3) s gidratirovannoj poverhnost'yu alita (S3S) / P. I. Yuhnevskij, V. M. Zelenkovskij, V. S. Soldatov // Tekhnologii betonov. – 2010. – № 5–6. – С. 31–33.
 26. Kulagin, V. A. Metody i sredstva tekhnologicheskoy obrabotki mnogokomponentnyh sred s ispol'zovaniem effektov kavitacii : dis. d-ra tekhn. nauk : 01.04.14, 01.02.05 / V. A. Kulagin. – Krasnoyarsk, 2004. – 406 с.
 27. Effect of Carbon-Based Materials on the Early Hydration of Tricalcium Silicate / A. Sobol'kina [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. 99. – P. 2181–2196.
 28. Yuhnevskij, P. I. Vliyanie molekulyarno-strukturnogo stroeniya plastificiruyushchih i kremnezemsoderzhashchih dobavok na processy gidratatsionnogo tverdeniya i svojstva cementnogo betona : avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk : 05.23.05 / P. I. Yuhnevskij ; Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – Minsk, 2014. – 44 s.
 29. Yuhnevskij, P. I. Vliyanie himicheskoy prirody dobavok na svojstva betonov / P. I. Yuhnevskij. – Minsk : BNTU, 2013. – 309 s.
 30. Pavlova, I. P. Prognozirovanie sobstvennyh deformacij i napryazhenij napryagayushchego betona na osnove strukturno-mekhanicheskoy modeli rasshiryayushchegosya kompozita : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.05 / I. P. Pavlova ; Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. – Brest, 2005. – 20 s.
 31. Koshevar, V. D. Osobennosti reologii vodnyh dispersij superplastificirovannyh portlandcementov / V. D. Koshevar, A. A. Rat'ko // Tekhnologii betonov. – 2021. – № 5. – С. 57–62.
 32. Impact Resistance of the Cement–Mortar Composite Modified with SiO₂ Nanoparticles and Microfiber / V. Potapov [et al.] // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 34. №. 7:04022135.

Материал поступил в редакцию 09.06.2022

АРХИТЕКТУРНОЕ НАСЛЕДИЕ КУБАНИ В КОНТЕКСТЕ ИСТОРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ АСПЕКТ)

О. С. Субботин

Кандидат архитектуры, доктор архитектуры РА, доцент, профессор кафедры архитектуры Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

Реферат

Исследуется исторически сложившаяся среда жизнедеятельности Кубани, включающая в себя памятники архитектурного наследия, планировку и застройку поселений, природные ландшафты. Определяются первостепенные проблемы в деле сохранения данного наследия, а также особая важность объектов, представляющих историческую ценность. Рассматриваются отдельные памятники архитектурного наследия в исторических поселениях. Раскрываются базовые факторы, влияющие на формирование «исторического пространства» населенных пунктов исследуемого региона. Предметом специального внимания является регулирование градостроительной политики в исторической среде поселений. Большое значение уделено градостроительным регламентам, устанавливаемым в указанной среде в части сохранения историко-культурного потенциала. Освещаются вопросы экологического состояния и благоустройства на исторических территориях в поселениях Кубани, а также адаптация новых объектов во взаимоотношении с существующим архитектурным наследием.

Ключевые слова: среда жизнедеятельности, историческая застройка, планировка, пространство, традиции, архитектурное наследие, сохранение, экология, потенциал, Кубань.

THE ARCHITECTURAL HERITAGE OF KUBAN IN THE CONTEXT OF THE HISTORICAL ENVIRONMENT OF LIFE (URBAN PLANNING ASPECT)

O. S. Subbotin

Abstract

The author examines the historically formed environment of the Kuban, including monuments of architectural heritage, planning and construction of settlements, natural landscapes. The primary problems in the preservation of this heritage are determined, as well as the special importance of objects of historical value. Individual monuments of architectural heritage in historical settlements are considered. The basic factors influencing the formation of the «historical space» of the settlements of the studied region are revealed. The subject of special attention is the regulation of urban planning policy in the historical environment of settlements. Great importance is given to the urban planning regulations established in this environment in terms of preserving the historical and cultural potential. The issues of the ecological state and landscaping in the historical territories in the settlements of Kuban, as well as the adaptation of new objects in relation to the existing architectural heritage are highlighted.

Keywords: living environment, historical development, layout, space, traditions, architectural heritage, conservation, ecology, potential, Kuban.

Введение

Кубань – историческая территория, отличающаяся благоприятными природно-климатическими условиями, богатым культурным наследием, уникальными археологическими, природными и архитектурными памятниками. Более того, сложно переоценить роль архитектурного наследия в историческом процессе формирования среды жизнедеятельности, особенно в территориально-пространственной организации поселений Кубани. На протяжении длительных периодов заселения региона, в результате интенсивной хозяйственной деятельности, происходит развитие и преобразование планировочной структуры населенных пунктов. Этому во многом содействовало усиление связей между территориальными образованиями, что соответственно отражалось на образе жизни населения. В градостроительном аспекте природный рельеф региона в значительной степени предопределял функциональное зонирование территорий поселений, с возможностью их рационального использования. Застройка указанных поселений осуществлялась во взаимосвязи различных градоформирующих, а именно ценных историко-архитектурных объектов с окружающим ландшафтом и инженерной инфраструктурой. При этом архитектурное наследие по-прежнему всегда оставалось и остается неотъемлемой частью исторической среды жизнедеятельности. Поэтому актуальной проблемой, равно как и первостепенной задачей современности, должно быть сохранение данного историко-культурного наследия, традиционной народной архитектуры как самобытного регионального достояния. «Здания и сооружения архитектурно-градостроительного наследия – уникальное национальное богатство нашей страны. Они играют значительную роль в планировочной структуре города, в его архитектурно-художественном облике [1, с. 35]».

Цель исследования – на основе территориально-пространственных преобразований поселений Кубани провести анализ исторической

среды жизнедеятельности с точки зрения важности сохранения архитектурного наследия.

Задачи исследования состоят в том, чтобы:

- в контексте градостроительного аспекта выявить факторы, влияющие на формирование территориального пространства в исторической среде жизнедеятельности поселений Кубани;
- раскрыть роль архитектурного наследия в эволюции населенных пунктов рассматриваемого региона как основополагающего компонента историко-культурного потенциала;
- обозначить актуальные проблемы сохранения и восстановления в исторической среде природно-экологического каркаса во взаимосвязи с архитектурным наследием.

Объектом исследования являются памятники архитектурного наследия, исторические планировки поселений и объекты природного ландшафта Кубани.

Предмет исследования – особенности и ценности архитектурного наследия в историко-пространственной среде жизнедеятельности населенных пунктов Кубани.

Методы исследования – системный; графоаналитический, в частности сравнение исторических планов поселений; историко-эволюционный анализ, комплексное изучение архивных материалов.

Историческая среда в пространственном развитии поселений

Историческая среда Кубани – сложная и в то же время уникальная градостроительная система, в которой переплетаются всевозможные материальные объекты, имеющие особую ценность и различные сферы жизнедеятельности населения – общественные, социальные, духовные и иные. Вместе с тем равновесие указанных сфер достигается надлежащей экологической обстановкой и комфортной организацией пространства в исторической среде. В настоящее время антропогенная нагрузка на историческую среду жизнедеятельности в поселениях

Кубани постоянно увеличивается, несмотря на то что экологический системный подход в решении данной проблемы достаточно высок. Разрешение большей части определенных проблем осуществляется с помощью организации единого природного и природно-антропогенного комплекса, объектов «зеленой» архитектуры, формирования экологического туризма на территориях поселений с познавательной составляющей, особенно в историческом окружении. Вместе с тем, сохранению целостности исторической ситуации поселений Кубани, в контексте общезначимой среды жизнедеятельности во многом способствует единение многонационального народа Кубани. В силу устойчивого дружественного и уважительного отношения между собой малых и больших этносов и народностей, это свойство достигается с учетом приверженности национальным традиционным ценностям и значимому культурно-историческому потенциалу.

Камертоном в организации указанной среды жизнедеятельности, с которым сравнивается ее комфортное состояние, является гармоничное сочетание: территориального пространства; природного ландшафта; комплексов, зданий и сооружений архитектурного наследия; объектов, формирующих историческую застройку, представляющих особую ценность в культурном и художественном плане. Поэтому чрезвычайно актуально беречь и преумножать существующий культурно-исторический потенциал с использованием средств духовно-нравственного воспитания и надлежащих законодательных мер, положенных в основу этих действий, не только для настоящего поколения, но и для грядущего. Потомки должны быть достойны своих прародителей, помнить свою неповторимую и национальную самобытную историю, традиционные ценности, неизменные в своих основах, т. к. без прошлого нет будущего. Историческая городская ткань и первоначальная планировочная структура, унаследованная вековой историей, формируют чувства уважения и сопричастности к архитектурному наследию (рисунок 1–3).



Рисунок 1 – Исторический план Новороссийска, 1913 г. [2, с. 343–349]

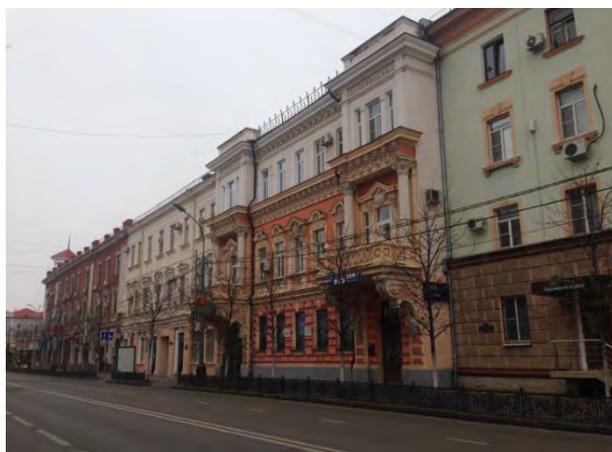


Рисунок 2 – Краснодар. Фронтальная застройка исторического квартала. Восточная сторона ул. Красной от ул. Комсомольской на север, 2019 г. Фото автора



Рисунок 3 – Армавир. Фронтальная застройка исторического квартала. Западная сторона Николаевского проспекта от ул. Бульварной на юг, 1913 г. [3]

На рисунке 3 справа представлен «особняк рыбных торговцев братьев Дегтяревых в Армави́ре (ул. Кирова, 48), имевших собственные промыслы на Каспии. Это сооружение охватило по периметру всю территорию обширной усадьбы, в результате чего образовался замкнутый двор-колодец, в который с улицы можно было попасть через металлические ворота в стиле модерн. Здесь располагались банк Первого общества взаимного кредита, Северо-Кавказский коммерческий банк, ряд магазинов и контор [4, с. 27]».

Архитектурное наследие Кубани – особый вид историко-культурного наследия региона, бережно сохраняемая «культурная память» национальной общностью южного народа. Среди разных архитектурных стилей, наряду с «русским национальным», классицизмом, модерном, неоклассицизмом, доминирующее направление в архитектуре зданий гражданского назначения принадлежит эклектике. Визуальные стилистические фасадные решения позволяли точно передать характер построенного здания в соответствии с окружающей его застройкой. «Архитекторы учитывали общий характер окружающей природы, с которой они прекрасно умели объединять свои сооружения [5, с. 69]».

«К началу XX столетия Екатеринодар (ныне Краснодар – прим. автора) превратился в оживленный красивый южный город [6, с. 346]». Особое значение при возведении объектов отводилось натуральным строительным материалам, в соответствии с унаследованными национальными традициями. Все это неизменно сказывалось на формировании исторической пространственной среды поселений, особенно в их центральной части и на качественном уровне среды жизнедеятельности. К сожалению, с течением времени часть архитектурного наследия была безвозвратно утрачена или варварски уничтожена вражескими войсками в ходе Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. «Война нанесла Краснодару огромные людские потери и колоссальные разрушения [7, с. 4]». Так были взорваны, подожжены, частично или полностью разрушены не только большинство изящных респектабельных зданий, но и двух-трехэтажные постройки в центральной части Краснодара, особенно в кварталах вдоль ул. Красной, Седина, Мира (рисунок 4).



Рисунок 4 – Екатеринодар. Угол Красной и Екатерининской ул. (северная перспектива ул. Красной). Слева – гостиница «Большая Московская». Справа – гостиница «Европейская». Начало XX в. Издательство книжного магазина Я. Ф. Ступичкина. Екатеринодар. Отпечатано в акционерном обществе «Грандберг» в Стокгольме [8]

Особенности формирования среды жизнедеятельности на исторических территориях

Необходимо отдельно подчеркнуть, что историческая среда жизнедеятельности не мыслима без представления о выдающихся памятниках архитектуры и градостроительства, ценных градоформирующих объектах, формирующих указанную среду, без связи исторических времен с становлением и развитием планировочной структуры территориального образования, с особенностями расселения населения на Кубани.

Вместе с тем значительную роль в формировании пространственно-территориальной системы исторической среды жизнедеятельности играют следующие факторы:

- географическое положение территории (равнинный или горный ландшафт местности, особенности территориального расположения поселения, его структура и организация);
- благоприятные природно-климатические условия местности, предопределяющие интенсивное градостроительное развитие территорий различных поселений;
- функциональные коммуникационные особенности, участвующие в управлении организации «исторического пространства», а именно социальная и ценностная генетическая информации;
- градо-экологическая ситуация «исторического пространства», характеризующая состояние среды жизнедеятельности, природного ландшафта с точки зрения комфортности;
- этнический состав населения – исторически сложившиеся общность людей (в том числе в отдельных территориальных образованиях), объединенная национальной культурной самобытностью;
- конфессиональный (религиозный) фактор – христианство, ислам (мусульманство), традиционные верования, имеющие свои специфические особенности и нравственные убеждения.

В большинстве своем культовые сооружения служили «своеобразным фундаментом» в становлении и формировании исторической среды жизнедеятельности. Они представляли собой уникальные памятники храмового зодчества, в градостроительной композиции им отводилась доминантная роль в исторической планировочной «структуре поселения во взаимосвязи с ландшафтом и природным окружением [9, с. 22]» (рисунок 5).



Рисунок 5 – Ейск. Кубанская область
Собор Михаила Архангела. Начало XX в.
Издатель А. В. Курило. Отпечатано в акционерном обществе «Грандберг» в Стокгольме [10]

Так расположенный в г. Ейске Михаило-Архангельский собор имел великолепный вид со всех сторон. «Собор был самым высоким зданием города. Его кресты вознеслись над Ейском на высоту около 43 метров. Золотые купола были видны за много миль от Ейского порта и служили своеобразным ориентиром для моряков. Внутреннее убранство собора поражало очевидцев своей величественностью [11, с. 15]».

Следует подчеркнуть, что памятники архитектурного наследия являются важными градостроительными элементами, которые формируют среду в урбанизированном современном пространстве. Преимущественно в большинстве своем среда жизнедеятельности центральной части поселений Кубани отображает историческую многослойность с характерными архитектурно-композиционными

особенностями. Между тем исследование показывает, что традиционное планировочное решение территориальных образований прежде всего было обусловлено их объемно-пространственной структурой на протяжении длительных периодов преемственного развития, а градостроительный аспект объединил основные функции среды жизнедеятельности поселений.

Памятники архитектуры – ключевые компоненты в планировочной структуре поселения, «обладающие уникальными по своей выразительности и природной ценности [12, с. 209]» свойствами, способствующими созданию исторического духа территории, на которой они расположены. При этом необходимо «подчеркнуть индивидуальность и художественные особенности исторических зданий, сооружений, ландшафта [13, с. 14]», которые формируют эстетическую пространственную среду населенного пункта.

Градостроительная ценность архитектурного наследия в полной мере соответствует культурному контексту, отражает особую историческую атмосферу и является хранителем национальных традиций. Градостроительное видение среды жизнедеятельности позволяет понять ее с точки зрения содержательной ретроспективы как достоверного источника памяти, несущего незыблемые и почитаемые многими поколениями традиции и обычаи, одновременно фиксирующие определенный дух и устройство общества прошедших времен, обеспечивая при этом комфорт и жизнеспособность современного мира. «Памятники зодчества прошлого и современная архитектура гармонично сочетаются в застройке городов, в едином художественном ансамбле [14, с. 218]».

Заключение

Проведенные исследования архитектурного наследия региона в контексте исторической среды жизнедеятельности дают возможность утверждать, что важнейшим вопросом в данном отношении является четкое регулирование градостроительной политики в области сохранения, восстановления и реставрации указанного наследия, а в организации территорий поселений «преемственность функционально-планировочной структуры [14, с. 237]. Особое значение следует уделять градостроительным регламентам, которые являлись бы надежным оплотом устойчивого формирования среды жизнедеятельности на исторических территориях, имеющих культурно-историческую ценность, а именно:

- модулю застройки (масштабность, высотность, плотность, приоритетная линия застройки, в частности, фронтальная и т. п.);
- морфологическим типам (панорамам) аутентичного территориального исторического пространства;
- принципиальному подходу в деле сохранения объемно-планировочной и архитектурно-пространственной композиции;
- сохранению, восстановлению и реставрации памятников архитектурного и градостроительного наследия;
- фасадным решениям новых архитектурных объектов, создающих красивую композицию в единении с общим стилевым решением;
- положениям, которые закрепляют соответствующие экологические права на благоприятную историческую среду;
- комплексным решениям по рациональной организации дорожной сети и транспортной инфраструктуры;
- формированию полноценного благоустроенного общественного пространства в исторической среде;
- надлежащему уровню градостроительного и социального контроля за состоянием исторической среды в целом.

При этом каждое из этих действий с учетом градостроительных традиций проектирования является своего рода предпосылкой для создания комфортной среды жизнедеятельности на исторических территориях, способствующая тем самым культурному и одновременно их экологическому развитию. Это также особенно важно при принятии решений по стратегическому планированию развития городских и сельских поселений, по комплексному благоустройству территорий, стационарному и мобильному озеленению, созданию точек притяжения в общественных и дворовых пространствах, организации multifunctional рекреационных зон, а именно культурного досуга, функционирования туристской инфраструктуры. Данные градостроительные и архитектурные решения, а также последовательный подход в целях устойчивого развития поселений

во взаимоотношении с природой, определяют облик будущего населенного пункта, формируют должные модели исторической ответственности, в частности сохранения природно-экологического каркаса. При этом помогают правильно оценить комфортность среды жизнедеятельности и территориального пространства, оптимальность размещения новых архитектурных объектов, в том числе с содержательным функциональным направлением. Таким образом, ценностное восприятие среды жизнедеятельности, ее идентичность в исторической застройке зависит в первую очередь от степени сохранности архитектурного наследия и от адаптации в существующее пространство новых объектов. Неправомерное включение новых объектов грозит видоизменению исторической среды, что способствует утрате ценности ее восприятия, а также утрате исторической памяти, «основанной на традиционных концепциях национального зодчества, с точки зрения ценностных ориентаций [15, с. 18]» и связи поколений. В большинстве своем первоначально градообразующей основой исторической среды поселений было фортификационное сооружение, которое со временем превратилось в начальное ядро поселения, в его исторический центр, который во многом превосходил другие территории населенного пункта по уровню благоустройства и комфорту среды жизнедеятельности, а также по количеству ценных архитектурных объектов. Наша обязанность и святой долг – беречь данное национальное богатство, передающееся нам из поколения в поколение и почитать традиции уникального народного зодчества.

Список цитированных источников

1. Субботин, О. С. Проблемы сохранения архитектурно-градостроительного наследия в условиях современного города (на примере Краснодара) / О. С. Субботин // Жилищное строительство. – 2017. – № 7 – С. 35–40.
2. Москвич, Г. Г. Иллюстрированный путеводитель по Кавказу с приложениями / Г. Г. Москвич. – Санкт-Петербург: Издательство путеводителей Григория Москвича, 1913. – 498 с.
3. Краснодарский государственный историко-археологический музей-заповедник им. Е. Д. Фелицына (КГИАМЗ им. Е. Д. ФЕЛИЦЫНА). КМ ОФ – 7511/30. Армавир. Общий вид Николаевского проспекта.
4. Ктиторов, С. Н. Лики старого Армавира. Кубанское селение на почтовой открытке начала XX века / С. Н. Ктиторов. – Краснодар : Издатель И. Платонов, 2010. – 128 с.
5. Брунов, Н. И. Мастера русского зодчества / Н. И. Брунов. – Москва : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1953. – 80 с.
6. Градостроительство России середины XIX – начала XX в. / под общей редакцией Е. И. Кириченко. – М. : Прогресс-Традиция, 2010. – Книга 3. – 616 с.
7. Субботин, О. С. Разрушенные войной памятники архитектуры Краснодара / О. С. Субботин // Жилищное строительство. – 2020. – № 8. – С. 3–8.
8. Краснодарский государственный историко-археологический музей-заповедник им. Е. Д. Фелицына» (КГИАМЗ им. Е. Д. ФЕЛИЦЫНА). КМ ОФ – 7511/150. Екатеринбург. Угол Красной и Екатерининской ул.
9. Субботин, О. С. История архитектуры православных храмов Черноморского побережья России / О. С. Субботин // Жилищное строительство. – 2013. – № 10. – С. 18–22.
10. Фото из фондов Ейского районного краеведческого музея.
11. Иванов, А. Ф. Портрет старого Ейска. Ейск в начале XX в. / А. Ф. Иванов, М. Г. Сидоренко. – Краснодар : Издатель И. Платонов, 2013. – 128 с.
12. Комплексная районная планировка / Центр. науч.-исслед. и проект. ин-т по градостроительству ; редкол. В. Н. Белоусов (отв. ред.) [и др.]. – М. : Стройиздат, 1980. – 248 с. : ил.
13. Кароза, А. И. Архитектурно-планировочная организация туристических комплексов, создаваемых на основе исторических фортификационных сооружений Беларуси : автореф. дис. ... кан. арх. : 05.23.23 / А. И. Кароза ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2017. – 24 с.
14. Чантурия, В. А. Архитектурные памятники Белоруссии / В. А. Чантурия. – Минск : Полымя, 1982. – 223 с.
15. Субботин, О. С. Не преданное забвению архитектурное наследие Краснодара: утраченное и восстановленное / О. С. Субботин // Жилищное строительство. – 2021. – № 1–2. – С. 18–25.

References

1. Subbotin, O. S. Problemy sokhraneniya arkhitekturno-gradostroitel'nogo naslediya v usloviyakh sovremennogo goroda (na primere Krasnodara) / O. S. Subbotin // Zhilishchnoye stroitel'stvo. – 2017. – № 7 – S. 35–40.
2. Moskvich, G. G. Illyustrirovanny putevoditel' po Kavkazu s prilozheniyami / G. G. Moskvich. – Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo putevoditeley Grigoriya Moskvicha, 1913. – 498 s.
3. Krasnodarskiy gosudarstvennyy istoriko-arkheologicheskiy muzey-zapovednik im. Ye. D. Felitsyna (KGIAMZ im. Ye. D. FELITSYNA). KM OF – 7511/30. Armavir. Obshchiy vid Nikolayevskogo prospekta.
4. Ktitorov, S. N. Liki starogo Armavira. Kubanskoye seleniye na pochtovoy otkrytke nachala XX veka / S. N. Ktitorov. – Krasnodar : Izdatel' I. Platonov, 2010. – 128 s.
5. Brunov, N. I. Mastera russkogo zodchestva / N. I. Brunov. – Moskva : Gos. izd-vo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture, 1953. – 80 s.
6. Gradostroitel'stvo Rossii serediny XIX – nachala XX v. / pod obshchey redaktsiyey Ye. I. Kirichenko. – M. : Progress-Traditsiya, 2010. – Kniga 3. – 616 s.
7. Subbotin, O. S. Razrushennyye voynoy pamyatniki arkhitektury Krasnodara / O. S. Subbotin // Zhilishchnoye stroitel'stvo. – 2020. – № 8. – S. 3–8.
8. Krasnodarskiy gosudarstvennyy istoriko-arkheologicheskiy muzey-zapovednik im. Ye. D. Felitsyna» (KGIAMZ im. Ye. D. FELITSYNA). KM OF – 7511/150. Yekaterinodar. Ugol Krasnoy i Yekaterininskoy ul.
9. Subbotin, O. S. Istoriya arkhitektury pravoslavnykh khramov Chernomorskogo poberezh'ya Rossii / O. S. Subbotin // Zhilishchnoye stroitel'stvo. – 2013. – № 10. – S. 18–22.
10. Foto iz fondov Yeyskogo rayonnogo krayevedcheskogo muzeya.
11. Ivanov, A. F. Portret starogo Yeyska. Yeysk v nachale XX v. / A. F. Ivanov, M. G. Sidorenko. – Krasnodar : Izdatel' I. Platonov, 2013. – 128 s.
12. Kompleksnaya rayonnaya planirovka / Tsent. nauch.-issled. i proyekt. int po gradostroitel'stvu ; redkol. V. N. Belousov (otv. red.) [i dr.]. – M. : Stroyizdat, 1980. – 248 s. : il
13. Karoza, A. I. Arkhitekturno-planirovochnaya organizatsiya turisticheskikh kompleksov, sozdavayemykh na osnove istoricheskikh fortifikatsionnykh sooruzheniy Belarusi : avtoref. dis. ... kan. arkh. : 05.23.23 / A. I. Karoza ; Belorus. nats. tekhn. un-t. – Minsk, 2017. – 24 s.
14. Chanturiya, V. A. Arkhitekturnyye pamyatniki Belorussii / V. A. Chanturiya. – Minsk : Polymya, 1982. – 223 s.
15. Subbotin, O. S. Ne predannoye zabveniyu arkhitekturnoye naslediyе Krasnodara: utrachennoye i vosstanovlennoye / O. S. Subbotin // Zhilishchnoye stroitel'stvo. – 2021. – № 1–2. – S. 18–25.

Материал поступил в редакцию 01.03.2022

МОДЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, АРМИРОВАННЫХ СТЕРЖНЯМИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В. В. Тур¹, А. П. Воробей²

¹ Д. т. н., профессор, заслуженный работник образования Республики Беларусь, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: profuturvic@gmail.com

² Магистр технических наук, ассистент кафедры архитектуры Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: mag01414@g.bstu.by

Реферат Введение

Проблема сопротивления срезу железобетонных элементов без поперечного армирования по-прежнему остаётся одной из наиболее дискуссионных в теории конструкций из бетона. Новый интерес к проблеме возник в связи применением в конструкциях из бетона в качестве продольной арматуры стержней из полимерных композитов (FRP). Рассмотрены модели сопротивления срезу, внесенные в нормативные документы и сформулированные в виде предложений для элементов, армированных стальными стержнями и стержнями из FRP. Показано, что для формулирования модели сопротивления срезу элементов, армированных FRP в качестве основы, может быть принята теория критической наклонной трещины (CSCT). Однако её положения не могут быть применены напрямую без соответствующих корректировок, в частности касающихся определения ширины раскрытия критической наклонной трещины.

Материалы и методы

Для определения сопротивления срезу самонапряженных бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, разработана модифицированная модель. Данная модель, использующая итерационную процедуру, позволяет определять отдельный вклад в полное сопротивление срезу каждой из основных его составляющих, с учетом формы потенциальной наклонной трещины, принятой в соответствии с положениями теории критической трещины среза (CSCT), а также ширины раскрытия наклонной трещины на уровне продольного армирования, определенной по закону «сцепление-проскальзывание» для FRP-стержней.

Результаты

Предложенная модифицированная модель сопротивления срезу верифицирована на фоне опытных данных, полученных как в собственных исследованиях, так и другими авторами (база данных включала 374 элемента). Основываясь на результатах параметрического исследования, предложен феноменологический критерий сопротивления срезу для гибких элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, на основе которого разработана упрощенная расчетная модель, позволяющая определять сопротивление срезу бетонных элементов, армированных FRP-стержнями, без необходимости расчета всех составляющих перерезывающей силы.

Выводы

Представленная модель сопротивления срезу гибких самонапряженных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, отражает физическую сущность явления среза, применима к различным случаям и схемам нагружения.

Ключевые слова: сопротивление срезу, закон «сцепление-проскальзывание», модель CSCT, FRP-стержни, напрягающий бетон, балочные элементы, критерий сопротивления срезу.

MODEL OF SHEAR RESISTANCE OF CONCRETE ELEMENTS REINFORCED WITH FRP BARS

V. V. Tur, A. P. Varabei

Abstract Introduction

The problem of shear resistance of reinforced concrete elements without transverse reinforcement remains, as before, one of the most controversial in the theory of concrete structures. A new interest in the problem arose in connection with the use of polymer composite (FRP) bars as longitudinal reinforcement in concrete structures. The models of shear resistance included in the regulatory documents and formulated as proposals for elements reinforced with steel bars and FRP bars are considered. It is shown that the critical shear crack theory (CSCT) can be adopted as a basis for formulating a model of shear resistance of FRP-reinforced elements. However, its provisions cannot be applied directly without appropriate adjustments, in particular, regarding the determination of the width of the opening of a critical crack.

Materials and methods

To determine the shear strength of self-stressed concrete elements reinforced with FRP bars, a modified model has been developed. This model, using an iterative procedure, makes it possible to determine a separate contribution to the total shear strength of each of its main components, taking into account the shape of the potential inclined crack, adopted in accordance with the provisions of the Critical Shear Crack Theory (CSCT), as well as the width of the opening of the inclined crack at the level of the longitudinal reinforcement, determined according to the law of "bond-slip" for FRP bars.

Results

The reliability of the proposed modified shear resistance model is confirmed by comparing the calculation results with the results of our own experimental data, and with the results of research by various authors (database). Based on the results of a parametric study, a phenomenological shear resistance criterion for flexible elements reinforced with polymer composite bars was proposed, on the basis of which a simplified design model was developed that allows determining the shear resistance of concrete elements reinforced with FRP bars without the need to calculate all components of the shear force.

Conclusions

The proposed model of shear resistance of flexible self-stressed elements reinforced with FRP bars reflects the physical essence of the shear phenomenon and is applicable to various cases and loading schemes.

Keywords: shear resistance, "bond-slip" law, CSCT model, FRP bars, expansive concrete, beam elements, shear resistance criterion.

Введение

Сопротивление срезу железобетонных элементов, в частности выполняемых без поперечного армирования, остаётся по-прежнему одной из наиболее дискуссионных проблем современной теории железобетона. Основываясь на результатах экспериментальных

исследований (к настоящему времени накоплены обширные базы данных, содержащие результаты испытаний на срез армированных бетонных элементов), предложен ряд эмпирических и полуэмпирических расчетных моделей сопротивления срезу [1–22], внесенных либо претендующих на внесение в нормативные документы. Следует

отметить, что практически все известные модели сопротивления срезу элементов без поперечного армирования не являются универсальными и показывают при определенных условиях значительные расхождения с опытными данными, что является следствием как неопределенностей собственно расчетных моделей, так и некоторых базисных переменных, включенных в модели. Новым этапом исследования феномена среза послужило применение в бетонных элементах, в качестве продольного армирования, стержней из полимерных композитов (англ. Fiber Reinforced Polymer – FRP). Однако в силу того, что стержни из полимерных композитов (за малым исключением, например, CFRP или UHCFRP) обладают специфическими механическими характеристиками (в частности, сочетанием высокой прочности при низком модуле упругости и практически линейной диаграмме « σ - ϵ »), возник закономерный вопрос о возможности применения расчетных моделей сопротивления срезу, полученных для проектирования элементов со стальным продольным армированием, к элементам, армированным FRP-стержнями.

В большинстве случаев модификацию традиционных моделей сопротивления срезу для проектирования элементов армированных FRP выполняют путём простого умножения коэффициента продольного армирования на коэффициент, определяемый как отношение модулей упругости FRP и стали, или через введение целого набора эмпирических коэффициентов. Такие подходы приняты при составлении норм ACI 440. R-03 [1], ISIS-M03-01 [2], JSCE 97 [3], GB50608-10 [4], BISE-99 [5], CNR-DT203-2006 [6], CAN/CSA-S6 [7], ACI 318-19 [8], EN2 [9], prEN2 [10], в которых расчетные модели сопротивления срезу для элементов, армированных FRP, повторяют модели элементов со стальным армированием с введением модифицирующих коэффициентов.

Другая группа полуэмпирических расчетных моделей сопротивления срезу опирается на положения модифицированной теории сжатых полей (MCFT) [23]. К ним относятся модели, внесенные в нормативные документы, такие как ACI 440. R-03 [1], ACI 440-15 [11], ISIS-M03-01 [2], GB50608-10 [4], AASHTO LRFD-2017 [12], CNR-DT203-2006 [6], CAN/CSA-S6 [7], ACI 318-19 [8], CAN/CSA-S806-2012 [13], а также расчетные модели, предложенные Danying Gao и др. [14], El-Sayed и др. [15] (является упрощением модели ACI 440. R-03 [1]), Baghi и др. [16] и Hoult и др. [17].

В расчетных моделях сопротивления срезу, включенных в стандарты ACI 440-15 [11], GB 50608-10 [4], а так же в расчетных зависимостях, полученных Danying Gao и др. [14], реализована модификация, предложенная Tureyen и Frosh [24], которая опирается на предпосылку о снижении сопротивления срезу бетонных элементов, армированных FRP-стержнями, по сравнению с элементами со стальным армированием, за счет сокращения высоты сжатой зоны сечения.

Проверка сопротивления срезу элементов без поперечного армирования, включенная в проект документа prEN1992-1-1 [10], базируется на т. н. механической модели, полученной при использовании положений теории критической трещины среза (CSCT) [25].

Зависимости для расчета сопротивления срезу бетонных элементов, армированных полимерными композитами, предложенные в работе Magi и др. [18], основаны на положениях модели «подкосы и тяжи» (англ. «strut and tie»), применение которой рационально при проектировании высоких балок и при малых пролётах среза. Применение данной модели позволяет несколько сгладить влияние размерного фактора, но даёт неоправданные запасы при проектировании гибких балок.

Nehdi и др. [19] предложена расчетная модель с использованием генетического алгоритма (англ. Genetic algorithm) на фоне базы экспериментальных данных, которая содержит 68 бетонных элементов, армированных стеклопластиковой арматурой.

Kara [20] разработал расчетную модель, опираясь на результаты испытаний 110 бетонных элементов, армированных FRP-стержнями, используя подход на основе генетического алгоритма (GA) при применении программировании экспрессии генов (GFP).

Zang и др. [21] предложено решение в замкнутой формы для расчета сопротивления срезу при использовании механики сегментарного подхода.

Ali и др. [22] была предложена модель, разработанная на основе многомерной нелинейной регрессии экспериментальных данных, с использованием степенного уравнения. Все перечисленные зависимости были подвергнуты предварительному статистическому анализу на фоне опытных данных (база данных из 374 элементов).

Принимая во внимание все недостатки и преимущества проанализированных данных предложенных расчетных моделей сопротивления срезу железобетонных элементов и бетонных элементов, армированных FRP-стержнями, была разработана модифицированная расчетная модель сопротивления срезу самонапряженных бетонных элементов, армированных FRP-стержнями, которая опирается на базовые положения теории критической трещины среза CSCT [25] и закон «сцепление-проскальзывание» для FRP-стержней, включенная в *fib* MC 2010 [26], использованный при расчете ширины раскрытия критической трещины, наклонной к продольной оси элемента на уровне продольного армирования.

Применение напрягающего бетона в элементах, армированных стержнями из полимерных композитов, связано с особенностями основных деформационных и прочностных характеристик стержней (высокая прочность при низком модуле упругости), которые оказывают существенное влияние при проверках предельных состояний эксплуатационной пригодности. Предварительное натяжение FRP-стержней физико-химическим способом позволит повысить жесткостные характеристики элемента, тем самым повысив эффективность работы армирующих стержней.

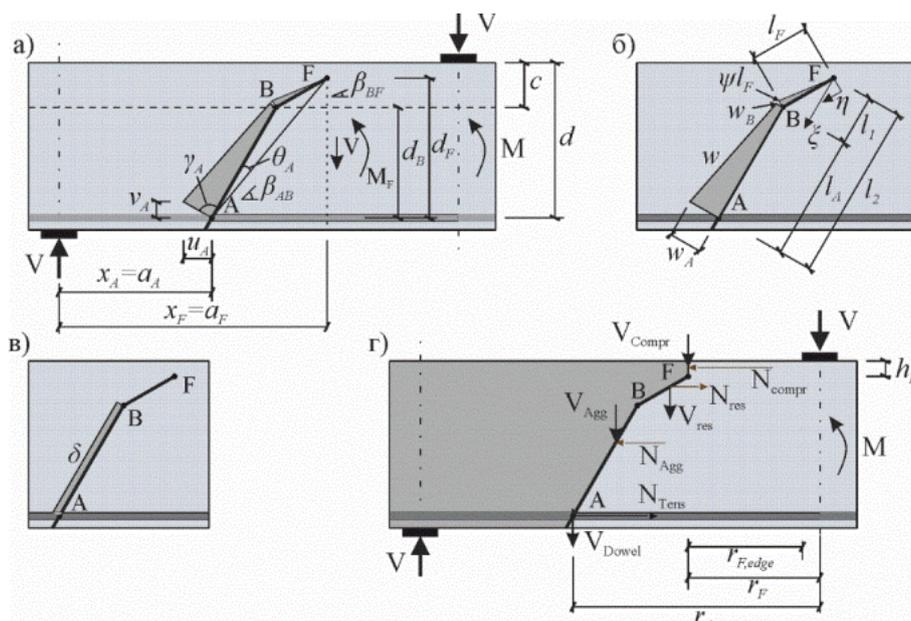
В данной статье представлена модифицированная модель сопротивления срезу самонапряженных бетонных элементов, армированных FRP, результаты верификации данной модели на фоне собственных экспериментальных данных и результатов исследований различных авторов, а также феноменологический критерий сопротивления срезу и, разработанная на его основе, упрощенная расчетная модель.

Материалы и методы

Предпосылки и допущения модели

Как следует из результатов анализа расчетных моделей, выполненного на фоне опытных данных и представленного в работе [27], наиболее рациональный подход к разработке модели сопротивления срезу гибких балочных элементах, армированных стержнями из полимерных композитов, может быть основан на положениях механической модели CSCT [28]. Согласно положениям этой модели, сопротивление срезу гибкого элемента без поперечного армирования может быть представлено как сумма наиболее значимых составляющих, включая поперечную силу, воспринимаемую за счёт остаточных растягивающих напряжений V_{Res} , сопротивление срезу за счёт зацепления по берегам трещины V_{Agg} , нагельный эффект продольной арматуры V_{Dowel} и сопротивление срезу сжатого подкоса V_{Comp} , наклонного к продольной оси элемента [29–32]. Общий вклад всех составляющих сопротивления срезу будет зависеть от формы и кинематики потенциальной критической трещины среза (рисунок 1), параметры которой были исследованы и описаны в работе [29]. Как следует из [29] все составляющие сопротивления срезу зависят в конечном итоге от одних и тех же механических параметров (прочности бетона на сжатие, эффективной высоты сечения, максимального размера зерна заполнителя и, главным образом, ширины раскрытия критической трещины).

Теория критической трещины среза (CSCT) основана на предпосылке о том, что сопротивление срезу гибкого железобетонного элемента без поперечного армирования и его деформационная способность связаны критерием разрушения, в соответствии с которым повышение деформативности (при увеличении ширины раскрытия критической трещины) ведёт к снижению сопротивления срезу. При этом одним из основных допущений модели CSCT является то, что ширина раскрытия критической трещины среза пропорциональна произведению продольных деформаций в контрольном сечении и эффективной высоты элемента $w \propto \epsilon_s \cdot d$. Следует отметить, что данная форма записи $\epsilon_s \cdot d$ предполагает равномерное распределение относительных деформаций ϵ_s на некоторой длине l_b . Другими словами принятие данного допущения равносильно тому, что в стадии установившегося трещинообразования на этом участке практически происходит проскальзывание арматуры относительно бетона. Согласно результатам исследований, представленных в [31], трещины на длине l_b (предполагается, что это расстояние практически постоянное при пиковой нагрузке [31]) могут развиваться на уровне продольной арматуры, после чего они сливаются, и сумма всех трещин, относящихся к критической трещине среза, даёт приблизительно линейный профиль горизонтальной составляющей ширины раскрытия трещины по вертикали.



а) кинематика и перемещение краёв трещины в соответствии с принятой трещиной;

б) раскрытие трещины W перпендикулярно поверхности трещины; в) скольжение трещины δ ; г) равновесие внешних и внутренних сил

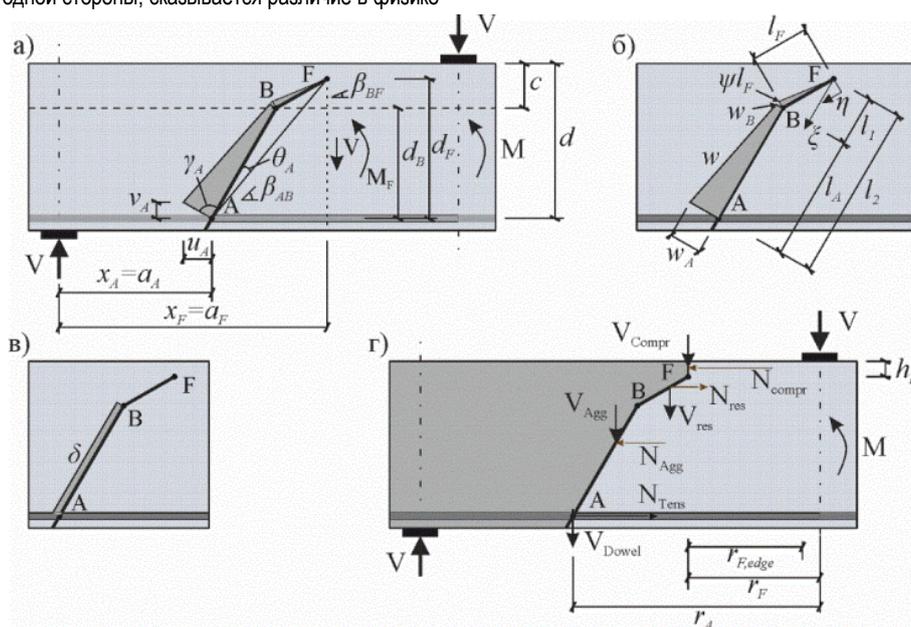
Рисунок 1 – Форма и кинематика критической трещины среза по CSCT [31]

Данное допущение, принятое в расчетной модели CSCT, связано с тем, что ширина раскрытия критической наклонной трещины примерно на уровне центра тяжести сечения имеет большее раскрытие, чем на уровне продольной арматуры [25, 33], что не позволяет рассчитывать ширину раскрытия трещины на различном уровне высоты сечения через угол поворота трещины ψ , где центр поворота находится приблизительно в вершине наклонной трещины.

Принимая во внимание, что длина l_b получена по результатам экспериментальных исследований сопротивления срезу железобетонных элементов, возникает сомнение о возможности прямого применения данной модели к бетонным элементам, армированным стержнями из полимерных композитов. В первую очередь это связано с тем, что для элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, наблюдается несколько иная картина образования и развития трещин. С одной стороны, сказывается различие в физико-

механических свойствах стержней, а с другой – свойственные стержням из полимерных композитов законы сцепления, описывающие связь между касательными напряжениями и перемещениями.

В предложенной модифицированной расчетной модели сопротивления срезу элементов, армированных FRP, предлагается определять горизонтальную составляющую ширины раскрытия наклонных трещин u_A по физическому закону «сцепление-проскальзывание» для FRP-стержней, включенную в *fib* Model Code 2010 [26], а также заменить фактическое распределение ширины раскрытия критической трещины, наклонной к продольной оси элемента w (рисунок 2а) на эквивалентное среднее значение \bar{W} (рисунок 2б). При этом, ширина раскрытия трещины w'_A будет отличаться от w_A на коэффициент k_w (рисунок 2б).



а) раскрытие трещины w перпендикулярно поверхности трещины; б) эквивалентное среднее значение \bar{W}

Рисунок 2 – Форма и кинематика наклонной трещины по предложенной модели

Расчетные уравнения

Согласно принятому закону «сцепление-проскальзывание», горизонтальная составляющая ширины раскрытия наклонных трещин u_A в зависимости от усилия (напряжения) в продольной арматуре определяется из следующего выражения:

$$u_A = 2 \cdot s(l_b), \tag{1}$$

где $s(l_b)$ – величина смещения арматурного стержня относительно бетонного блока в зависимости от длины зоны передачи напряжения вдоль продольной арматуры.

Смещение FRP-стержня относительно бетонного блока $s(l_b)$ определяется по модифицированному закону “bond-slip”, предложенного Elgehausen et al [26, 34] (рисунок 3), и процедуре определения длины передачи напряжений вдоль FRP-стержней, предложенной Cosenza et al [35].

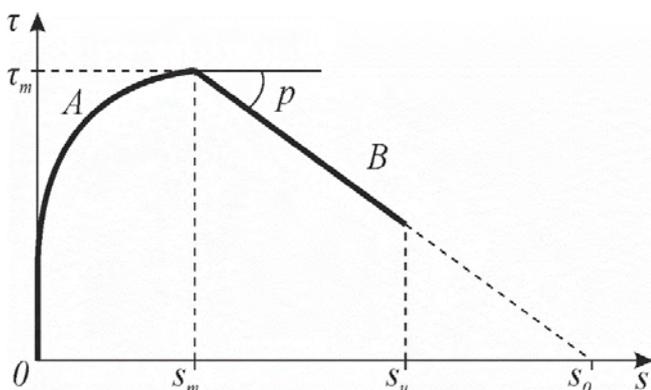


Рисунок 3 – Модифицированный закон “τ-s” [34]

В предложенной расчетной модели потенциальная трещина среза была аппроксимирована билинейной формой, состоящей из квази-вертикальной части (отрезок AB на рисунке 2) и квази-горизонтальной части (отрезок BF на рисунке 3), подобно тому, как это было принято в модели CSCT [29] (рисунок 1). Опираясь на результаты экспериментальных исследований [29], угол наклона квази-вертикального сегмента AB может быть представлен следующим выражением:

$$\beta_{AB} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{M_{Ed,A}}{V_{Ed,A} \cdot d} \right)^{1/3} \right), \tag{2}$$

где $M_{Ed,A}$ – расчётное значение изгибающего момента в расчетном сечении A от соответствующего сочетания воздействий;

$V_{Ed,A}$ – расчётная поперечная сила в расчетном сечении A от соответствующего сочетания воздействий;

Для назначенного расчетного сечения, ширину раскрытия наклонной трещины начинают с определения растягивающих напряжений в арматурных стержнях σ_s по следующей зависимости:

$$\sigma_s = \left(\frac{(M_{Ed,A} - M_{ce})}{z} + \frac{V_{Ed,A}}{2} \cdot \cot \beta_{AB} \right) \cdot \frac{1}{A_s}, \tag{3}$$

где $z = 0,9 \cdot d$;

A_s – площадь продольного армирования;

M_{ce} – момент декомпрессии, определенный с учетом начальных сжимающих напряжений.

В зависимости от значений растягивающих напряжений σ_s , выделяются два расчетных случая: 1 случай – если $0 < \sigma_s \leq \sigma_1$ (восходящая ветвь диаграммы “τ-s” (рисунок 3), где σ_1 – растягивающие напряжения в арматурных стержнях, соответствующие смещению s_m (пиковой точки диаграммы “τ-s”)); 2 случай – если $\sigma_1 < \sigma_s \leq \sigma_2$ (нисходящая ветвь диаграммы “τ-s” (рисунок 3), где σ_2 – растягивающие напряжения в арматурных стержнях, соответствующие смещению s_0 (рисунок 3)).

Значения растягивающих напряжений σ_1 и σ_2 , согласно [35], определяются по выражениям (4) и (5), соответственно.

$$\sigma_1 = \sigma(s_m) = \sqrt{\frac{8 \cdot E_f \cdot \tau_m \cdot s_m}{\varnothing \cdot (1 + \alpha)}}, \tag{4}$$

где E_f – модуль упругости FRP стержня;

\varnothing – диаметр арматурного стержня;

τ_m – максимальное напряжение сцепления, равный 14,65 МПа согласно [35];

s_m – смещение, соответствующее максимальному напряжению сцепления, равный 0,253 мм по [179];

α – параметр модифицированного закона “τ-s”, равный 0,245 согласно [35].

$$\sigma_2 = \sigma(s_0) = \sqrt{\frac{8 \cdot E_f \cdot A_{\tau,max}}{\varnothing}}, \tag{5}$$

где $A_{\tau,max} = \frac{\tau_m \cdot s_m}{1 + \alpha} + \frac{\tau_m \cdot s_m}{\rho}$, \tag{6}

ρ – параметр модифицированного закона “τ-s”, равный 0,128 согласно [35].

Первый случай ($0 < \sigma_s \leq \sigma_1$)

Значение величины смещения $s(l_b)$, соответствующее напряжениям в арматурных стержнях $0 < \sigma_s \leq \sigma_1$, определяется по следующему выражению, согласно [35]:

$$s(l_b) = \left[\frac{2 \cdot \tau_m}{E_f \cdot \varnothing \cdot s_m^\alpha} \cdot \frac{(1 - \alpha)^2}{(1 + \alpha)} \right]^{1/(1-\alpha)} \cdot l_b^{2/(1-\alpha)} \leq s_m, \tag{7}$$

где l_b – длина зоны передачи напряжений вдоль продольной арматуры, которая определяется по зависимости (9):

$$l_b = l_0 \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_s} \right)^{2 \cdot \alpha / (1 + \alpha)} \cdot \left[\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right], \tag{8}$$

$$l_0 = l_0(\sigma_s) = \frac{\varnothing \cdot \sigma_s}{4 \cdot \tau_m}, \tag{9}$$

Далее горизонтальная составляющая ширины раскрытия наклонной трещины u_A определяется по выражению (1).

Второй случай ($\sigma_1 < \sigma_s \leq \sigma_2$)

В этом случае величина смещения определяется из следующего выражения, согласно [35]:

$$s(l_b) = \frac{1}{\rho} \left[1 + p \cdot \cos(w \cdot (l_b - l_m)) + \sqrt{\frac{2 \cdot p}{1 + \alpha}} \cdot \sin(w \cdot (l_b - l_m)) \right] \cdot s_m, \tag{10}$$

$$\text{где } w = \frac{1}{l_m} \cdot \sqrt{2 \cdot p} \cdot \frac{(1+\alpha)}{(1-\alpha)}, \quad (11)$$

$$l_m = \frac{\sigma_1 \cdot \varnothing \cdot (1+\alpha)}{4 \cdot \tau_m \cdot (1-\alpha)}, \quad (12)$$

$$l_b = l_m \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{(1-\alpha)^2}{2 \cdot p \cdot (1+\alpha)}} \cdot \left(\arcsin \sqrt{\frac{A_{\tau_2}}{A_{\tau_{max}}}} - \arcsin \sqrt{1 - \frac{\varnothing \cdot \sigma_s^2}{8 \cdot E_f \cdot A_{\tau_{max}}}} \right) \right], \quad (13)$$

Как и в первом случае горизонтальная составляющая ширины раскрытия наклонной трещины u_A определяется по выражению (1).

Далее определяется ширина раскрытия наклонной трещины w_A в выбранном сечении по следующей зависимости:

$$w_A = u_A \cdot \sin \beta_{AB}, \quad (14)$$

Исходя из допущения, что $w \approx \bar{w}$, изложенном ранее (рисунок 2), ширина раскрытия трещины, наклонной к продольной оси на уровне продольной арматуры заменяется эквивалентным средним значением ширины раскрытия w'_A :

$$w'_A = w_A \cdot k_w, \quad (15)$$

где k_w – коэффициент, принимаемый для определения эквивалентного среднего значения ширины раскрытия наклонной трещины. Опираясь на результаты собственных экспериментальных данных [36], которые подтверждают положение, принятое в расчетной модели, что ширина раскрытия наклонной трещины больше примерно на уровне центра тяжести сечения, чем на уровне продольной арматуры, было выявлено, что независимо от типа армирования коэффициент $k_w = 2,7$.

Стоит отметить, что согласно результатам собственных экспериментальных исследований [36], данная особенность раскрытия наклонной трещины была зафиксирована в балочных элементах, армированных FRP-стержнями и стальной арматурой, независимо от наличия самоупрочнения бетона и схемы нагружения [36].

Принимая во внимание форму и кинематику трещины, наклонной к продольной оси (рисунок 2), а также допущения, принятые в расчетной модели, определяется вклад всех составляющих сопротивления срезу элементов, армированных FRP-стержнями (остаточные растягивающие напряжения бетона V_{Res} , зацепления по берегам наклонной трещины V_{Agg} , нагельный эффект V_{Dowel} и наклонный сжатый бетонный подкос V_{Comp}), с учетом эквивалентного среднего значения ширины раскрытия наклонной трещины w'_A .

Остаточные растягивающие напряжения бетона

Так, для определения остаточных растягивающих напряжений бетона используется зависимость Reinhardt [37], которая также принята и в расчетной модели CSCT [25] и имеет следующий вид:

$$\sigma_{res} = f_{ct} \cdot \left(1 - \left(\frac{w}{w_c} \right)^{0,31} \right), \quad (16)$$

где w_c – максимальная ширина раскрытия трещины для передачи напряжений, определяемая по следующему выражению [37]:

$$w_c = \frac{G_F}{f_{ct}} \cdot \frac{(1+0,31)}{0,31}, \quad (17)$$

В выражении (18) энергия разрушения бетона G_F может быть рассчитано в соответствии с *fib Model Code 2010* [26] по следующему выражению:

$$G_F = 0,073 \cdot f_c^{0,18}, \quad (18)$$

где f_c – цилиндрическая прочность бетона при сжатии.

В выражениях (16–17) прочность бетона при растяжении f_{ct} зависит от цилиндрической прочности бетона при сжатии и определяется по следующему выражению:

$$\begin{aligned} f_{ct} &= 0,3 \cdot f_c^{2/3}, \quad \text{при } f_c < 50 \text{ МПа} \\ f_{ct} &= 0,3 \cdot (50 \cdot f_c)^{1/3}, \quad \text{при } f_c \geq 50 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (19)$$

Стоит отметить, что остаточные растягивающие напряжения бетона интегрируются по квази-горизонтальному участку BF (рисунок 2):

$$V_{Res} = \int_0^{l_{F1}} \sigma_{res} \cdot b \cdot \cos \beta_{BF} \cdot d\eta, \quad (20)$$

где b – ширина элемента;

β_{BF} – угол наклона квази-горизонтального участка наклонной трещины. Согласно модели CSCT [25] угол $\beta_{BF} = 22,5^\circ$;

η – переменная интегрирования;

l_{F1} – предел интегрирования;

При интегрировании напряжений возможно два случая [25]: 1) когда нормальные напряжения развиваются по всей длине сегмента BF (рисунок 3), тогда $l_{F1} = l_F$; 2) когда нормальные напряжения развиваются только вблизи вершины трещины ($w_B \geq w_c$, рисунок 2), тогда l_{F1} определяется по выражению:

$$l_{F1} = \frac{w_c}{w_B} \cdot l_F, \quad (21)$$

где l_F – длина квази-горизонтального сегмента наклонной трещины BF (рисунок 2). Согласно модели CSCT [25] $l_F = d / 6$ (d – эффективная высота сечения элемента);

w_B – ширина раскрытия квази-горизонтального сегмента наклонной трещины BF (рисунок 2). В расчетной модели ширина раскрытия w_B зависит от ширины раскрытия наклонной трещины на уровне продольной арматуры и определяется как

$$w_B = k_A \cdot w_A, \quad (22)$$

где k_A – коэффициент, связывающий ширину раскрытия квази-горизонтального сегмента трещины BF и ширину раскрытия наклонной трещины на уровне продольного армирования. По результатам исследования восемнадцати наклонных трещин, образованных в ходе статических испытаний балочных элементов при различных условиях нагружения [36], было определено, что среднее значение коэффициента $k_A = 0,9$ независимо от типа армирования и наличия самоупрочнения бетона.

Интегрируя выражение (20) с учетом выражения (21), вклад остаточных растягивающих напряжений бетона в сопротивление срезу примет следующий вид:

$$V_{Res} = \frac{I_F \cdot b \cdot \cos \beta_{BF} \cdot G_F}{w_B}, \quad (23)$$

Зацепление по берегам наклонной трещины

Составляющая поперечной силы V_{Agg} воспринимаемая за счет зацепления по берегам наклонной трещины может составлять от 22 до 59 % от полной поперечной силы $V_{C,R}$. В связи с данным явлением существует множество различных моделей, описывающих напряженное состояние контакта, которые подробно рассмотрены в монографии [38]. В основном все исследуемые модели, изложенные в работе [39], рассматривают зависимость между нормальными и касательными напряжениями, воспринимаемыми сечением с трещиной как функцию от нормальных и тангенциальных перемещений, развивающихся в плоскости скольжения.

Одним из таких подходов, который базируется на работах Warlaven и Reinhardt [40] и собственных экспериментальных данных, является параболическая зависимость, предложенная Vecchio и Collins [23]. Данная зависимость, связывающая нормальные σ и касательные τ напряжения, действующие в сечении с трещиной, имеет следующий вид:

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = 0,18 + 1,64 \cdot \frac{\sigma}{\tau_{max}} - 0,82 \cdot \left(\frac{\sigma}{\tau_{max}} \right)^2, \quad (24)$$

где $\tau_{max} = \frac{\sqrt{f_c}}{0,3 + \frac{24 \cdot w}{16 + d_g}}$, (25)

d_g – максимальный размер крупности заполнителя бетона.

Учитывая то обстоятельство, что в большинстве практических случаев эффект от действия на плоскость скольжения нормальных сжимающих напряжений σ при расчете сопротивления срезу элементов не существенный, предложено упрощенная форма определения касательных напряжений [39]:

$$\tau = 0,18 \cdot \tau_{max}, \quad (26)$$

Принимая во внимание форму и кинематику наклонной трещины (рисунок 2б) и допущения, принятые в расчетной модели, а также уравнения (25) – (26), составляющая поперечной силы V_{Agg} , воспринимаемая за счет зацепления по берегам наклонной трещины, примет следующий вид:

$$V_{Agg} = \frac{0,18 \cdot \sqrt{f_c}}{0,3 + \frac{24 \cdot w_A}{16 + d_g}} \cdot b \cdot l_A \cdot \sin \beta_{AB}, \quad (27)$$

где l_A – длина квази-вертикального сегмента АВ наклонной трещины (рисунок 2б), которая определяется как

$$l_A = \frac{d - c}{\sin \beta_{AB}}, \quad (28)$$

Стоит отметить, что касательные напряжения не учитываются на квази-горизонтальном сегменте ВF наклонной трещины (рисунок 2), так как их влияние будет весьма незначительным [25].

Нагельный эффект

Нагельный эффект образуется за счет относительного вертикального смещения между поверхностями трещины на уровне продольной арматуры [30]. Способность нагельного эффекта передавать

поперечное усилие определяется как эффективная площадь бетона вблизи арматурных стержней воспринимать растягивающие усилия. Исходя из исследований, изложенных в работе [25], составляющая поперечной силы V_{Dowel} воспринимаемая за счет нагельного эффекта и определяется из следующей зависимости:

$$V_{Dowel} = k_b \cdot f_{ct} \cdot n \cdot (b / n - \emptyset) \cdot 2 \cdot \emptyset \leq V_{Sh,dow}, \quad (29)$$

где n – количество арматурных стержней в сечении;

$V_{Sh,dow}$ – сопротивление срезу арматурных стержней из полимерных композитов, определяемое по формуле:

$$V_{Sh,dow} = \tau_{sh} \cdot (2 \cdot A_s), \quad (30)$$

где A_s – площадь продольного армирования;

τ_{sh} – предельное напряжение при поперечном срезе;

k_b – коэффициент снижения прочности при растяжении бетона, который зависит от растягивающихся деформаций в продольных стержнях армирования и, согласно [25], определяется как

$$0,25 \leq k_b = 0,063 \cdot \varepsilon_s^{-1/4} \leq 1, \quad (31)$$

Опираясь на результаты исследования, представленных в работе [41], и учитывая, что стержни из полимерных композитов всегда работают упруго, коэффициент k_b имеет нижнюю границу, равную 0,25.

Сопротивление наклонного сжатого бетонного подкоса

Одной из составляющих сопротивления срезу бетонных элементов, армированных FRP-стержнями, является вклад наклонного сжатого бетонного подкоса. Его сопротивление оказывает существенное влияние в гибких балках (пролет среза $a / d \geq 2,5$) в основном перед распространением сегмента ВF наклонной трещины (рисунок 1) в зоне сжатого бетона, а затем постепенно уменьшается по мере того, как наклон сжатого подкоса становится довольно пологим.

Однако для жестких балок (с пролетом среза $a / d < 2,5$) основным составляющим сопротивления срезу является арочный эффект. Базируясь на результатах исследования, представленных в работе [25], в расчетной модели сопротивления срезу элементов, армированных FRP-стержнями, составляющая поперечной силы V_{Compr} воспринимаемая за счет наклонного сжатого бетонного подкоса, принята расчетная зависимость, изложенная в CSCT [25], которая имеет следующий вид:

$$V_{Compr} = \frac{k_{c1} \cdot h_F / r_F}{1 - k_{c1} \cdot h_F / r_F} \cdot (V_{Res} + V_{Agg} + V_{Dowel}), \quad (32)$$

где $k_{c1} = 0,5$ [25];

h_F – высота от вершины наклонной трещины F до верхней грани элемента (рисунок 1), определяется по формуле

$$h_F = d - d_F, \quad (33)$$

здесь $d_F = d - c + l_F \cdot \sin \beta_{BF}$, (34)

l_F – расстояние от вершины наклонной трещины F до оси приложения нагрузки (рисунок 1). Данное расстояние зависит от условий приложения нагрузки [25] и определяется по следующей зависимости:

– при действии сосредоточенной нагрузки

$$l_F = a - a_F, \quad (35)$$

– при действии равномерно-распределенной нагрузки

$$r_F = (L / 2 - a_F) / 2, \quad (36)$$

здесь a – расстояние от оси опоры элемента до оси приложения сосредоточенной нагрузки;

L – длина пролета, в котором приложена равномерно-распределенная нагрузка;

a_F – расстояние от оси опоры до вершины наклонной трещины F (рисунок 2) и определяется следующим образом:

$$a_F = a_A + l_A \cdot \cos \beta_{AB} + l_F \cdot \cos \beta_{BF}, \quad (37)$$

здесь a_A – расстояние от оси опоры до расчетного сечения A (рисунок 2).

Процедура расчета сопротивления срезу бетонных элементов, армированных FRP-стержнями, по предложенной модели

Итерационная процедура для расчета сопротивления срезу бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, включает следующие шаги:

- 1) выбрать положение критического сечения a_A по длине элемента (рисунок 2);
- 2) принять значение расчетной поперечной силы в сечении A ($V_{Ed,A}$);
- 3) рассчитать угол наклона трещины β_{AB} по выражению (2);
- 4) рассчитать горизонтальную составляющую ширины раскрытия наклонной трещины u_A (выражение (1)) в выбранном сечении A по предложенной процедуре (выражения (3–13) в зависимости от усилия (напряжения) в продольной арматуре;
- 5) рассчитать ширину раскрытия наклонной трещины W_A на уровне продольной арматуры (выражение (14)), которая в дальнейшем заменяется эквивалентным средним значением ширины раскрытия w'_A (выражение (15));
- 6) в зависимости от формы трещины и её кинематики (рисунок 2) рассчитать составляющие сопротивления срезу V_{Res} , V_{Agg} , V_{Dowel} и V_{Comp} по положениям, принятым в расчетной модели (выражения (16–37), с учетом эквивалентной средней ширины раскрытия наклонной трещины, определенной в пункте 5.

Суммарная перерезывающая сила определяется по следующему выражению:

$$V_{C,R} = V_{Res} + V_{Agg} + V_{Dowel} + V_{Comp}, \quad (38)$$

7) Сравнить $V_{Ed,A} = V_{C,R}$. В случае невыполнения данного условия перейти к шагу 2.

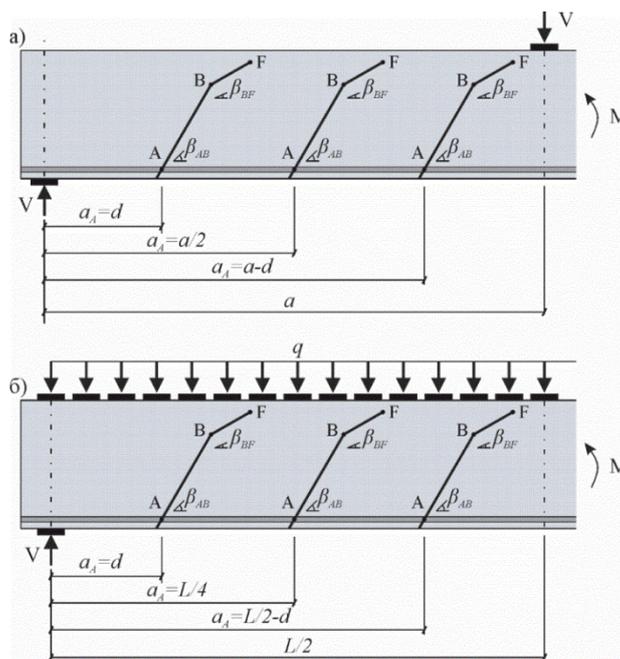
Данная итерационная процедура проводится для различных сечений элемента $a_{A,i}$ по длине пролета элемента и выбирается минимальное значение $V_{C,R}$, которое и будет предельным значением перерезывающей силы бетонного элемента, армированного FRP-стержнями.

Преимуществом данного подхода является то, что его можно применять к общим или более сложным случаям и к различным условиям нагружения. Это достигается путем учета влияния основных определяющих механических параметров (расположение расчетного сечения, раскрытие трещины, коэффициент армирования, механические характеристики FRP-армирования, размер заполнителя, прочность бетона на сжатие) и определения вклада различных составляющих сопротивления срезу.

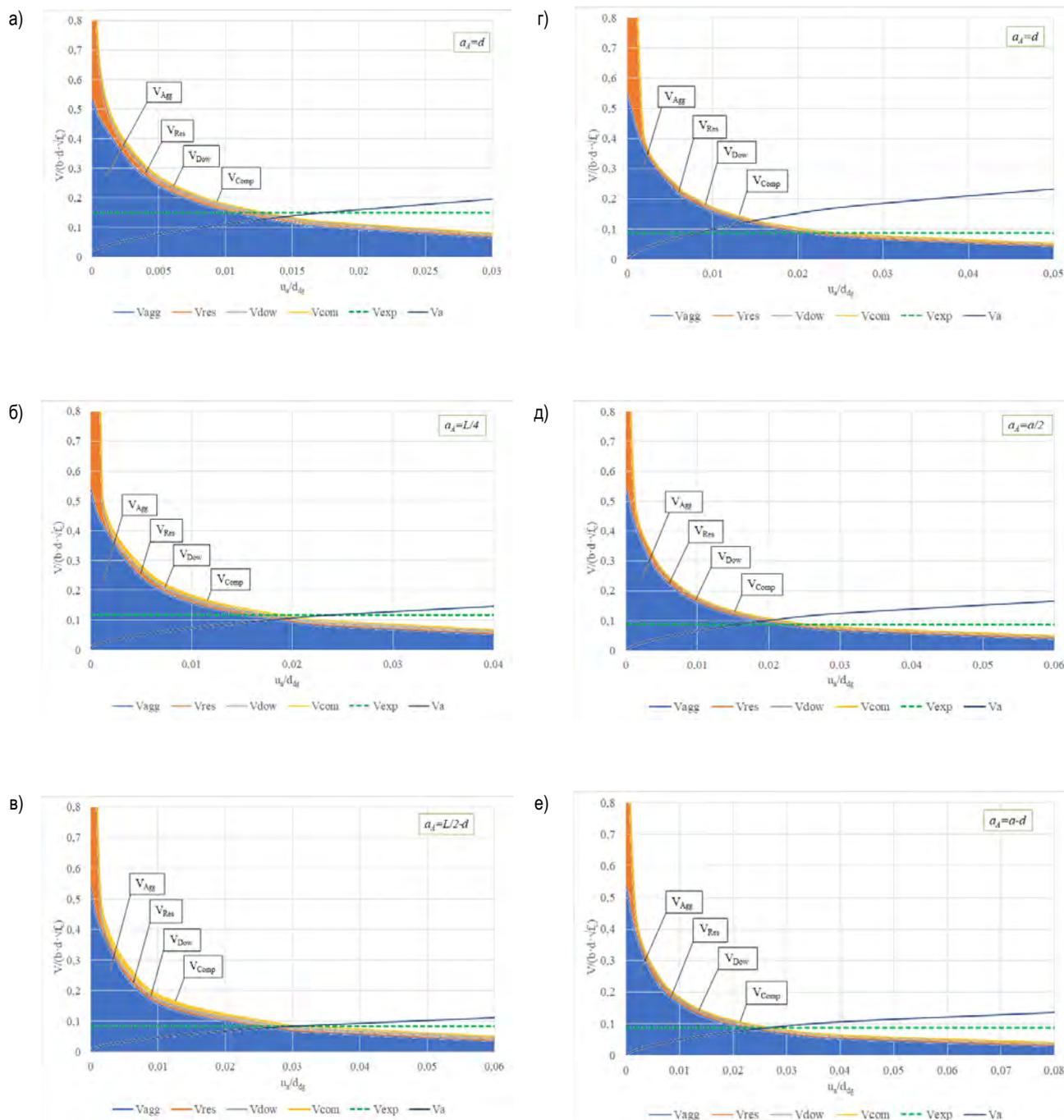
Результаты исследования

Для определения расположения расчетного сечения a_A (рисунок 2) были проведены исследования трех различных положений наклонной трещины по длине пролета в зависимости от схемы нагружения (рисунок 4), базируясь на результатах собственных экспериментальных данных, изложенных в работе [36].

Расчет составляющих перерезывающей силы для различных сечений опытных балок [36] был произведен согласно изложенной процедуре расчета сопротивления срезу бетонных элементов, армированных FRP-стержнями. На рисунке 5 представлены результаты расчета всех составляющих сопротивления срезу для сечений ($a_A = d$, $a_A = L / 4$ и $a_A = L / 2 - d$) балки Б1-2СД18 [36], нагруженной равномерно-распределенной нагрузкой в пролете, и для сечений ($a_A = d$, $a_A = a / 2$ и $a_A = a - d$) балки Б11-3СД12 [36], нагруженной сосредоточенной силой в консоли.



а) элемент, нагруженный сосредоточенной силой; б) элемент, нагруженный равномерно-распределенной нагрузкой
Рисунок 4 – Потенциальное положение наклонной трещины a_A по длине пролета при различных схемах нагружения



Расчетные сечения балки Б1-2СД18:
 а) $a_A = d$; б) $a_A = L/4$; в) $a_A = L/2 - d$ и балки Б11-3СД12;
 г) $a_A = d$; д) $a_A = a/2$; е) $a_A = a - d$

Рисунок 5 – Критерий разрушения и кривая «нагрузка-деформации» для расчетных сечений опытных балок; составляющие сопротивления срезу: зацепления по берегам трещины, остаточные напряжения растяжения; нагельный эффект и сжатая зона бетона

В таблице 1 представлены результаты сравнения значений перерезывающих сил, рассчитанных по предложенной процедуре, с результатами экспериментального исследования [36] для различных сечений

вдоль пролета опытных балок, армированных стержнями из полимерных композитов.

Таблица 1 – Сравнение теоретических значений сопротивления срезу по предложенной процедуре с экспериментальными данными [36] при различных расчетных сечениях вдоль пролета балочных элементов, армированных FRP

Название балок Name of beams	Тип армирования Reinforcement type	Сечение, мм Cross section, mm	V_{theo} , кН kN	V_{exp} , кН kN	V_{exp}/V_{theo}
1	2	3	4	5	6
БI-1СД18П (без нагрузки консоли) (without console loading)	GFRP	d=270	32,38	49,73	1,54
		L/4=420	24,0	36,65	1,53
		L/2-d=570	17,21	23,56	1,37
БI-2СД18	GFRP	d=270	32,87	36,02	1,10
		L/4=375	26,17	28,14	1,08
		L/2-d=480	20,45	20,26	0,99
БII-3СД12	GFRP	d=270	36,57	24,52	0,67
		a/2=450	29,26	24,52	0,84
		a-d=630	24,87	24,52	0,99
БII-4УД12	CFRP	d=270	36,09	24,52	0,68
		a/2=450	28,90	24,52	0,85
		a-d=630	24,76	24,52	0,99
БV-9СС16,5	GFRP	d=270	29,76	32,38	1,09
		L/4=375	23,64	25,30	1,07
		L/2-d=480	18,38	18,22	0,99
БV-10СС16,5	GFRP	d=270	33,27	18,48	0,56
		a/2=450	26,51	18,48	0,70
		a-d=630	22,48	18,48	0,82
БVI-12СПЦ	GFRP	d=270	28,04	29,09	1,04
		L/4=375	22,39	22,73	1,02
		L/2-d=480	17,45	16,36	0,94
БVII-13СС16,5	GFRP	d=270	32,24	21,94	0,68
		a/2=450	25,78	21,94	0,85
		a-d=630	21,93	21,94	1,0
БVIII-15СПЦ	GFRP	d=270	38,98	29,72	0,76
		a/2=230	30,76	29,72	0,97

Из рисунка 5 видно, что вклад в сопротивление срезу составляющей поперечной силы за счёт зацепления по берегам трещины является основным для всех исследованных положений наклонной трещины. Исходя из результатов сравнения теоретических значений сопротивления срезу с экспериментальными данными [36], представленных в таблице 1, можно сделать заключение, что расположение расчетного сечения по длине элемента, нагруженного сосредоточенными силами, будет находиться ближе к оси приложения нагрузки $a_A = a - d$. Также установлено, что при действии равномерно-распределенной нагрузки в пролете балки, армированной стержнями из полимерных композитов, расчетное сечение будет располагаться ближе к середине пролета балки ($a_A = L / 2 - d$).

Предложенная модель сопротивления срезу показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными. Так, для балок с пролетом среза $a/d \geq 2,5$ (а также нагруженных равномерно-распределенной нагрузкой) и расчетным сечением $a_A = a - d$ ($a_A = L/2 - d$) параметры ошибки моделирования составили: среднее $V_{Rd,exp} / V_{R,theo} = 0,93$, при $V_x = 26,8\%$.

Стоит отметить, что дисперсия результатов связана с принятием в расчетной модели в рамках диссертационного исследования постоянных значений параметров модифицированного закона «сцепление-проскальзывание» (ρ и α), а также величин максимального напряжения сцепления τ_m и смещения (S_m), независимо от типа, формы и характеристик поверхности стержней FRP.

Феноменологический критерий сопротивления срезу бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, на основе предложенной механической модели

Несмотря на то, что предложенная модель обеспечивает приемлемую точность расчета сопротивления срезу (таблица 1), для целей

проектирования вместо расчета составляющих сопротивления срезу путем интегрирования напряжений вдоль критической трещины среза был предложен гиперболический критерий сопротивления срезу и на его основе упрощенная расчетная модель.

Критерий сопротивления срезу был получен на фоне собственных экспериментальных исследований (8 балок), представленных в [36], и базы данных (301 балок) [42], аппроксимацией степенного выражения

$$\frac{\tau}{\sqrt{f_c}} = \frac{V}{b \cdot d \cdot \sqrt{f_c}} = k \cdot \left(\frac{u_A}{d_{dg}} \right)^{-3/4}, \quad (39)$$

где $k = 0,0056 \text{ МПа}^{+0,5}$ (рисунок 6).

На рисунке 6 синие точки и красные перекрестия представляют собой пересечения критериев разрушения, рассчитанных, согласно предложенной процедуре, в расчетном сечении $a_A = a - d$ для балочных элементов с пролетом среза $a/d \geq 2,5$ и зависимости «нагрузка – ширина раскрытия трещины».

Как видно из рисунка 6, полученный критерий для элементов, армированных стержнями FRP, имеет отличие от аналитического описания критерия модели CSCT [25] в случае применения арматуры из стальных стержней. Отличием в критерии (39) является значение степени (-3/4) и коэффициента $k = 0,0056$ (для стальных стержней по результатам аппроксимации степень (-1/2) и $k = 0,019$ [43]). При использовании критерия разрушения (39) при расчете сопротивления срезу бетонных элементов, армированных FRP, горизонтальная составляющая ширины раскрытия наклонной трещины u_A определяется по зависимостям (1) – (13).

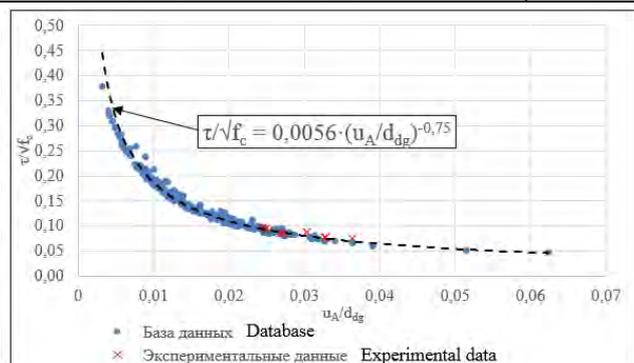


Рисунок 6 – Критерий сопротивления срезу по предложенной модели на фоне экспериментальных данных

Упрощенный вариант модели сопротивления срезу, разработанный на основе феноменологического критерия (39), примет следующий вид:

$$V = 0,0056 \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{f_c} \cdot \left(\frac{u_A}{d_{dg}} \right)^{-3/4}, \quad (40)$$

Предложенная модель сопротивления срезу показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными (рисунок 7). Так, для балок с пролетом среза $a/d \geq 2,5$ и расчетным сечением $a_A = a - d$ параметры ошибки моделирования составили: среднее $V_{Rd,exp} / V_{R,theo} = 0,98$, при $V_x = 26,61\%$.

Исходя из результатов сравнительного анализа моделей сопротивления срезу бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов [1–22], представленного в таблице 2, предложенная модель не уступает по точности с наиболее применимыми существующими моделями, однако имеет ключевое отличие, которое отражает физическую сущность явления среза и позволяет определить ширину раскрытия наклонной трещины с учетом распределения смещений, нормальных напряжений и напряжений сцепления вдоль арматурного стержня, а также позволяет определить длину зоны передачи напряжений. По сравнению с существующими моделями [1–22], предложенная процедура адекватно оценивает сопротивление срезу бетонным элементам, армированным FRP, при действии в пролете распределенной нагрузки (таблица 1).

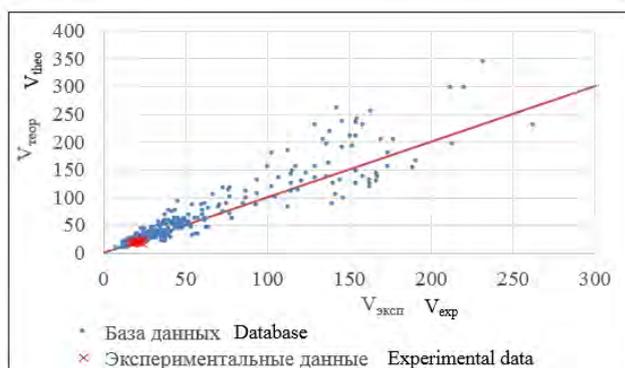


Рисунок 7 – Сравнение теоретических значений сопротивления срезу по предложенной процедуре (при $a_A = a - d$) с базой данных [42] и экспериментальными данными [36]

Таблица 2 – Результаты сравнительного анализа сопротивления срезу балок без поперечного армирования ($a/d \geq 2,5$)

Расчетные методы (Design model)	Среднее (Mean)	Медиана (Median)	Стандартное отклонение (Standard deviation)	Коэффициент вариации (Coefficient of variation)	Минимальное значение (Minimum)	Максимальное значение (Maximum)
	V_{exp}/V_{theo}	V_{exp}/V_{theo}	V_{exp}/V_{theo}	$V_{exp}/V_{theo}, \%$	V_{exp}/V_{theo}	V_{exp}/V_{theo}
1	2	3	4	5	6	7
ACI 440. R-03 [1]	2,29	3,53	2,42	55,68	0,99	14,45
ACI 440-15 [11]	1,60	1,79	0,53	26,59	0,72	4,87
ISIS-M03-01 [2]	1,70	2,01	0,67	37,76	0,52	4,65
JSCE 97 [3]	1,24	1,25	0,33	23,93	0,51	3,02
CAN/CSA-S806-2012 [13]	0,91	0,95	0,22	23,88	0,34	1,97
El-Sayed и др. [15]	1,14	1,26	0,32	24,05	0,48	3,14
GB50608-10 [4]	1,36	1,57	0,46	26,78	0,63	4,12
BISE-99 [5]	1,08	1,12	0,29	25,02	0,42	2,81
Danying Gao и др. [14]	0,84	0,97	0,30	28,60	0,36	2,66
AASHTO LRFD-2017 [12]	1,56	1,73	0,58	30,91	0,54	4,73
CNR-DT203-2006 [6]	0,56	0,61	0,17	28,79	0,19	1,52
CAN/CSA-S6 [7]	0,65	0,65	0,24	32,46	0,20	1,83
ACI 318-19 [8]	1,75	1,89	0,51	27,15	0,67	4,65
EN2 [9]	1,68	1,78	0,54	28,59	0,74	3,93
prEN2 [10]	0,92	0,93	0,24	25,44	0,35	2,29
Nehdi и др. [19]	0,95	1,07	0,27	24,07	0,40	2,35
Kara [20]	0,88	0,99	0,25	23,69	0,37	2,37
Mari и др. [18]	1,45	1,64	0,44	25,03	0,62	4,14
Zhang и др. [21]	0,84	1,05	0,33	31,11	0,41	2,62
Baghi и др. [16]	0,38	0,41	0,14	30,38	0,15	1,10
Ali и др. [22]	1,02	1,02	0,33	29,80	0,42	2,32
Hoult и др. [17]	1,07	1,09	0,26	21,87	0,42	2,47
Предложенная модель Proposed model	0,98	0,95	0,26	26,61	0,50	1,85

Заключение

В настоящей статье представлена модифицированная механическая модель сопротивления срезу самоупроченных бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, которая позволяет учесть влияние основных механических параметров и рассчитать основные составляющие перерезывающей силы. Для целей проектирования разработана общая расчетная процедура, опираясь на положения предложенной модели, не искажающей физической сущности происходящих явлений при совместном действии изгибающих моментов и перерезывающих сил.

Опираясь на результаты сравнительного анализа, показано, что основными преимуществами предложенной модели перед существующими зависимостями заключается в том, что она отражает физическую сущность явления среза, а также в применении к различным случаям и схемам нагружения. При этом выявленные статистические параметры ошибки моделирования составляют: среднее $V_{Rd,exp} / V_{R,theo} = 0,98$, при $V_x = 26,61\%$.

Список цитированных источников

1. ACI 440.1R-03. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars / ACI Committee 440, American Concrete Institute. – Farmington Hills, Mich., 2003. – 41 p.
2. ISIS-M03-01. Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers / The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada, University of Winnipeg. – Manitoba, 2001. – 81 p.
3. JSCE 1997. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials / Japan Society of Civil Engineers, Concrete Engineering Series 23. – Tokyo, 1998. – Vol. 81. – 7 p.
4. GB50608-2010. Technical Code for Infrastructure Application of FRP Composites / China Metallurgical Construction Association. – Beijing, 2011. – Vol. 735.
5. BISE-1999. Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures using Fiber Composite Reinforcement / British Institution of Structural Engineers. – London, 1999. – 116 p.
6. CNR-DT203-06. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars / Advisory Committee Technical Recommendations Construction. – Rome, 2006. – 39 p.
7. CAN/CSA-S6-14. Canadian highway bridge design code / Canadian Standards Association. – Toronto, 2014.
8. ACI-318-19. Building code requirements for structural concrete and commentary / ACI committee 318, American Concrete Institute. – Farmington Hills, Mich., 2019. – 624 p.
9. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau : DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04. Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter / Deutsches Institut für Normung. – Berlin, 2013. – 389 p.
10. Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures (prEN 1992-1-1:2018) / European Committee for Standardization (Draft for committee works). – 2018. – 293 p.
11. ACI-440-15. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars / ACI committee 440, American Concrete Institute. – Farmington Hills, 2015. – 88 p.
12. AASHTO LRFD-17. Bridge Design Guide Specifications for GFRP Reinforced Concrete Bridge Decks and Traffic Railings / AASHTO. – Washington DC, 2018.
13. CSA S806-12. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers / Canadian Standards Association. – Mississauga, ON, 2012. – 206 p.
14. Gao, D. A Model for Shear Strength of FRP Bar Reinforced Concrete Beams without Stirrups / D. Gao, CH. Zhang // *Advances in Civil Engineering*. 2020. – Vol. 2020. – Article ID 8881463. – P. 1–9.
15. El-Sayed, A. K. Shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars: design method / A. K. El-Sayed, E. F. El-Salakawy, B. Benmokrane // *SP 230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 01.10. 2005 : Symposium paper / ACI ; ed.: C. K. Shield [et al.]. – 2005. – Vol. 230. – P. 955–974.
16. Baghi, H. Shear behavior of concrete beams reinforced exclusively with longitudinal glass fiber reinforced polymer bars: Analytical model / H. Baghi [et al.] // *Structural Concrete*. – 2018. – Vol. 19. – Issue 1. – P. 162–173.
17. Hoult N. A. Does the use of FRP reinforcement change the one-way shear behavior of reinforced concrete slabs? / N. A. Hoult [et al.] // *Journal of Composites for Construction*. – 2008. – Vol. 12. – Issue 8. – P. 125–133.
18. Mari, A. Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement / A. Mari [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2014. – Vol. 57. – P. 228–241.
19. Nehdi, M. Proposed shear design equations for FRP-reinforced concrete beams based on genetic algorithms approach / M. Nehdi, H. El Chabib, A. Aly Said // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2007. – Vol. 19. – Issue 12. – P. 1033–1042.
20. Kara, I. F. Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming / I. F. Kara // *Advances in Engineering Software*. – 2011. – Vol. 42. – Issue 6. – P. 295–304.
21. Zhang, T. Shear strength of FRP RC beams and one-way slabs without stirrups / T. Zhang, D. J. Oehlers, P. Visintin // *Journal of Composites for Construction*. – 2014. – Vol. 18. – Issue 5. – P. 1–29.
22. Ali, A. H. Evaluating the shear design equations of FRP-reinforced concrete beams without shear reinforcement / A. H. Ali [et al.] // *Engineering Structures*. – 2021. – Vol. 235. – P. 1–22.
23. Vecchio, F. J. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear / F. J. Vecchio, M. P. Collins // *ACI Journal Proceedings*. – 1986. – Vol. 83. – Issue 2. – P. 219–231.
24. Tureyen, A. K. Shear tests of FRP-reinforced concrete beams without stirrups / A. K. Tureyen, R. J. Frosch // *ACI Structural Journal*. – 2002. – Vol. 99. – Issue 4. – P. 427–434.
25. Cavagnis, F. Shear in reinforced concrete without transverse reinforcement: from refined experimental measurements to mechanical models : Thesis ... Doctor of Philosophy. Structural concrete laboratory (IBETON), École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2017. – 201 p.
26. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / CEB-FIP Committee. – Lausanne, 2013. – 389 p.
27. Тур, В. В. Новые подходы к определению сопротивления срезу балочных элементов без поперечного армирования: часть 1 – обзор расчетных моделей / В. В. Тур, А. П. Воробей // *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2019. № 1 : Строительство и архитектура. С. 15–22.
28. Muttoni A., Fernández Ruiz M. Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width // *ACI Structural Journal*. 2008. Vol. 105. Issue 2. P. 163–172.
29. Fernández, Ruiz M. Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: a mechanical approach to consistently account for size and strain effects / M. Fernández Ruiz, A. Muttoni, J. Sagaseta // *Engineering Structures*. 2015. Vol. 99. P. 360–372.
30. Campana, S. Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics / S. Campana [et al.] // *Magazine of Concrete Research*. – 2013. – Vol. 65. – Issue 6. – P. 386–404.
31. Cavagnis, F. An analysis of the shear transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement / F. Cavagnis, M. Fernández Ruiz, A. Muttoni // *Structural Concrete*. – 2017. – Vol. 19. – Issue 1. – P. 49–64.
32. Cavagnis, F. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results / F. Cavagnis, M. Fernández Ruiz, A. Muttoni // *Engineering Structures*. – 2015. – Vol. 103. – P. 157–173.
33. Koščak, J. Shear behavior of RC beams without transverse reinforcement: An analysis of crack kinematics and transfer mechanisms based on stereophotogrammetric measurements / J. Koščak [et al.] // *Engineering Structures*. – 2022. – Vol. 255. – P. 1–21.
34. Eligehausen, R. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations / R. Eligehausen, E. P. Popov, V. V. Bertero // *Berkeley : University of California*, 1983. – 180 p.
35. Cosenza, E. Development length of FRP straight rebars / E. Cosenza, G. Manfredi, R. Realfonzo // *Composites Part B: Engineering*. – 2002. – Vol. 33. – P. 493–504.
36. Воробей, А. П. Экспериментальные исследования сопротивления срезу самонапряженных бетонных балок, армированных FRP при различных условиях нагружения / А. П. Воробей, В. В. Тур // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки*. Новополоцк : РИО ПГУ. – 2021. – № 9. – С. 41–57.
37. Reinhardt, H. W. Fracture Mechanics of an Elastic Softening Material like Concrete / H. W. Reinhardt // *Heron*. – 1984. – Vol. 29. – Issue 2. – P. 42.
38. Тур, В. В. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезающих сил: моногр. / В. В. Тур, А. А. Кондратчик. – Брест : БрГТУ, 2000. – 397 с.
39. Collins, M. P. A rational approach concrete structures. N. J. : Prentice-Hall Inc / M. P. Collins, D. Mitchell. – Englewood Cliffs, 1991. – 766 p.
40. Walraven, J. C. Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading / J. C. Walraven, H. W. Reinhardt // *Heron*. – 1981. – Vol. 26. – Issue 1A. – P. 5–68.
41. Fernández Ruiz, M. Interaction between bond and deviation forces in spalling failures of arch-shaped members without transverse reinforcement / M. Fernández Ruiz, S. Plume, A. Muttoni // *ACI Structural Journal*. – 2010. – Vol. 107. – Issue 3. – P. 346–354.
42. Cholostiakow, S. Shear database of RC FRP beams without shear reinforcement / S. Cholostiakow [et al.]. – The University of Sheffield, Dataset, 2017.
43. Cavagnis, F. A mechanical model for failures in shear of members without transverse reinforcement based on development of a critical shear crack / F. Cavagnis, M. Fernández Ruiz, A. Muttoni // *Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 157. – P. 300–315.

References

1. ACI 440.1R-03. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars / ACI Committee 440, American Concrete Institute. – Farmington Hills, Mich., 2003. – 41 p.
2. ISIS-M03-01. Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers / The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada, University of Winnipeg. – Manitoba, 2001. – 81 p.
3. JSCE 1997. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials / Japan Society of Civil Engineers, Concrete Engineering Series 23. – Tokyo, 1998. – Vol. 81. – 7 p.
4. GB50608-2010. Technical Code for Infrastructure Application of FRP Composites / China Metallurgical Construction Association. – Beijing, 2011. – Vol. 735.
5. BISE-1999. Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures using Fiber Composite Reinforcement / British Institution of Structural Engineers. – London, 1999. – 116 p.
6. CNR-DT203-06. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars / Advisory Committee Technical Recommendations Construction. – Rome, 2006. – 39 p.
7. CAN/CSA-S6-14. Canadian highway bridge design code / Canadian Standards Association. – Toronto, 2014.
8. ACI-318-19. Building code requirements for structural concrete and commentary / ACI committee 318, American Concrete Institute. – Farmington Hills, Mich., 2019. – 624 p.
9. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau : DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04. Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter / Deutsches Institut für Normung. – Berlin, 2013. – 389 p.
10. Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures (prEN 1992-1-1:2018) / European Committee for Standardization (Draft for committee works). – 2018. – 293 p.
11. ACI-440-15. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars / ACI committee 440, American Concrete Institute. – Farmington Hills, 2015. – 88 p.
12. AASHTO LRFD-17. Bridge Design Guide Specifications for GFRP Reinforced Concrete Bridge Decks and Traffic Railings / AASHTO. – Washington DC, 2018.
13. CSA S806-12. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers / Canadian Standards Association. – Mississauga, ON, 2012. – 206 p.
14. Gao, D. A Model for Shear Strength of FRP Bar Reinforced Concrete Beams without Stirrups / D. Gao, CH. Zhang // *Advances in Civil Engineering*. 2020. – Vol. 2020. – Article ID 8881463. – P. 1–9.
15. El-Sayed, A. K. Shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars: design method / A. K. El-Sayed, E. F. El-Salakawy, B. Benmokrane // *SP 230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 01.10. 2005 : Symposium paper / ACI ; ed.: C. K. Shield [et al.]. – 2005. – Vol. 230. – P. 955–974.
16. Baghi, H. Shear behavior of concrete beams reinforced exclusively with longitudinal glass fiber reinforced polymer bars: Analytical model / H. Baghi [et al.] // *Structural Concrete*. – 2018. – Vol. 19. – Issue 1. – P. 162–173.
17. Hoult N. A. Does the use of FRP reinforcement change the one-way shear behavior of reinforced concrete slabs? / N. A. Hoult [et al.] // *Journal of Composites for Construction*. – 2008. – Vol. 12. – Issue 8. – P. 125–133.
18. Mari, A. Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement / A. Mari [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2014. – Vol. 57. – P. 228–241.
19. Nehdi, M. Proposed shear design equations for FRP-reinforced concrete beams based on genetic algorithms approach / M. Nehdi, H. El Chabib, A. Aly Said // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2007. – Vol. 19. – Issue 12. – P. 1033–1042.
20. Kara, I. F. Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming / I. F. Kara // *Advances in Engineering Software*. – 2011. – Vol. 42. – Issue 6. – P. 295–304.
21. Zhang, T. Shear strength of FRP RC beams and one-way slabs without stirrups / T. Zhang, D. J. Oehlers, P. Visintin // *Journal of Composites for Construction*. – 2014. – Vol. 18. – Issue 5. – P. 1–29.
22. Ali, A. H. Evaluating the shear design equations of FRP-reinforced concrete beams without shear reinforcement / A. H. Ali [et al.] // *Engineering Structures*. – 2021. – Vol. 235. – P. 1–22.
23. Vecchio, F. J. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear / F. J. Vecchio, M. P. Collins // *ACI Journal Proceedings*. – 1986. – Vol. 83. – Issue 2. – P. 219–231.
24. Tureyen, A. K. Shear tests of FRP-reinforced concrete beams without stirrups / A. K. Tureyen, R. J. Frosch // *ACI Structural Journal*. – 2002. – Vol. 99. – Issue 4. – P. 427–434.
25. Cavagnis F. Shear in reinforced concrete without transverse reinforcement: from refined experimental measurements to mechanical models : Thesis ... Doctor of Philosophy. Structural concrete laboratory (IBETON), École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2017. – 201 p.
26. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / CEB-FIP Committee. – Lausanne, 2013. – 389 p.
27. Tur, V. V. Novye podhody k opredeleniyu soprotivleniya srezu balochnyh elementov bez poperechnogo armirovaniya: chast' 1 – obzor raschetnyh modelej / V. V. Tur, A. P. Vorobej // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. № 1 : Stroitel'stvo i arhitektura. S. 15–22.
28. Muttoni A., Fernández Ruiz M. Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width // *ACI Structural Journal*. 2008. Vol. 105. Issue 2. P. 163–172.
29. Fernández, Ruiz M. Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: a mechanical approach to consistently account for size and strain effects / M. Fernández Ruiz, A. Muttoni, J. Sagaseta // *Engineering Structures*. 2015. Vol. 99. P. 360–372.
30. Campana, S. Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics / S. Campana [et al.] // *Magazine of Concrete Research*. – 2013. – Vol. 65. – Issue 6. – P. 386–404.
31. Cavagnis, F. An analysis of the shear transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement / F. Cavagnis, M. Fernández Ruiz, A. Muttoni // *Structural Concrete*. – 2017. – Vol. 19. – Issue 1. – P. 49–64.
32. Cavagnis, F. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results / F. Cavagnis, M. Fernández Ruiz, A. Muttoni // *Engineering Structures*. – 2015. – Vol. 103. – P. 157–173.
33. Koščak, J. Shear behavior of RC beams without transverse reinforcement: An analysis of crack kinematics and transfer mechanisms based on stereophotogrammetric measurements / J. Koščak [et al.] // *Engineering Structures*. – 2022. – Vol. 255. – P. 1–21.
34. Eligehausen, R. Local bond stress–slip relationships of deformed bars under generalized excitations / R. Eligehausen, E. P. Popov, V. V. Bertero // *Berkeley* : University of California, 1983. – 180 p.
35. Cosenza, E. Development length of FRP straight rebars / E. Cosenza, G. Manfredi, R. Realfonzo // *Composites Part B: Engineering*. – 2002. – Vol. 33. – P. 493–504.
36. Vorobej, A. P. Eksperimental'nye issledovaniya so-protivleniya srezu samonapryazhennyh betonnyh balok, armirovannyh FRP pri razlichnyh usloviyah nagruzheniya / A. P. Vorobej, V. V. Tur // *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. Novopolock : RIO PGU. – 2021. – № 9. – S. 41–57.
37. Reinhardt, H. W. Fracture Mechanics of an Elastic Softening material like Concrete / H. W. Reinhardt // *Heron*. – 1984. – Vol. 29. – Issue 2. – P. 42.
38. Tur, V. V. Raschet zhelezobetonnyh konstrukcij pri dejstvii pere-rezyvayushchih sil: monogr. / V. V. Tur, A. A. Kondratchik. – Brest : BrGTU, 2000. – 397 s.
39. Collins, M. P. A rational approach concrete structures. N. J. : Prentice-Hall Inc / M. P. Collins, D. Mitchell. – Englewood Cliffs, 1991. – 766 p.
40. Walraven, J. C. Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading / J. C. Walraven, H. W. Reinhardt // *Heron*. – 1981. – Vol. 26. – Issue 1A. – P. 5–68.
41. Fernández Ruiz, M. Interaction between bond and deviation forces in spalling failures of arch-shaped members without transverse reinforcement / M. Fernández Ruiz, S. Plumey, A. Muttoni // *ACI Structural Journal*. – 2010. – Vol. 107. – Issue 3. – P. 346–354.
42. Cholostiakow, S. Shear database of RC FRP beams without shear reinforcement / S. Cholostiakow [et al.]. – The University of Sheffield, Dataset, 2017.
43. Cavagnis, F. A mechanical model for failures in shear of members without transverse reinforcement based on development of a critical shear crack / F. Cavagnis, M. Fernández Ruiz, A. Muttoni // *Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 157. – P. 300–315.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АУТЕНТИЧНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ И ОКРАСОЧНЫХ СОСТАВОВ ЗДАНИЯ ТЮРЬМЫ № 1 В Г. ГРОДНО

Э. А. Тур¹, Е. В. Счасная², С. В. Басов³, В. В. Тричик⁴

¹ К. т. н., заведующий кафедрой инженерной экологии и химии
Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: tur.elina@mail.ru

² Главный архитектор проекта ПМ-2 УП «Институт Гродногражданпроект»

³ К. т. н., доцент кафедры инженерной экологии и химии
Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: basovs@mail.ru

⁴ Студентка группы Д-23 строительного факультета
Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь

Реферат

Сохранение историко-культурного наследия имеет и огромное практическое значение для современников. Историко-культурное наследие Республики Беларусь является достоянием белорусского народа. Важнейшей частью проекта по реконструкции и реставрации объектов, включенных в Перечень недвижимых объектов историко-культурного наследия, является раздел «Комплексные научные изыскания». В данной работе были изучены образцы строительных растворов и окрасочных составов, отобранные с фасадов здания тюрьмы № 1 в г. Гродно. Целью исследования являлось изучение особенностей исходных штукатурных растворов, определение первоначальных окрасочных составов и разработка методических рекомендаций по проведению ремонтно-реставрационных работ. Объект был обследован должным образом, определены аутентичные строительные растворы и окрасочные составы. Окрасочные работы и в раннее, и в более позднее время производились составами на минеральной основе. Изначально здание было оштукатурено известково-песчаными растворами и окрашено минеральными составами. Все применяемые материалы для ремонта фасада должны быть совместимы с сохраняемыми материалами по своим физико-механическим характеристикам.

Ключевые слова: историко-культурное наследие, реставрация, реконструкция, памятники культуры, строительные растворы, штукатурные растворы.

PHYSICO-CHEMICAL STUDIES OF AUTHENTIC CONSTRUCTION SOLUTIONS AND PAINTING COMPOSITIONS OF THE BUILDING OF PRISON No. 1 IN GRODNO

E. A. Tur, E. V. Scasnaya, S. V. Basov, V. V. Trichyk

Abstract

The preservation of historical and cultural heritage is also of great practical importance for contemporaries. The historical and cultural heritage of the Republic of Belarus is the property of the Belarusian people. The most important part of the project for the reconstruction and restoration of objects included in the List of immovable objects of historical and cultural heritage is the section "Complex scientific research". In this work, samples of mortars and paint compositions selected from the facades of the Prison building No. 1 in Grodno were studied. The purpose of the study was to study the characteristics of the initial plaster solutions, to determine the initial paint compositions and to develop methodological recommendations for carrying out repair and restoration work. The object was examined properly, authentic building solutions and paint compositions were determined. Painting works both in the early and later times were carried out with mineral-based compositions. Initially, the building was plastered with lime-sand solutions and painted with mineral compounds. All materials used to repair the facade must be compatible with the stored materials according to their physical and mechanical characteristics.

Keywords: historical and cultural heritage, restoration, reconstruction, cultural monuments, building mortars, plaster mortars.

Введение

Сохранение историко-культурного наследия имеет и огромное практическое значение для современников. Историко-культурной ценностью признаются объекты, обладающие совокупностью двух признаков: культурной значимостью и юридическим признанием в таком качестве посредством включения в охранный реестр – Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь [1].

В 1969 г. впервые в БССР был принят Закон «Об охране памятников культуры». Законодательное оформление деятельности по охране наследия дало толчок к упорядочению учетных документов на исторические объекты, результатом чего стало утверждение Советом министров БССР в 1988 г. Государственного списка памятников истории и культуры республиканского значения. В 1992 году в Республике Беларусь был принят Закон «Об охране историко-культурного наследия». С 9 января 2006 г. по 03 февраля 2017 г. порядок государственного регулирования охраны историко-культурного наследия Республики Беларусь устанавливался Законом Республики Беларусь от 9 января 2006 г. «Об охране историко-культурного наследия Республики Беларусь».

3 февраля 2017 года вступил в силу Кодекс Республики Беларусь о культуре, которым регулируются вопросы охраны историко-культурного и археологического наследия Республики Беларусь (Кодекс Республики Беларусь о культуре от 20 июля 2016 года № 413-3, принят Палатой представителей 24 июня 2016 года, одобрен Советом Республики 30 июня 2016 года).

Кодексом установлена процедура, выполнение которой позволяет получить разрешение на проведение всех видов работ на историко-культурной ценности.

В последние годы значительно возрос объем финансирования и работ по реставрации и восстановлению зданий и сооружений, являющихся объектами историко-культурного наследия, а также объем проектных и изыскательских работ. Но, к сожалению, в ряде случаев наблюдается снижение качества произведенных работ по сохранению зданий из-за неудачного выбора реставрационных материалов и технологии производства работ, возрастает риск утраты ценнейших аутентичных элементов архитектурно-исторической среды населенных пунктов [3, 4, 5].

В составе научно-проектной документации для проведения реставрационных работ в обязательном порядке разрабатывается

раздел «Комплексные научные изыскания», который состоит из результатов исследований по оценке технического состояния элементов конструкций, фотофиксации, архитектурно-планировочных обмеров, исторических, археологических, химико-физических и других необходимых исследований. Обязательное проведение химико-физических исследований, помогает принять правильные, научно-обоснованные проектные решения по применению современных отделочных материалов на историко-культурных ценностях, максимально приближенных к аутентичным, что, соответственно, предполагает большую долговечность проведенных работ. К сожалению, как показывает практика, зачастую ни заказчики работ, ни подрядчики не знают о последствиях применения отдельных видов современных отделочных материалов (и их сочетания) на зданиях, при строительстве которых использованы различные известковые растворы.

На многих исторических объектах десятилетиями, главным образом, из-за отсутствия необходимых финансовых средств, реставрация сводилась лишь к косметическим ремонтам, не требующим разработки проектной документации. Неоднократные ремонты привели к образованию многослойного «пирого» из цементной, известковой штукатурки и различных по качеству и составу отделочных материалов.

Известно, что, как правило, комплексные научные изыскания начинаются с исследования технического состояния всех элементов конструкции зданий. При проведении обследования очень часто выясняется, что, кроме реставрации самого фасада здания, необходимо выполнить комплекс работ по усилению фундаментов, устройству гидроизоляции в подвальных или цокольных помещениях, по устранению причин капиллярного подсоса влаги в ограждающие конструкции здания или сооружения [6, 7].

Во времена Советского Союза ремонт фасадов большинства исторических зданий проводился регулярно, но, как правило, без проведения каких-либо обследований, и состоял в расчистке фасада в местах отслоения краски или штукатурного покрытия. Далее восполнялись утраты штукатурного слоя сложными штукатурными растворами, а именно составами в соотношении цемент : известь : заполнитель как 1:1:3. Для штукатурки использовался раствор с крупным, до 1,5–2 мм, заполнителем, затирка с заполнителем с размером зерна до 1 мм. Сложные растворы, особенно если они при ремонтах уложены на традиционную штукатурную отделку памятников, а именно известково-песчаную штукатурку, вызывают «запаривание» оригинальных растворов, их разрушение. Кроме того, на фасадах при их ремонте или реставрации использовались и растворы других составов: гипсовые, известково-гипсовые. Поверхность шпательвалась и окрашивалась в основном краской на полимерном связующем. Последующие ремонты представляли собой удаление участков с разрушением, повторное шпательвание и окраску. При исследовании состояния отделки фасадов специалисты впоследствии находили до 45 штукатурных, шпатлевочных и окрасочных слоев, которые необходимо убирать при проведении реставрационных работ [8, 9, 10, 11].

Основная часть

За период 2006–2022 г. авторами были проведены физико-химические исследования строительных растворов и окрасочных составов более 80 исторических недвижимых объектов в г. Бресте, г. Гродно, Брестской, Гродненской и Минской областях, а также разработаны рекомендации по проведению ремонтно-реставрационных работ. Одним из знаковых объектов исследования являлось здание тюрьмы № 1 в г. Гродно. Данное здание является памятником архитектуры, включённым в Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь.

История здания тюрьмы № 1 в г. Гродно как исторического объекта насчитывает более 200 лет. 200 лет назад здесь находился сад. Разнообразные деревья и кустарники, резные беседки и дорожки были частью архитектурного ансамбля иезуитского коллегиума, занимавшего целый городской квартал. Все изменилось после третьего раздела Речи Посполитой: в 1795 году владения иезуитов перешли к городу. Местное руководство на этом месте решило построить тюрьму. Существующие остроги уже не справлялись: не хватало мест, осужденные постоянно убегали из-под стражи, что создавало

неспокойную атмосферу. В то время архитекторы уделяли особое внимание гармоничности городов. Было модно строить не просто кирпичные коробки, а здания-монументы. Тюрьму тоже решили возвести монументальную. Так появился проект тюремного замка. 25 тысяч рублей ассигнациями выделило МВД царской России на строительство самой большой тюрьмы в Гродненской губернии. В результате получился двухэтажный замок из кирпича. С трех сторон его окружили каменной стеной. Фасад с двухэтажной аркой для въезда и 4 каменные башни не оставляли сомнений: это действительно замок. Внутри — 12 арестантских камер для 80 человек. И несколько «секретных» камер для особо опасных преступников.

Гродненская тюрьма появилась в непростое время. Весь XIX век губернию лихорадило: войны, восстания и, как результат, тяжелое экономическое положение ухудшили криминогенную обстановку. Преступников становилось все больше и больше. Поэтому тюремный замок был обречен на постоянное расширение. Здания бывшего коллегиума один за другим переоборудовались под тюремные нужды. Ученым удалось добраться до плана 1839 года. Согласно ему на территории замка с левой и правой стороны от входа посадили деревья, разбили небольшие огороды, а здание бывшей кузницы стали использовать под пекарню. Но и этого не хватало. В 1883 году за чертой города был выделен участок для строительства новой тюрьмы на 300 человек. Планы нарушил страшный пожар 1885 года. Тогда сгорела фактически вся центральная часть города. Каменные постройки тюремного замка уцелели. Строительство новой тюрьмы снова было отложено. Через несколько лет гродненская тюрьма по количеству заключенных стала одной из самых больших на северо-западе России. Тем не менее в XX век тюрьма вступила обновленной. Появилась женская больница, баня, прачечная, церковь, звонница, сарай, морг, полы во всех помещениях заменили на деревянные, а деревянные ступени, наоборот, заменили на гранитные (рисунок 1).



Рисунок 1 – Фото тюрьмы, начало XX в.

В 1920 году хозяевами гродненской земли стали поляки, появились новые порядки. В тюрьму отправляли на обучение надзирателей со всей страны. В 1935 году там содержалась уже 1000 заключенных. Существовал в гродненской тюрьме и свой комитет заключенных. В него входили видные политические деятели и поэты того времени: Притыцкий, Тарашкевич, Тавлай, Пестрак. В 1939 году они организовали восстание и удерживали замок до прихода Красной Армии. К началу 1945-го в тюрьме — 2000 человек. В основном уголовники, бывшие полицией и их пособники, дезертиры и мародеры.

Тюремные замки — интересное явление в истории исправительного дела. Они придавали определенный романтизм пенитенциарной системе. Ведь получалось, что не заключенные страдали в застенке, а узники томились в замке. Некоторые исследователи склонны полагать, что у гродненского замка есть скрытые подземные ходы. 20 лет назад в здании тюрьмы нашли потайную комнату, в которой был замурован древний архив. Огромная, около 100 квадратных метров, площадь никем не использовалась десятки лет (рисунок 2–4).



Рисунок 2 – Фото тюрьмы с воздушного шара, 2004 г.

Из архивной исторической справки: «Кірава № 1 — Былы езуіцкі калегіум, турма. Пасля няўдачы першай спробы заснаваць у Гродне езуіцкі калегіум (гл. раздзел аб Замкавай вуліцы) езуіты ізноў з’явіліся ў горадзе ў 1622 г. і пасяліліся ў купленай камяніцы на рынку (магчыма «Замкавым двары»). Дзякуючы шэрагу фундацый езуітам удалося купіць шэраг пляцаў на ўсходнім баку Рынка, вуліц Калючынскай і Рэзніцкай. У 1637 г. езуіты купляць зван для невялікага касцёла, а сейм 1647 г. пацвярджае іх валоданне пляцамі, на якіх павінен быць узведзены калегіум. Магчыма будаўніцтва новага касцёла пачалося ці было падрыхтавана, аднак маскоўская навала перарвала гэтыя працы. У 1666 – 1667 гг. згадваецца аб будаўніцтве новага прэзбітэрыума, аднак прэзбітэрыум быў драўлянага касцёла св. Пятра і Паўла, а не мураванага Францішка Ксаверыя.



Рисунок 3 – Фото тюрьмы, общий вид, 2004 г.



Рисунок 4 – Фото тюрьмы, 2006 г.

Першапачатковы калегіум будавалі ў 1677–1683 гг., новы (на захад ад «старога») – у 1691–1763 гг. У 1711 г. была падрыхтавана зэгла для будаўніцтва рэфлектарыя, аднак іх прадалі, акупаючы ваенныя кантрыбуцыі. У 1722 г. езуіт-навіцыюш Францішак Карп, урадзенец Гродзенскага павета, ахвяраваў на заканчэнне будаўніцтва калегіума 20 тыс. тынфаў срэбра, пасля чаго будаўніцтва было завершана. У 1734 г. быў разабраны драўляны будынак калегіума, у 1725 г. драўляная званніца над старым калегіумам. У 1726 г. падпісаны кантракт з Дамінікам Фантанам (каля 1680 – каля 1740), маёрам войска ВКЛ, архітэктарам, які перабудаваў палац Радзівілаў у Гродне, на будаўніцтва рэфлектарыя. Аднак Фантана не выканаў кантракта і рэфлектарый быў пабудаваны ў 1727 г. самымі езуітамі пад кіраўніцтвам брата Якуба Руфа (Jakob Ruoff). На пачатку XIX ст. пад губернскаю турму быў адведзены двухпавярховы каменны флігель, што ўваходзіў у комплекс будынкаў езуіцкага калегіума (зараз на тэрыторыі турэмнага комплексу). У 1802 г. гродзенскі губернатар Кошалеў перадаў будынак калегіума ў распараджэнне Гродзенскага прыказа грамадскага апекавання. У 1817-1820 гг. перабудаваны па праекце архітэктара Лянгоўскага пад гродзенскі турэмны замак. У кастрычніку 1821 г. на тэрыторыі гродзенскага турэмнага замка была пабудавана капліца пад назвай «Св. Пятра ў аковах». У канцы 1820-х гадоў частка былога калегіума была перададзена вайсковаму ведамству. У 1840 г. была перабудавана турэмная царква. У 1853 г. пад кіраўніцтвам архітэктара Мікульскага пачынаецца будаўніцтва дзвух невялікіх флігеляў, якія далучаюцца да корпуса турэмнага замка. У 1858 г. была разабрана хата ката з мэтай перашкодзіць магчымым спробам уцекаў, бо яна прымыкала да турэмнай сцяны. У 1861 г. адбываецца чарговы рамонт, а ўжо ў сакавіку 1863 г. тут з’яўляюцца першыя удзельнікі паўстання. Колькасць палітычных вязняў у хуткім часе ўзрасла настолькі, што турэмныя ўлады вымушаны былі перавесці крымінальных злачынцаў у былы кармеліцкі манастыр. Чарговыя працы па пашырэнні турмы праводзіць гродзенскі купец Андрэс пад кіраўніцтвам інжынер-падпалкоўніка Арнольда. У 1912 г. на тэрыторыі турмы будуюцца корпус для вобвыску і спатканняў. На 1928 г. у доме па адрасе вул. Лістоўскага № 2 працавалі кнігарня Тані Гарбер, мануфактурная крама Хаіма Заўдмана, цырульня Клецкель Шейер, кравецкая майстэрня Міхеля Позняка” [12].

Как уже отмечалось, для проведения ремонтно-реставрационных работ на фасадах объектов историко-культурного наследия в Республике Беларусь требуется проведение комплексных научных изысканий (КНИ).

В разделе КНИ авторами были проведены физико-химические исследования строительных растворов и окрасочных составов фасадов здания тюрьмы № 1 в г. Гродно. Общий вид фасада по ул. Кирова представлен на рисунке 6. Общий вид фасада по ул. Городничанской представлен на рисунке 7. При отборе образцов для проведения исследований производилась фотофиксация мест отбора на фасадах здания.



Рисунок 5 – Охранная доска на здании тюрьмы № 1 в г. Гродно



Рисунок 6 – Общий вид фасада по ул. Кирова

Цель исследований здания тюрьмы № 1 – изучение технологических особенностей нанесения исходных штукатурных растворов, определение первоначальных окрасочных составов и разработка методических рекомендаций по проведению ремонтно-реставрационных работ на фасадах здания.

Для исследований были представлены штукатурные известково-песчаные растворы и цементно-известково-песчаные растворы, а также фрагменты стены здания (пробы штукатурного раствора, зондажи). Для анализа представленных образцов применялись микрохимический, гранулометрический и петрографический методы исследований [6, 7, 8, 13, 14]. Гранулометрический состав заполнителей определялся путем просеивания через сита с размером ячеек 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 мм согласно рекомендациям ОАО «Белреставрация» Министерства Культуры Республики Беларусь (для создания аутентичных строительных растворов недвижимых объектов историко-культурного наследия 1 и 2 категории).

Цвета лакокрасочных покрытий и отделочных составов указаны по каталогу «3D-plus» компании CAPAROL, применяемые в настоящее время архитекторами-реставраторами в Республике Беларусь. Цвет покрытия определялся путём визуального сравнения образца с эталонной типографской выкраской. Для устранения метамерии определение цвета проводилось при рассеянном естественном освещении [8, 14].



Рисунок 7 – Общий фасада по ул. Городничанской

Места отбора образцов штукатурных слоев с окрасочными составами приведены в таблице 1. Компонировочная схема плана исследованной части здания тюрьмы № 1 представлена на рисунке 8.

Таблица 1 – Места отбора образцов штукатурных слоев с окрасочными составами

№ образца	Наименование места отбора
1	Основная плоскость стены 1-го этажа главного фасада в осях 3-1 (справа от входа) по ул. Кирова
2	Основная плоскость стены 2-го этажа главного фасада в осях 3-1 (справа от входа) по ул. Кирова
3	Основная плоскость стены бокового фасада в осях Д-В
4	Основная плоскость стены дворового фасада в осях 2-3 (ул. Кирова)
5	Основная плоскость стены дворового фасада в осях Г-Б (ул. Городничанская)
6	Основная плоскость стены дворового фасада в осях Б-А (ул. Городничанская)
7	Основная плоскость стены бокового фасада в осях Г-Д (ул. Городничанская)
8	Основная плоскость стены бокового фасада в осях А-Б (ул. Городничанская)

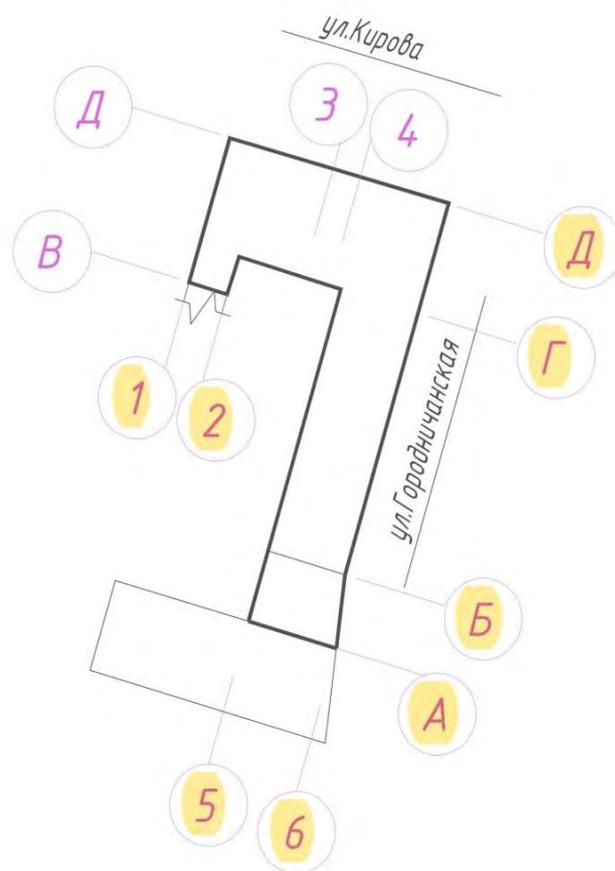


Рисунок 8 – Компонировочная схема плана исследованной части здания тюрьмы № 1

Результаты исследований аутентичных строительных растворов приведены в таблице 2. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок.

Таблица 2 – Результаты исследований аутентичных строительных растворов

№ образца	Описание аутентичного штукатурного раствора
1	Известково-песчаный раствор с количественным соотношением компонентов 1:1,5 – 1:1,6. В качестве заполнителя использовался разнородный песок преимущественно средней (размер зерна 0,5–0,25 мм) и мелкой (0,25–0,125 мм) фракции. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 46,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 45,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 8,5 %, содержание фракции с размером частиц более 1 мм составило 0,5 %. Отмечены многочисленные включения извести размером 1–2 мм. pH водной вытяжки около 7,88.
2	Известково-песчаный раствор с количественным соотношением компонентов 1:1,5 – 1:1,6. В качестве заполнителя использовался разнородный песок преимущественно средней (размер зерна 0,5–0,25 мм) и мелкой (0,25–0,125 мм) фракции. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 46,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 45,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 8,5 %, содержание фракции с размером частиц более 1 мм составило 0,5 %. Отмечены крупные включения извести размером 2–3 мм. pH водной вытяжки около 7,86.
3	Известково-песчаный раствор с количественным соотношением компонентов 1:4. В качестве заполнителя использовался разнородный песок преимущественно средней (размер зерна 0,5–0,25 мм) фракции. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 41,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 25,5 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 29 %, фракции с размером зерна 1,0–2,0 мм – около 3,5 %. Содержание фракции с размером частиц более 2 мм составило 1 %. pH водной вытяжки около 7,87.
4	Известково-цементно-песчаный штукатурный раствор с количественным соотношением компонентов 1:1:3. В качестве заполнителя использовался разнородный песок преимущественно средней (размер зерна 0,5–0,25 мм) фракции. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 44 % от всей массы заполнителя, содержание фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм составило около 23,5 % от всей массы заполнителя. Фракция 0,25–0,125 мм составила около 31 % от всей массы заполнителя раствора, фракции с размером частиц более 1 мм составили 1,5 %. Отмечены включения извести размером около 1 мм и менее. pH водной вытяжки около 10,5.
5	Известково-песчаный раствор с количественным соотношением компонентов 1:4. В качестве заполнителя использовался разнородный песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 37,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 48 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 13 %, фракции с размером зерна 1,0–2,0 мм – около 1,5 %, фракции с размером частиц более 2 мм составили 0,5 %. pH водной вытяжки около 8,50.
6	Известково-цементно-песчаный штукатурный раствор с количественным соотношением компонентов 1:1:3. В качестве заполнителя использовался разнородный песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 30 % от всей массы заполнителя, содержание фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм составило около 22 % от всей массы заполнителя. Фракция 0,25–0,125 мм составила около 42 % от всей массы заполнителя, содержание фракции с размером зерна 1,0–2,0 мм – около 5 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 1 %. pH водной вытяжки около 8,35.
7	Известково-песчаный раствор с количественным соотношением компонентов 1:4. В качестве заполнителя использовался разнородный песок преимущественно средней (размер зерна 0,5–0,25 мм) и мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 40,0% от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 37%, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 20%, фракции с размером зерна 1,0–2,0 мм – около 2 %, фракции с размером частиц более 2 мм составили 1 %. pH водной вытяжки около 7,89.
8	Известково-песчаный раствор с количественным соотношением компонентов 1:4. В качестве заполнителя использовался разнородный песок преимущественно средней (размер зерна 0,5–0,25 мм) и мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 44,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 38,5 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 16 %, фракции с размером зерна 1,0–2,0 мм – около 1%, фракции с размером частиц более 2 мм составили 0,5 %. Отмечены отдельные включения извести размером около 1 мм и менее. pH водной вытяжки около 8,18.

Результаты исследования аутентичных окрасочных составов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты исследования аутентичных окрасочных составов

№ образца	Описание аутентичного окрасочного состава (цветовое решение по каталогу «System 3D-plus» компании CAPAROL)
1	Окрасочный состав сливочно-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Off White 20».
2	Окрасочный состав сливочно-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Off White 20».
3	Окрасочный состав сливочно-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Off White 20».
4	Лицевая поверхность образца окрашена составом бежевого цвета на основе полимерного пленкообразующего. Цвет близок к образцу «Palazzo 180» (современный). Аутентичный не сохранился.
5	Окрасочный состав серовато-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Umbr-Weib».
6	Лицевая поверхность образца окрашена составом светло-бежевого цвета на основе полимерного пленкообразующего. Цвет близок к образцу «Cergy 55» (современный). Аутентичный не сохранился.
7	Окрасочный состав серовато-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Umbr-Weib».
8	Окрасочный состав серовато-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Umbr-Weib».

Таким образом, установлено, что все соответствующие исследованные аутентичные штукатурные известково-песчаные растворы (предположительно одного исторического периода) близки по соотношению компонентов (вяжущее : наполнитель) и гранулометрическому составу наполнителя (кварцевого песка).

Штукатурные растворы более позднего исторического периода значительно отличаются от аутентичных как соотношением компонентов, так и гранулометрическим составом наполнителя (кварцевого песка). Практически все штукатурные и затирочные растворы современного исторического периода по составу являются известково-цементно-песчаными.

Первоначально основная плоскость стены 1-го этажа главного фасада, 2-го этажа главного фасада (справа от входа) по ул. Кирова, бокового фасада были окрашены составом сливочно-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Off White 20». Не удалось определить первоначальный окрасочный состав основной плоскости стены дворового фасада (ул. Кирова). На данном образце был обнаружен только современный известково-цементно-песчаный штукатурный, окрашенный составом бежевого цвета на основе полимерного пленкообразующего. Ранние известково-песчаные штукатурные растворы и окрасочные составы были полностью удалены с подложки. Предположительно, поверхность фасада также была окрашена составом сливочно-белого цвета на минеральной основе (цвет близок к образцу «Off White 20»). Первоначально основные плоскости стен дворового фасада в осях Г-Б (ул. Городничанская), бокового фасада (ул. Городничанская), бокового фасада (ул. Городничанская) были окрашены составом серовато-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Umbrg-Weib». Не удалось определить первоначальный окрасочный состав основной плоскости стены дворового фасада (ул. Городничанская). На данном образце был обнаружен только современный известково-цементно-песчаный штукатурный, окрашенный составом светло-бежевого цвета на основе полимерного пленкообразующего. Ранние известково-песчаные штукатурные растворы и окрасочные составы были полностью удалены с подложки. Предположительно, поверхность фасада также была окрашена составом серовато-белого цвета на минеральной основе (цвет близок к образцу «Umbrg-Weib»). Первоначально цоколь из натурального (природного) камня (гранита) не был окрашен. Следует обязательно удалить все составы с натурального камня.

Определено, что здание многократно перекрашивалось составами на минеральной основе, но самые последние ремонты были выполнены окрасочными составами на основе полимерного пленкообразующего. Первоначальные штукатурные работы производились известково-песчаными составами (без цемента). Следует отметить, что нижележащие окрасочные слои не удалялись должным образом, поэтому образцы с плоскости стены главного, боковых и дворового фасадов напоминают «слоёный пирог». Первоначально здание было оштукатурено известково-песчаными растворами и окрашено минеральными составами.

При проведении реставрационных работ следует учитывать, что исследованные первоначальные штукатурные растворы выполнены известково-песчаными составами, обладающими высокой пористостью, газо- и паропрооницаемостью [15].

В связи с этим к материалам, используемым при проведении отделочных работ, предъявляются следующие требования:

- материалы по своим эксплуатационным характеристикам должны быть аналогичны первоначальным;
- материалы должны быть химически совместимы с оригинальными и обладать высокой щелочестойкостью [16, 17].

Проведению штукатурных и окрасочных работ должны предшествовать такие вспомогательные работы, как ремонт кровли, водосточных систем, а также работы по гидроизоляции здания.

Поэтому рекомендуется следующая схема проведения ремонтно-реставрационных работ:

1. Удаление всех имеющихся слоёв окрасочных составов, а также разрушенных (разрушенных) фрагментов штукатурного слоя. Очистка цоколя из натурального камня от современных составов.
2. Подготовка поверхности под покраску: восполнение утраченных фрагментов штукатурки, по необходимости – новые штукатурные работы; грунтование поверхности фасадов.
3. Окрашивание поверхности фасадов.

Все отделочные слои фасада здания (штукатурку, окрасочные составы) следует механически удалить до основания. Для этого необходимо использовать жёсткие щётки, а также скребки и шпатели.

Допускается промывка поверхности холодной водой под давлением. Цоколь из натурального камня следует полностью очистить от затирочных и окрасочных слоёв.

Для восстановления штукатурного слоя рекомендуется использовать штукатурные смеси на основе известкового вяжущего, не содержащие цемента, обладающими водостойкостью, высокой паропроницаемостью и адгезией к основанию. Для выравнивания неровно затёртой штукатурки и затирки микротрещин рекомендуется использовать известковую затирку на основе диспергированной белой извести, специально предназначенную для выполнения реставрационных работ по основаниям исторических зданий и памятников архитектуры, где требуется применение растворов, не содержащих цементное вяжущее. Перед оштукатуриванием поверхность необходимо тщательно обеспылить и очистить от загрязнений [6, 7, 18].

Окрашивание поверхности следует проводить составами, формирующими покрытие с высокой паропроницаемостью и низким водопоглощением. Для этого в наибольшей степени подходят водно-дисперсионные краски, модифицированные силиконовыми смолами и содержащие силикаты. Такие краски образуют наиболее микропористое покрытие, гидрофобное покрытие с низким грязеудержанием и могут наноситься на высокощелочные основания. Могут применяться также высококачественные известковые краски, специально предназначенные для реставрационных работ по известковым основаниям, имеющие хорошую паропроницаемость [14].

Производить покраску фасадов рекомендуется не ранее, чем через 28 суток после выполнения всех подготовительных (штукатурных и т. д.) работ. При окраске данного фасада не допустимо использование обычных водно-дисперсионных красок на основе акриловых полимеров. В этом случае может произойти омыление полимерного плёнокообразователя, что сопровождается шелушением краски, отслоением её от подложки и изменением первоначального цвета. Кроме того, низкая паропроницаемость покрытия может привести к его отслоению от минеральной подложки [14, 17].

Заключение

Исследованные известково-песчаные штукатурные растворы раннего и более позднего исторических периодов значительно отличались друг от друга как по соотношению компонентов, так и по гранулометрическому составу наполнителя. Более ранние аутентичные растворы (фасад здания по ул. Кирова, возведенного примерно в 1795 г.) имели количественное соотношение компонентов известь: наполнитель = 1:1,5 – 1:1,6. В качестве наполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (размер зерна 0,5–0,25 мм) и мелкой (0,25–0,125 мм) фракций. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 46,0 % от массы наполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 45,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 8,5 %, фракции с размером частиц более 1 мм составили 0,5 %. Отмечены многочисленные включения извести размером от 1–2 мм до 2–3 мм. Вероятно, раствор был плохо вымешан при изготовлении. Включения извести присутствуют у всех ранних аутентичных штукатурных растворов.

Более поздние аутентичные растворы (фасад здания по ул. Городничанской, возведенного примерно в 1817 г.) имели количественное соотношение компонентов известь: наполнитель = 1:4. В качестве наполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (размер зерна 0,5–0,25 мм) и мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракций. Содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 40,0 % от массы наполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 37 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 20 %, фракции с размером зерна 1,0–2,0 мм – около 2 %, фракции с размером частиц более 2 мм составили 1 %. Включения извести практически отсутствуют.

Это позволяет предположить, что в различные исторические периоды кварцевый песок для штукатурных работ был привезен из разных карьеров.

Здание неоднократно перекрашивалось различными составами. Окрасочные работы и в раннее, и в более позднее время производились составами на минеральной основе. Изначально здание было оштукатурено известково-песчаными растворами и окрашено минеральными составами.

Первоначально основная плоскость стены как 1-го этажа, так и 2-го этажа главного фасада по ул. Кирова была окрашена составом сливочно-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок

к образцу «Off White 20»). Первоначально основная плоскость стены дворового фасада (ул. Городничанская), а также бокового фасада по ул. Городничанской была окрашена составом серовато-белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Umbr-Weib». На остальных исследованных пробах штукатурного слоя аутентичные окрасочные составы не сохранились. Предположительно, первоначально основная плоскость стены дворового фасада (ул. Кирова) была также окрашена составом сливочно-белого цвета на минеральной основе (цвет близок к образцу «Off White 20»), как и основная плоскость стены 1-го и 2-го этажа главного фасада по ул. Кирова.

До проведения основных ремонтно-реставрационных работ следует уделить внимание ремонту кровли, водосточных систем, а также работам по гидроизоляции здания.

Все применяемые материалы для ремонта фасада должны быть совместимы с сохраняемыми материалами по своим физико-механическим характеристикам, работать с ними в единой системе, не провоцируя появления и развития дефектов. Долговечность всех применяемых материалов должна быть подтверждена соответствующими лабораторными испытаниями и практикой применения. Окраску следует проводить либо красками на основе исторического связующего – известковыми, либо на силикатном связующем [5, 15, 19].

При реставрации объектов культурного наследия, в особенности при финишном окрашивании, необходимо учитывать две противоположные тенденции. С одной стороны, памятник культуры нужно рассматривать как исторический документ и наследие прошлых веков, с другой, необходимо обновить и вернуть объект к состоянию, которое он имел в исторический момент, создать иллюзию так называемого «эффекта присутствия», не переходя за грань фальсификации [16, 17].

Список цитированных источников

1. Дзяржаўны спіс гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь / склад. В. Я. Абрамскі, І. М. Чарняўскі, Ю. А. Барысюк. – Мінск : БЕЛТА, 2009. – 684 с.
2. Кодэкс Рэспублікі Беларусь аб культуры. – Мінск : Нацыянальны цэнтр прававой інфармацыі Рэспублікі Беларусь, 2016. – 272 с.
3. Тур, Э. А. К вопросу о сохранении объектов историко-культурного наследия в г. Бресте / Э. А. Тур, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2018. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 17–21.
4. Тур, Э. А. Реставрация Коссовского дворца Пусловских и решение возникших при этом технических проблем / Э. А. Тур, В. Н. Казаков, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2017. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 128–131.
5. Тур, Э. А. Исследование минеральных материалов, использованных при постройке дворцового комплекса Сапегов в Ружанах / Э. А. Тур, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 88–91.
6. Ивлиев, А. А. Реставрационные строительные работы / А. А. Ивлиев, А. А. Калыгин. – М. : ПрофОбрИздат, 2001. – 272 с.
7. Фрессель, Ф. Ремонт влажных и повреждённых стенами строительных сооружений / Ф. Фрессель. – М. : ООО «Пэинт-медиа», 2006. – 320 с.
8. Пруцын, О. И. Реставрация и реконструкция архитектурного наследия. Теоретические и методические основы реставрации исторического и архитектурного наследия / О. И. Пруцын. – М. : Академия реставрации, 1996. – 91 с.
9. Скальный, В. С. Проблемы сохранения, причины разрушения и первичное обследование недвижимых памятников архитектуры и истории : монография / В. С. Скальный, Е. В. Косыгин. – Орел : ГАУ, 2003. – 201 с.
10. Реставрация памятников архитектуры / С. С. Подъяпольский [и др.]. – М. : Стройиздат, 1988. – 267 с.
11. Реставрация памятников архитектуры: учебное пособие для вузов / С. С. Подъяпольский [и др.] ; под общ. ред. С. С. Подъяпольского. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 2000. – 288 с.
12. ДАГО Ф. 17. – Воп. 1. – Спр. 177. – Арк. 223.
13. Никитин, Н. К. Химия в реставрации: справ. пособие / М. К. Никитин, Е. П. Мельникова. – Л. : Химия, 1990. – 304 с.
14. Брок, Т. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям / Т. Брок, М. Гротеклаус, П. Мишке ; пер. с англ. под ред. Л. Н. Машляковского. – М. : Пэинт-Медиа, 2004. – 548 с.
15. Комплексные научные исследования фасадов костела святых Петра и Павла в д. Рожанка Гродненской области / Э. А. Тур

[и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2020. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 147–152.

16. Михайловский, Е. В. Методика реставрации памятников архитектуры / Е. В. Михайловский. – М. : Стройиздат, 1977. – 167 с.
17. Куртуков, В. А. Об особенностях выбора строительных материалов для реставрации объектов историко-культурного наследия / В. А. Куртуков // Вестник ТГАСУ – 2012. – № 2. – С. 66–69.
18. Комплексные научные исследования руин усадьбы «Наднёман» в д. Наднёман Узденского района Минской области как объекта историко-культурного наследия / Э. А. Тур [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1. – С. 33–38.
19. Коряков, А. С. Датировка зданий исторической застройки по характерным признакам строительных материалов / А. С. Коряков, А. Е. Гулий // Вестник МГСУ – 2016. – № 9. – С. 62–74.

References

1. Dzyarzhayny spis gistoryka-kul'turnykh kashtoynascej Respubliki Belarus' / sklad. V. Ya. Ablamski, I. M. Charnyayski, Yu. A. Barysyuk. – Minsk : BELTA, 2009. – 684 s.
2. Kodeks Respubliki Belarus' ab kul'tury. – Minsk : Nacyyanal'ny centr pravavoj infarmacyi Respubliki Belarus', 2016. – 272 s.
3. Tur, E. A. K voprosu o sohraneni ob'ektov istoriko-kul'turnogo naslediya v g. Breste / E. A. Tur, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – № 1: Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 17–21.
4. Tur, E. A. Restavraciya Kossovskogo dvorca Puslovskih i reshenie voznikshih pri etom tekhnicheskikh problem / E. A. Tur, V. N. Kazakov, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – № 1: Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 128–131.
5. Tur, E. A. Issledovanie mineral'nykh materialov, ispol'zovannykh pri postroyke dvorcovogo kompleksa Sapegov v Ruzhanah / E. A. Tur, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2014. – № 1: Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 88–91.
6. Ivliev, A. A. Restavracionnye stroitel'nye raboty / A. A. Ivliev, A. A. Kalygin. – M. : ProfObrizdat, 2001. – 272 s.
7. Fryossel', F. Remont vlazhnykh i povrezhdennykh stenyami stroitel'nykh sooruzhenij / F. Fryossel'. – M. : ООО «Pejnt-media», 2006. – 320 s.
8. Prucyn, O. I. Restavraciya i rekonstrukciya arhitekturnogo naslediya. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy restavracii istoricheskogo i arhitekturnogo naslediya / O. I. Prucyn. – M. : Akademiya restavracii, 1996. – 91 s.
9. Skal'nyj, V. S. Problemy sohraneniya, prichiny razrusheniya i pervichnoe obsledovanie nedvizhimykh pamyatnikov arhitektury i istorii : monografiya / V. S. Skal'nyj, E. V. Kosygin. – Orel : GAU, 2003. – 201 s.
10. Restavraciya pamyatnikov arhitektury / S. S. Pod'yapol'skij [i dr.]. – M. : Strojizdat, 1988. – 267 s.
11. Restavraciya pamyatnikov arhitektury: uchebnoe posobie dlya vuzov / S. S. Pod'yapol'skij [i dr.] ; pod obshch. red. S. S. Pod'yapol'skogo. – 2-e izd. – M. : Strojizdat, 2000. – 288 s.
12. DAGO F. 17. – Vop. 1. – Spr. 177. – Ark. 223.
13. Nikitin, N. K. Himiya v restavracii: sprav. posobie / M. K. Nikitin, E. P. Mel'nikova. – L. : Himiya, 1990. – 304 s.
14. Brok, T. Evropejskoe rukovodstvo po lakokrasochnym materialam i pokrytiyam / T. Brok, M. Groteklauss, P. Mishke ; per. s angl. pod red. L. N. Mashlyakovskogo. – M. : Pejnt-Media, 2004. – 548 s.
15. Kompleksnye nauchnye issledovaniya fasadov kostela svyatykh Petra i Pavla v d. Rozhanka Grodnenskoj oblasti / E. A. Tur [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2020. – № 1: Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 147–152.
16. Mihajlovskij, E. V. Metodika restavracii pamyatnikov arhitektury / E. V. Mihajlovskij. – M. : Strojizdat, 1977. – 167 s.
17. Kurtukov, V. A. Ob osobennostyah vybora stroitel'nykh materialov dlya restavracii ob'ektov istoriko-kul'turnogo naslediya / V. A. Kurtukov // Vestnik TGASU – 2012. – № 2. – S. 66–69.
18. Kompleksnye nauchnye issledovaniya ruiny usad'by «Nadnyoman» v d. Nadnyoman Uzdenskogo rajona Minskoj oblasti kak ob'ekta istoriko-kul'turnogo naslediya / E. A. Tur [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1. – S. 33–38.
19. Koryakov, A. S. Datirovka zdaniy istoricheskoy zastroyki po harakternym priznakam stroitel'nykh materialov / A. S. Koryakov, A. E. Gulij // Vestnik MGSU – 2016. – № 9. – S. 62–74.

Материал поступил в редакцию 02.03.2022

УДК 621.833

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСЦЕНТРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО ВАЛОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОПОТОЧНОЙ СХЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ

П. Н. Громыко¹, С. Н. Хатетовский², В. Л. Юркова³, Д. Ю. Макацария⁴

¹ Д. т. н, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Республика Беларусь, e-mail: grom_7@tut.by

² К. т. н, доцент, заведующий кафедрой металлорежущих станков и инструментов межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Республика Беларусь, e-mail: mechlab@yandex.ru

³ Инженер по патентной и изобретательской работе межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Республика Беларусь, e-mail: vikenzia.89@mail.ru

⁴ К. т. н, доцент, доцент кафедры автомобильные дороги межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Республика Беларусь, e-mail: dexteru@mail.ru

Реферат

В статье рассмотрена основная структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с многопоточной схемой нагружения. Разработана компьютерная модель на основе указанной кинематической схемы с возможностью ее использования для исследований однопоточной схемы нагружения. Проведен сравнительный компьютерный анализ основных показателей эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов однопоточной и многопоточной схем. Показано, что основные показатели эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с многопоточной схемой нагружения имеют показатели на уровне известных соосных передач эксцентрикового типа.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, КПД зацепления, механические потери мощности, основные показатели эксцентриковой передачи, сателлиты, эксцентриковая передача с параллельными входным и выходным валами, структурная схема эксцентриковой передачи, многопоточная схема нагружения.

MAIN INDICATORS OF ECCENTRIC TRANSMISSION WITH PARALLEL ARRANGEMENT OF INPUT AND OUTPUT SHAFTS ON THE BASIS OF THE USE OF A MULTI-FLOW LOADING SCHEME

P. N. Gromyko, S. N. Khatetovsky, V. L. Yurkova, D. Yu. Makatsaria

Abstract

The article considers the main structural diagram of an eccentric transmission with parallel arrangement of the input and output shafts with a multi-threaded loading scheme. A computer model has been developed based on the indicated kinematic scheme with the possibility of its use for studying a single-flow loading scheme. A comparative computer analysis of the main indicators of an eccentric transmission with a parallel arrangement of the input and output shafts of single-flow and multi-flow schemes has been carried out. It is shown that the main indicators of an eccentric gear with a parallel arrangement of the input and output shafts with a multi-flow loading scheme have indicators at the level of known coaxial eccentric gears.

Keywords: computer simulation, gearing efficiency, mechanical power losses, main indicators of eccentric transmission, satellites, eccentric transmission with parallel input and output shafts, block diagram of eccentric transmission, multiflow loading scheme.

Введение

Отличительной особенностью эксцентриковых передач является возможность трансформации вращения при параллельном расположении входного и выходного валов при значительных по величине коэффициентах редуцирования [1, 2, 3]. Определение основных показателей эксцентриковой передачи возможно на основе методов компьютерного моделирования, так как применение аналитических методов расчета затруднительно в виду необходимости решения множества контактных задач. Рассмотрена структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов, разработана компьютерная модель. Проведены сравнительные результаты компьютерных моделей эксцентриковых передач при параллельном расположении входного и выходного валов с многопоточной и однопоточной схемами нагружения.

Анализ основных показателей эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов позволил создавать с использованием многопоточной схемы редуцирующие механизмы, имеющие основные показатели на уровне известных соосных эксцентриковых передач [4, 5].

Многопоточная схема нагружения эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов

Рассмотрим многопоточную структурную схему эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов, показанную на рисунке 1.

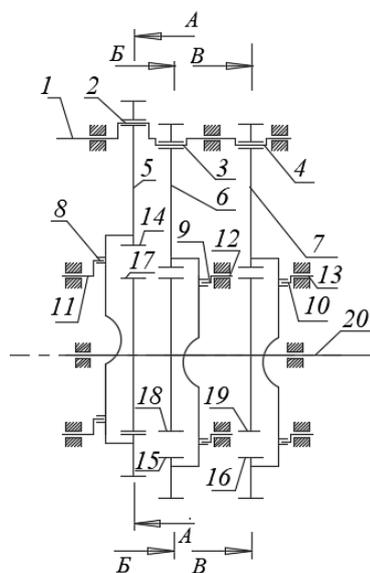


Рисунок 1 – Структурная схема эксцентриковой передачи с тремя эксцентриковыми кривошипами 2, 3, 4 на входном валу 1

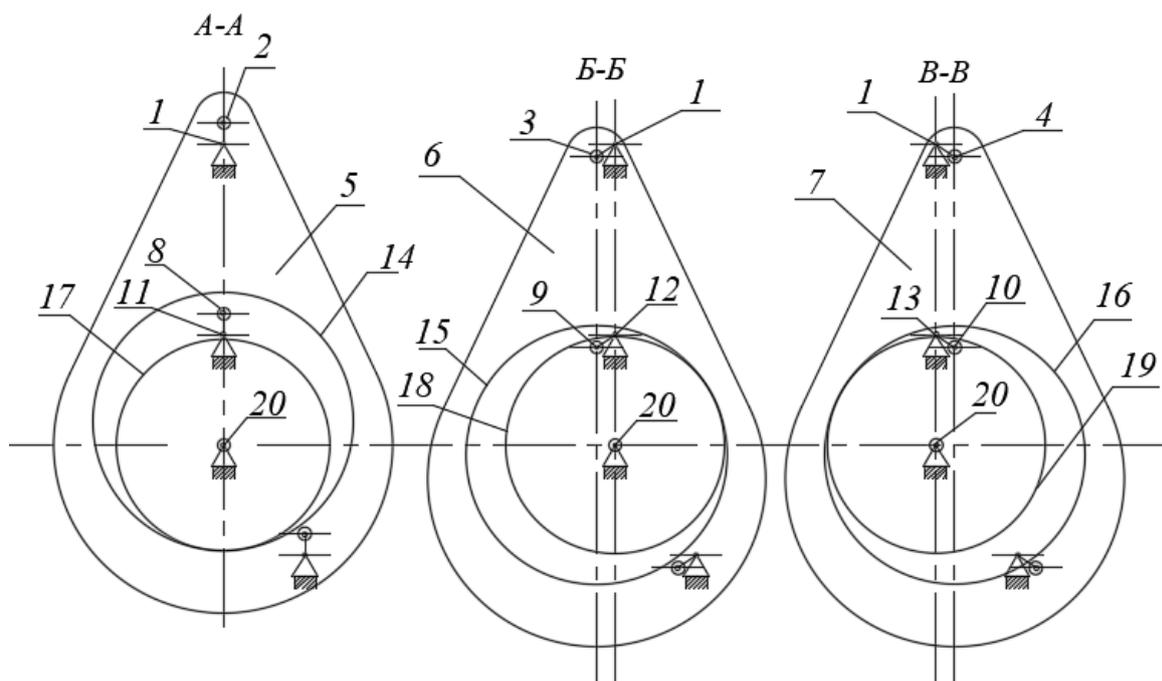


Рисунок 2 – Разрезы эксцентриковой передачи многопоточной схемы нагружения с тремя эксцентриковыми кривошипами 2, 3, 4, расположенными под углами друг относительно друга, равными 120°

Эксцентриковая передача содержит входной вал 1, расположенный на неподвижных подшипниковых опорах, на котором жестко посажены эксцентриковые кривошипы 2, 3, 4, составляющие вращательную пару с отверстиями сателлитов 5, 6, 7 (рисунок 1). Сателлиты 5, 6, 7, благодаря наличию вращательных пар между отверстиями сателлитов 5, 6, 7 и дополнительных кривошипов 8, 9, 10, размещенных на дополнительных осях 11, 12, 13, совершают поступательное движение. Причем, сателлиты 5, 6, 7, имеющие вращение от основных кривошипов 2, 3, 4 входного вала 1 под углом 120°, совершают разнонаправленное поступательное движение (см. рисунок 2). Каждый из сателлитов 5, 6, 7 имеет внутренние зубчатые венцы 14, 15, 16, которые одновременно взаимодействуют с наружными зубчатыми колесами 17, 18, 19. Наружные колеса 17, 18, 19 закреплены на выходном валу 20. Таким образом, передаточное отношение предлагаемой эксцентриковой передачи определяется по следующей формуле:

$$u = - \frac{Z_{17}}{Z_{14} - Z_{17}},$$

где Z_{14} – количество зубьев внутреннего зубчатого венца 14 сателлита 5;

Z_{17} – количество зубьев внутреннего зубчатого венца 17 сателлита 7.

Следует отметить, что количество зубьев Z_{14} внутреннего зубчатого венца 14 сателлита 5 должно быть равно количеству зубьев Z_{15} сателлита 6, а также количеству зубьев Z_{16} сателлита 7. Количество зубьев Z_{17} наружного зубчатого венца 17 должно быть равно количеству зубьев Z_{18} наружного зубчатого венца 18 и количеству зубьев Z_{19} наружного зубчатого венца 19.

Разработка компьютерной модели эксцентриковой передачи с тремя эксцентриковыми кривошипами с возможностью ее использования для исследования однопоточной схемы нагружения

На основе структурной схемы эксцентриковой передачи, изображенной на рисунке 1 и рисунке 2, разработана компьютерная модель, показанная на рисунке 3.

Методика исследований эксцентриковых передач методами компьютерного моделирования рассмотрена в работе [5].

Компьютерная модель эксцентриковой передачи содержит входной вал 1 с размещенными на нем жестко тремя эксцентриковыми кривошипами 2, 13, 23, смещенными относительно друг друга под углами, равными 120°. На эксцентриковых кривошипах 2, 13, 23 размещены узлы вращения, соединенные с отверстиями сателлитов 4, 15, 25. На внутренних поверхностях сателлитов 4, 15, 25 имеются внутренние зубчатые венцы, которые входят в зацепление с тремя наружными венцами зубьев центральных колес (одно из трех наружных центральных колес 18 показано на рисунке 3). На компьютерной модели эксцентриковой передачи на сателлитах 4, 15, 25 жестко закреплены ролики 5, 10, 30, входящие в отверстия неподвижных центральных дисков 6, 25, 29. Ролики 5, 10, 30 и отверстия неподвижных центральных дисков 6, 25, 29 представляют собой контактирующие пары (3D-контакт). Следует отметить, что указанные выше контактирующие пары роликов 5, 10, 30 и отверстий неподвижных центральных дисков 6, 25, 29 ранее показаны на рисунке 1 в виде дополнительных кривошипов 8, 9, 10 и дополнительных осей 11, 12, 13. Т. е. на рисунке 1 с точки зрения технологичности шарнирное соединение дополнительных кривошипов 8, 9, 10 с дополнительными осями 11, 12, 13 заменено на компьютерной модели (см. рисунок 3) на контактное соединение роликов 5, 10, 30 и отверстий неподвижных центральных дисков 6, 25, 29.

Особенностью компьютерной модели, изображенной на рисунке 3, является возможность применения многопоточной схемы нагружения для исследования однопоточной схемы нагружения. Компьютерная модель, изображенная на рисунке 3, преобразовывается таким образом, что все взаимодействующие соединения звеньев эксцентриковой передачи деактивированы, за исключением только двух контактных пар. Одна из контактных пар – это контактная пара (3D-контакт) центрального колеса 18 и внутреннего зубчатого венца сателлита 15 и другая – это контактная пара (3D-контакт) роликов 5, жестко закрепленных на сателлите 15, и отверстий неподвижных центральных колес 29. В результате преобразований (за счет деактивированных контактов) переработанная компьютерная модель содержит входной вал 1, на котором расположен эксцентриковый кривошип 13, с сателлитом 15. На внутренних поверхностях сателлита 15 расположен внутренний зубчатый венец, который входит в зацепление с венцами зубьев центрального колеса 18 (3D-контакт). Таким образом, переработанная компьютерная модель эксцентриковой передачи представляет собой модель с однопоточной схемой нагружения, на ее основе ниже проведены сравнительные результаты исследований.

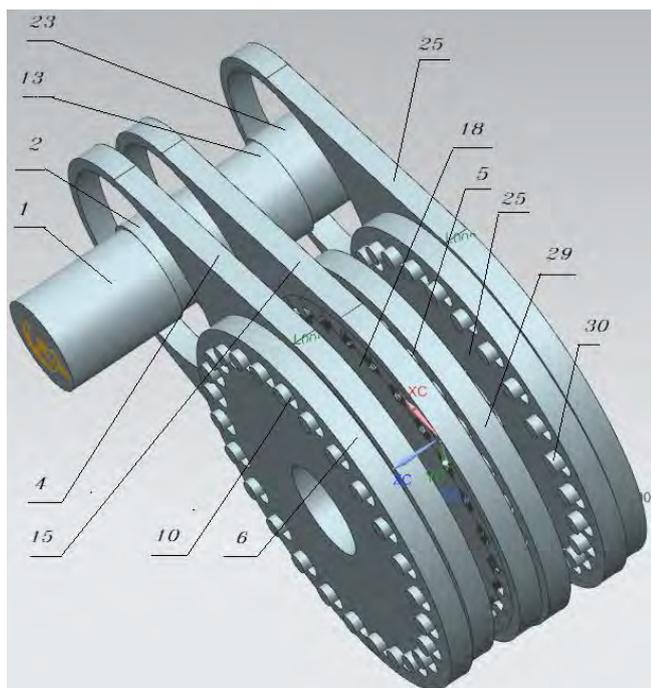


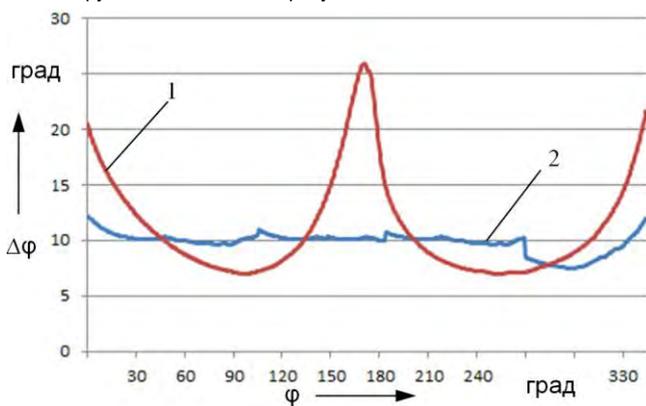
Рисунок 3 – Компьютерная модель эксцентриковой передачи с тремя кривошипными 2, 13, 23, расположенными под углом относительно друг друга, равными 120°

Результаты компьютерных исследований эксцентриковой передачи при однопоточной и многопоточной схемах нагружения

Выше представлена компьютерная модель (рисунок 3) эксцентриковой передачи с тремя кривошипными валами с возможностью ее использования для моделирования как однопоточной, так и многопоточной схем нагружения.

На рисунках 4–6 отражены графические зависимости кинематической погрешности вращения выходных центральных колес, КПД зацепления и реакций опор эксцентрикового кривошипа от угла поворота входного вала.

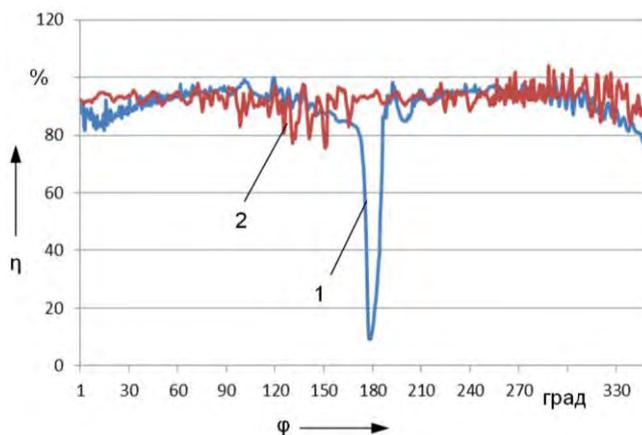
Зависимости кинематической погрешности вращения выходного вала от угла поворота входного вала однопоточной и многопоточной схем нагружения показаны на рисунке 4.



1 – однопоточная схема нагружения;
2 – многопоточная схема нагружения

Рисунок 4 – Зависимость кинематической погрешности выходных центральных колес от угла поворота входного вала

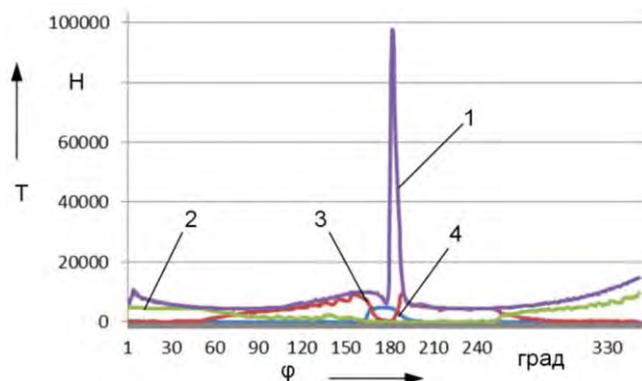
Результаты компьютерных исследований показали, что при наличии многопоточной схемы нагружения значения кинематической погрешности вращения выходных центральных колес ниже на 7–10 угловых минут, чем значения кинематической погрешности кинематической погрешности с однопоточной схемой нагружения.



1 – однопоточная схема нагружения;
2 – многопоточная схема нагружения

Рисунок 5 – Зависимость КПД от угла поворота входного вала эксцентриковой передачи

Анализ графических зависимостей КПД (см. рисунок 5) от угла поворота входного вала позволяет установить, что при угле входного вала в интервале от 170° до 200° наблюдается резкое снижение потерь в однопоточной схеме нагружения (до 10 %). В тоже время значение КПД в многопоточной схеме колеблется на уровне от 78 % до 100 %.



1 – реакции на опорном кривошипе 13 на однопоточной схеме нагружения; 2 – реакции на опорном кривошипе 3 на многопоточной схеме нагружения; 3 – реакции на опорном кривошипе 13 на многопоточной схеме нагружения; 4 – реакции на опорном кривошипе 23 на многопоточной схеме нагружения

Рисунок 6 – Зависимость реакций на опорных кривошипах входного вала от угла поворота входного вала

Зависимости реакций на опорных кривошипах входного вала от угла его поворота позволяют сделать вывод, что при многопоточной схеме нагружения не наблюдается рост значения реакций на опорных кривошипах входного вала (до 9000 Н). При однопоточной схеме нагружения значения реакций на эксцентриковом кривошипе при угле входного вала порядка 180° возрастают до 100000 Н.

Результаты компьютерных исследований позволяют сделать следующие выводы: при однопоточной схеме нагружения при угле входного вала порядка 180° наблюдается резкое повышение кинематической погрешности вращения выходных центральных колес, снижение КПД, а также высокий рост значений реакций в эксцентриковом кривошипе входного вала по сравнению при работе многопоточной схемы нагружения.

Некоторые аналитические выводы по основным показателям эксцентриковых передач с параллельным расположением входного и выходного валов с однопоточной и многопоточной схемами нагружения изложены в работах [6, 7]. Выше приведенные компьютерные

исследования позволяют компьютерно подтвердить возможность снижения таких основных показателей как кинематической погрешности, КПД, а также реакции в эксцентриковом кривошипе в случае замены однопоточной схемы на многопоточную схему нагружения.

Следует также отметить, что равное количество дополнительных потоков мощности на входном валу дополнительно гарантирует уравновешивание вращающихся звеньев и правильное перераспределение потоков мощности для кинематического и силового потоков.

Заключение

Повышение количества потоков мощности на входном валу передачи позволяет в случае параллельного расположения входного и выходного валов, по сравнению с однопоточной схемой нагружения, значительно повысить кинематическую точность вращения выходного звена, увеличить значение КПД, а также эксцентриковой передачи. Показатели эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с многопоточной схемой нагружения имеют показатели на уровне известных соосных передач эксцентрикового типа.

Равное количество дополнительных потоков мощности при многопоточной схеме нагружения на входном валу дополнительно гарантирует уравновешивание вращающихся звеньев и правильное перераспределение силовых потоков мощности.

Список цитированных источников

1. Макаревич, А. С. Передачи эксцентрикового типа с параллельным расположением входного и выходного валов / А. С. Макаревич, П. Н. Громыко // Материалы 55-й студ. науч.-техн. конф. 3–4 мая 2019 г. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 150.
2. А. с. 1778392 СССР, МКИ³ F16H 1/32. Планетарная передача / Г. П. Большаков, (СССР). – № 4767192/28 ; заявл. 11.12.89 ; опубл. 30.11.92, Бюл. № 44. – 3 с.: ил.
3. Громыко, П. Н. Силовой анализ контактирующих зубьев эксцентриковой передачи, формообразованных на основе использования удлиненной эпициклоиды / П. Н. Громыко, Д. Ю. Макацария, Р. А. Бондарев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 3. – С. 5–13.
4. Совершенствование механизма передачи движения на выходное звено в эксцентриковых передачах типа К-Н-V / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, Д. Ю. Макацария // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 27–33.
5. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач: монография / П. Н. Громыко [и др.] ; под общ. ред. П. Н. Громыко. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2007. – 271 с.
6. Пат. 12380 РБ, МПК F 16 H 1/32. Планетарная эксцентриковая передача / П. Н. Громыко, С. Д. Макаревич, А. С. Макаревич ; заявитель и патентообладатель Белорусско-Российский университет. – № u 20190289 ; заявл. 15.11.19 ; опубл. 30.08.2020, Бюлл. № 4 – 12 с.
7. Заявка а 20190327 РБ, МПК F 16 H 1/32. Планетарная эксцентриковая передача / П. Н. Громыко, С. Д. Макаревич, А. С. Макаревич ; заявитель Белорусско-Российский университет – заявл. 18.11.19 – 12 с.

References

1. Makarevich, A. S. Peredachi ekscentrikovogo tipa s parallel'nym raspolozheniem vhodnogo i vyhodnogo valov / A. S. Makarevich, P. N. Gromyko // Materialy 55-j stud. nauchno-tekh. konferencii 3–4 maya 2019 g. – Mogilev : Belarus.-Ros. un-t, 2019. – S. 150.
2. A. s. 1778392 SSSR, MKI³ F16N 1/32. Planetarnaya peredacha / G. P. Bol'shakov, (SSSR). – № 4767192/28 ; zayavl. 11.12.89 ; opubl. 30.11.92, Byul. № 44. – 3 s.: il.
3. Gromyko, P. N. Silovoj analiz kontaktiruyushchih zub'ev ekscentrikovoj peredachi, formoobrazovannyh na osnove ispol'zovaniya udlinennoj e-piciklojdy / P. N. Gromyko, D. Yu. Makacariya, R. A. Bondarev // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. – 2021. – № 3. – S. 5–13.
4. Sovershenstvovanie mekhanizma peredachi dvizheniya na vyhodnoe zvено v ekscentrikovyh peredachah tipa K-H-V / P. N. Gromyko, S. N. Hatetovskij, D. Yu. Makacariya // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2021. – № 2. – S. 27–33.
5. Komp'yuternoe modelirovanie planetarnyh precessionnyh peredach: monografiya / P. N. Gromyko [i dr.] ; pod obshch. red. P. N. Gromyko. – Mogilev : Belarus.-Ros. un-t, 2007. – 271 s.
6. Pat. 12380 RB, MPK F 16 H 1/32. Planetarnaya ekscentrikovaya peredacha / P. N. Gromyko, S. D. Makarevich, A. S. Makarevich ; zayavitel' i patentoobladatel' Belorussko-Rossijskij universitet. – № u 20190289 ; zayavl. 15.11.19 ; opubl. 30.08.2020, Byull. № 4 – 12 s.
7. Zayavka a 20190327 RB, MPK F 16 H 1/32. Planetarnaya ekscentrikovaya peredacha / P. N. Gromyko, S. D. Makarevich, A. S. Makarevich ; zayavitel' Belorussko-Rossijskij universitet – zayavl. 18.11.19 – 12 s.

Материал поступил в редакцию 04.04.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА РАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ ШПОНА И ТОЧНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ФАНЕРНЫХ СОРТИМЕНТОВ

Ю. К. Калугин¹, С. Д. Лещик², А. И. Филиппов³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей

Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, e-mail: yustk@list.ru

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой машиноведения и технической эксплуатации автомобилей

Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, e-mail: s.lesh@grsu.by

³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой механизации сельскохозяйственных производств автомобилей

Гродненского государственного аграрного университета, Гродно, Беларусь, e-mail: kafmehan@mail.ru

Реферат

Предложен метод оценивания влияния упругих перемещений шпиндельного узла на равномерность толщины шпона и точность базирования при переработке фанерных сортиментов. Данная методика использована для анализа упругих перемещений шпиндельного узла, возникающих в результате вибрационных процессов в шпинделе лущильного станка и его опорных элементах, и оценки их влияния на качественные показатели процесса переработки древесины и базирования фанерных сортиментов при переработке. На примере конструкции шпиндельного узла лущильного станка ЛУ-17 рассмотрены факторы, влияющие на формирование приведенных коэффициентов жесткости динамической системы. Полученные результаты частотного анализа динамических свойств элементов шпиндельного узла при воздействии различных факторов позволят улучшить динамические характеристики и наметить направления для модернизации функционирующего в настоящее время оборудования для лущения шпона.

Ключевые слова: динамические процессы, частотный анализ, собственные колебания, вынужденные колебания, резонанс, точность изготовления, базирование, точность лущенного шпона, имитационная модель, система инженерного анализа.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ELASTIC DISPLACEMENTS OF THE SPINDLE ASSEMBLY ON THE UNIFORMITY OF VENEER THICKNESS AND THE ACCURACY OF BASING DURING THE PROCESSING OF PLYWOOD GRADES

Y. K. Kalugin, S. D. Leshchik, A. I. Filippov

Abstract

A method is proposed for estimating the effect of elastic displacements of the spindle assembly on the uniformity of the veneer thickness and the accuracy of basing during the processing of plywood grades. This technique is used to analyze the elastic displacements of the spindle assembly arising as a result of vibration processes in the spindle of the peeling machine and its supporting elements, and to assess their impact on the quality indicators of the wood processing process and the basing of plywood grades during processing. By the example of the design of the spindle assembly of the LU - 17 lathe, the factors influencing the formation of the reduced stiffness coefficients of the dynamical system are considered. The obtained results of the frequency analysis of the dynamic properties of the elements of the spindle assembly under the influence of various factors will improve the dynamic characteristics and outline directions for the modernization of the currently functioning equipment for peeling veneer.

Keywords: dynamic processes, frequency analysis, natural oscillations, forced oscillations, resonance, manufacturing accuracy, basing, accuracy of tinning veneer, simulation model, engineering analysis system.

Введение

На основании расчетных методов, приведенных в научных источниках, можно констатировать, что повышение точности лущенного шпона по толщине в два раза позволит уменьшить расход сырья на 1 м³ произведенной фанеры на 3,5 % и за счет этого получить значительный экономический эффект [1]. Основной причиной колебаний толщины лущенного шпона является ограниченная и непостоянная жесткость узлов лущильного станка. Поле рассеяния толщины шпона в результате погрешностей изготовления или износа отдельных звеньев кинематической цепи механизмов подачи и резания по данным профессора В. А. Куликова для эксплуатируемых типов лущильных станков составляет в среднем 0,10..0,15 мм. Эта величина на практике соответствует колебаниям толщины шпона, полученного из одного сортимента, в пределах 0,1..0,6 мм. При наличии жесткой связи между шпинделями станка и суппортом, колебания толщины шпона, вызываемые неравномерностью перемещения режущего инструмента, неизбежны. Основная причина периодических колебаний – непостоянство жесткости шпинделей в пределах одного оборота.

Шпиндельные узлы (ШУ) вызывают от 60 до 85 % погрешностей в общем балансе точности станка [2]. Качество шпиндельного узла оказывает самое существенное влияние на точность, надежность, производительность всего станка. Таким образом, динамическое качество ШУ напрямую влияет на качество выпускаемой продукции. При существующей тенденции в конструировании ШУ, когда шпиндель принимают как абсолютно жесткий вал на упругих опорах,

динамическое качество ШУ будет полностью определяться упруго-демпфирующими характеристиками его опор, которые в 90–95% случаях для ШУ станочного парка состоят из подшипников качения. Упруго-демпфирующие характеристики ШУ во многом зависят от конструкции, выбора подшипников и предварительного натяга подшипниковых опор. Оптимизация параметров этих составных частей шпиндельного узла является одной из самых сложных проблем конструирования и производства технологического оборудования.

Периодические нагрузки на шпиндельный узел формируются при взаимодействии лущильного ножа с сортиментом. С ростом скоростей динамические воздействия возрастают, оказывая существенное влияние на точность и производительность станка. К числу наиболее важных динамических характеристик шпиндельного узла относятся: круговая частота собственных колебаний, резонанс, критическая частота вращения шпинделя, амплитуда колебаний, динамические силы в опорах шпинделя, амплитудно-фазовая частотная характеристика и др. Эти характеристики и определяют жесткость механической системы станка. Перечисленные выше процессы в значительной степени влияют на точность базирования, качество переработки древесного сырья и конечной продукции.

Шпиндельный узел лущильного станка состоит из шпинделя, его опор и приводного элемента, заключенных, как правило, в отдельном корпусе. В станке ЛУ-17 установлены два шпиндельных узла, размещенных на общей станине. Конструкцию шпинделя определяют следующие особенности:

- а) размер шпинделя, расстояние между опорами, наличие отверстия для пропуска материалов или других целей;
- б) приводные детали (шестерни, шкивы) и их расположение на шпинделе;
- в) конструкция опор и тип подшипников;
- г) метод крепления приспособления для детали или инструмента, что влияет на конструкцию переднего конца шпинделя.

Размеры шпинделя, его длина и диаметр, расстояние между опорами, упругие и демпфирующие параметры опор определяют инерционные и собственные жесткостные и диссипативные характеристики шпиндельного узла и формируют собственную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Анализ влияния, перечисленных выше конструктивных параметров на динамические параметры ШУ, приведен в работе [2].

Таким образом, конструктивные особенности шпинделя и узла установки подшипников определяют динамическое качество ШУ и исследование динамических характеристик ШУ путем моделирования его параметров и протекающих в нем процессов, приобретает особую актуальность. Это, в свою очередь, позволит решить задачу прогнозирования необходимого динамического качества еще на стадии проектирования ШУ, тем самым минимизировать затраты на этапе изготовления и эксплуатации. Применяемые для анализа методы компьютерного имитационного моделирования позволят автоматизировать процесс диагностики, выявить слабые места в механической системе, повысить точность конечной продукции и разработать способы повышения экономической эффективности процесса лущения.

Целью данной работы является установление факторов, характеризующих качественные показатели продукции и точности базирования на основе компьютерного моделирования и анализа частотных процессов, возникающих в шпиндельном узле лущильного станка и его опорных элементах.

Определение собственных и вынужденных изгибных частот шпинделя лущильного станка с учетом упругости опор

В шпинделях станка могут возникать продольные, поперечные, осевые и крутильные колебания. По виду их подразделяют на собственные, вынужденные и автоколебания. Так как шпиндель имеет сложную конструкцию и в процессе работы станка на него действует большое количество различных факторов как систематического, так и случайного характера, в том числе от смежных технологических систем, то расчет колебаний представляет определенную трудность. Основная характеристика шпинделя для оценки его виброустойчивости – частота собственных колебаний f_c . Обычно чем ниже частота колебаний, тем меньше виброустойчивость, так как для возбуждения колебаний на низкой частоте затрачивается меньше энергии.

Колебания одного из шпиндельных узлов, установленных в лущильном станке, как системы с одной степенью свободы (рисунок 1) описываются дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами [2]: m – приведенная масса шпинделя, $P(b)$ – приведенная характеристика демпфирующих свойств системы, K – приведенная жесткость системы.

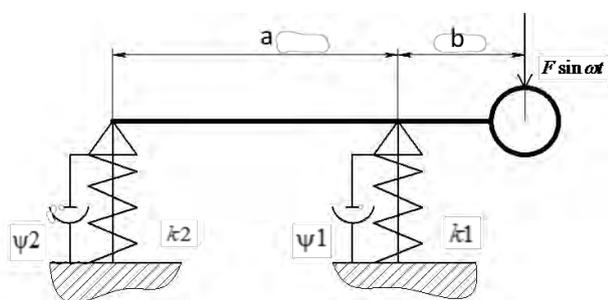


Рисунок 1 – Расчетная схема для моделирования шпиндельного узла станка ЛУ-17-4

Чаще всего находятся колебания переднего конца шпинделя, к которому приводятся все постоянные коэффициенты:

$$m\ddot{y} + \beta\dot{y} + k_y y = F \sin \omega t \quad (1)$$

Если разделить обе части уравнения на массу шпинделя, получим

$$\ddot{y} + 2by + p^2 y = \frac{F}{m} \sin \omega t \quad (2)$$

где, $\frac{\beta}{m} = 2b$; $\frac{k}{m} = p^2$; p – круговая частота собственных колебаний.

Уравнение (1) в нашем случае характеризует равновесие динамической системы шпиндельного узла под действием приложенных к ней сил: \ddot{y} – сила инерции, β – сила вязкого сопротивления (сила трения), k_y – сила упругости, $F \sin \omega t$ – периодически изменяющаяся внешняя сила, где ωt – круговая частота внешнего воздействия.

Решение уравнения (2) состоит из двух частей. Первая часть включает полное решение однородного уравнения (при $F = 0$), ($y = a$), и вторая часть – частное решение неоднородного уравнения $y = A$, которые соответственно описывают собственные – a и вынужденные – A , колебания динамической системы шпиндельного узла:

$$y = a + A = a_0 e^{-bt} + y_{cm} \mu \quad (3)$$

где a_0 – начальная амплитуда собственных колебаний; $y_{cm} = \frac{F}{k}$, статический прогиб шпиндельного вала под действием силы F ; μ – динамический коэффициент:

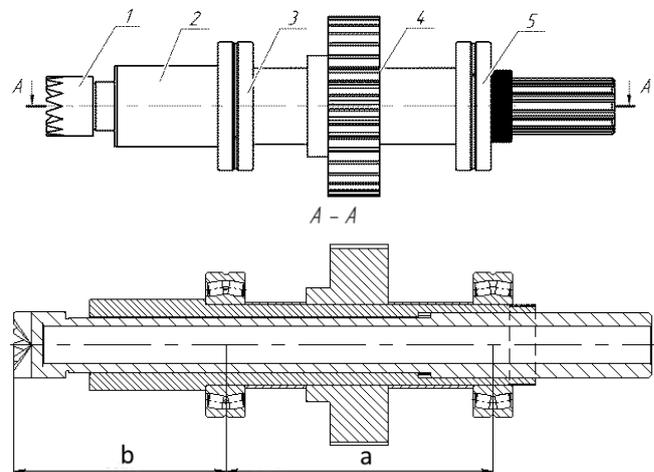
$$\mu = \left[\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + 4 \frac{b^2 \omega^2}{p^4}} \right]^{-1} \quad (4)$$

Частота собственных колебаний шпинделя определяется через круговую частоту собственных колебаний p и определяется через следующие соотношения:

$$p = \sqrt{\frac{k}{m}}; f = \frac{p}{2\pi} \quad (5)$$

Из уравнения (3) следует: собственные колебания механической системы (шпиндельного узла) затухают с течением времени t и в установившемся процессе можно учитывать только вынужденные колебания, которые в большинстве случаев связаны с технологическими параметрами оборудования.

Структурная схема для определения динамических характеристик одного из шпиндельных узлов приведена на рисунке 2.



1 – кулачки; 2 – наружный трубчатый вал; 3,5 – подшипники; 4 – колесо зубчатое

Рисунок 2 – Основные конструктивные элементы шпиндельного узла станка ЛУ-17-4

Учитывая значительные размеры и вес деталей шпинделя, анализ динамических характеристик с помощью встроенного модуля CAE системы позволит с достаточной точностью определить частоту и амплитуду свободных и вынужденных колебаний и, как следствие, параметры податливости и жесткости шпиндельного узла и его виброустойчивость. Приведенные математические формулы и зависимости представляют обобщенный алгоритм динамического анализа механической системы, реализованный в программной среде.

Результаты исследования и их обсуждение

Для изучения причин возникновения паразитных вибрационных процессов в механической системе был проведен частотный анализ резонансных колебаний одного из шпиндельных узлов лущильного станка ЛУ-17-4, с помощью встроенного модуля частотного анализа и твердотельной имитационной модели.

Посредством метода трехмерного параметрического моделирования, в соответствии со сборочным конструкторским чертежом, была разработана твердотельная модель шпиндельного узла, состоящая из пустотелого телескопического вала, вращающегося в двух опорах. В качестве опорных элементов были использованы стандартные модели двухрядных радиально-упорных подшипников, применяющиеся в действующем оборудовании.

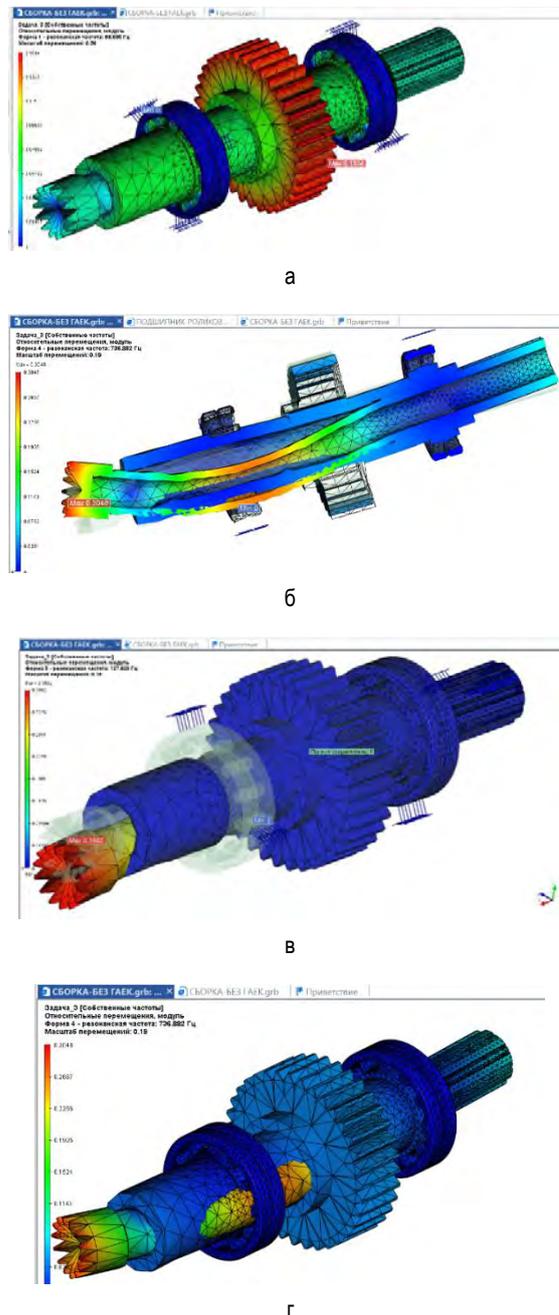
При проектировании были учтены фактические размерные характеристики деталей и расстояния между опорами. Вес спроектированного узла составил – 180,4 кг. Расстояние между опорами (подшипниками) – 460 мм. Характерной особенностью данного узла является наличие ступенчатых участков с различными динамическими свойствами и телескопического наружного и внутреннего шпинделя. Процесс анализа динамических свойств узла состоял из нескольких этапов. Вначале определялись собственные колебания, вызываемые резонансными частотами без нагрузки, затем на основе полученных результатов анализировались вынужденные колебания и в завершение определялись результаты комплексного анализа, оценивалось их влияние на качественные показатели процесса лущения и конечной продукции и рассматривались варианты оптимизации элементов конструкции анализируемого узла. Анализ собственных частот шпиндельного узла проводился методом конечных элементов, с помощью встроенного в систему модуля частотного анализа. После автоматической генерации трёхмерной сетки конечных элементов, на основе сформированной имитационной модели, был проведен анализ собственных частот шпиндельного узла. На рисунке 3 показана сформированная имитационная модель шпиндельного узла и результирующая сетка конечных элементов, сгенерированная программой.



Рисунок 3 – Трёхмерная твердотельная и конечно-элементная сеточная модель шпиндельного узла станка ЛУ-17-4

При выполнении анализа собственных резонансных частот шпиндельного узла [3] были зафиксированы четыре значения, при которых могут произойти существенные конструктивные изменения.

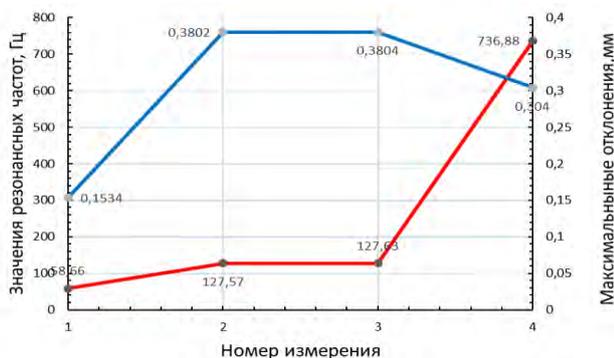
Сформированные формы изменений конструкции деталей под действием собственных резонансных частот показывают, какую форму примет ось шпинделя при колебаниях на собственных частотах, равных 58,6; 127,57; 127,63 и 736,88 Гц соответственно. Полученные значения частот являются расчетными, они зависят от свойств материала деталей и топологических особенностей конструкции отдельных элементов. Значения частот сформированы в соответствии с вычислительным алгоритмом системного модуля. При этом детали конструкции имеют размеры и форму, соответствующие фактическим сборочным единицам. Предполагаемые изменения формы отдельных элементов конструкции шпиндельного узла для различных значений частот показаны на рисунке 4.



а – зоны максимальных отклонений шпинделя для частоты 58,66 Гц;
 б – структурные изменения внутреннего трубчатого вала при резонансной частоте 736,86 Гц; в – изменение формы элементов шпиндельного узла при резонансной частоте 127,62 Гц;
 г – изменение формы элементов шпиндельного узла при резонансной частоте 736,86 Гц

Рисунок 4 – Изменения формы элементов конструкции шпиндельного узла под действием собственных резонансных частот

Анализируя полученные результаты [4], были определены предельные значения возможных отклонений конечных участков шпинделей. Данные анализа предельных значений структурированы по виду колебаний (собственные и вынужденные) и представлены в виде графиков для каждого диапазона измерений (рисунок 5).



1 – максимальные отклонения участков шпиндельного вала;
2 – спектр резонансных частот.

Рисунок 5 – Резонансные частоты (собственные колебания) шпиндельного узла и значения максимальных отклонений шпинделя для каждой частоты.

Анализируя графическую зависимость значений резонансных частот и изменение отклонений участков шпиндельного вала, были определены наиболее критические значения перемещений точек и участков вала, способствующих возникновению погрешностей базирования и потерь качественных показателей шпона (перемещение шпинделя на частоте резонанса 127 Гц). Однако наиболее характерными являются данные, полученные для анализа резонансных вибраций при воздействии вынужденных колебаний (частоты вращения шпиндельного вала и силовые нагрузки). Результат исследования вынужденных колебаний более развернут и включает большое количество результатов, среди которых наибольшую значимость представляют перемещения в направлении осей X,Y,Z и виброперегрузки. По данным измерений построены графики зависимостей (рисунок 6).

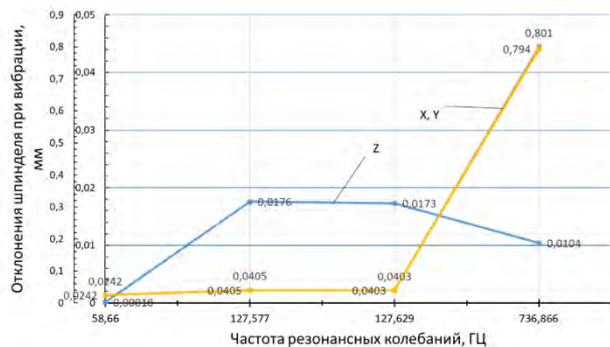


Рисунок 6 – Резонансные частоты (вынужденные колебания) шпиндельного узла и значения максимальных отклонений шпинделя для каждой частоты

Из приведенных графических зависимостей следует, что максимальные виброперегрузки могут возникнуть при частоте резонансных колебаний – 736,866 Гц. Направления максимальных перемещений шпинделя в соответствии с расчетной схемой – Y, Z. Повышенные значения перемещений шпинделя в этих направлениях вызваны приложенной к шпиндельному валу нагрузкой (сила обжима, составляющая силы резания, крутящий момент).

Несмотря на незначительные расчётные отклонения, вызванные изгибными колебаниями, выявлены проблемные зоны в механической системе шпиндельных узлов, способствующие возникновению смещения кулачковых зажимов, вызывающего разнотолщинность ленты шпона и отклонения от базовой оси вращения [3,4]. Такие явления особенно могут проявляться, если учесть, что шпиндели

находятся на определенном расстоянии друг от друга (преимущественно – 1,6 м). Так, например, для частоты свободных колебаний 127 Гц (эта частота наиболее близка к частоте вращения шпинделей лущильного станка (109, 147, 220 мин⁻¹) максимальное перемещение оси одного шпинделя составляет 0,38 мм. Если учесть совместное использование двух шпинделей, отклонение может составить $\Delta = 0,38 \cdot 2 = 0,76$ мм. При таком отклонении, по данным профессора В. А. Куликова, изменение толщины шпона составит более 2 мм. Такая погрешность при обработке древесины на лущильном станке неизбежно приведет к возникновению некондиционной продукции. Податливость механической системы шпиндельных узлов в станках старого поколения также влияет и на объемный выход полезной продукции. По данным фирмы Rautе (Финляндия), отклонения от оптимальной оси на 1 мм, для чураков диаметром 200 мм, приведет к 2,5 % потерь полезной древесины с одного фанерного чурака.

Заключение

Оценив спектр собственных частот колебаний конструкций на стадии проектирования или эксплуатации, можно оптимизировать конструкцию или выполнить модернизацию шпиндельного узла для выполнения условий частотной виброустойчивости. Для повышения значений собственных частот необходимо придать конструкции больше жесткости и уменьшить ее массу. Для случая испытания шпиндельного вала можно повысить жесткость, уменьшив его длину или увеличив толщину стенок трубчатого основания.

Таким образом, с помощью полученных результатов, анализируя предполагаемые изменения в конструкции шпиндельных узлов на различных резонансных частотах, можно оценить влияние упругих перемещений шпиндельного узла на равномерность толщины лущеного шпона и точность базирования при переработке фанерных сортиментов.

Список цитированных источников

- Алифанов, А. В. Влияние точности базирования фанерных сортиментов и жесткости механической системы лущильного оборудования на качество шпона / А. В. Алифанов, Ю. К. Калугин, Н. В. Бурносос // Труды БГТУ. – 2011. – № 2 (140). – С. 231–234.
- Рохин, В. Л. Проектирование шпиндельных узлов на опорах качения методические указания / В. Л. Рохин. – Курган, 1998: Ч. 1. Типовые конструкции шпиндельных узлов – 28 с.
- Калугин, Ю. К. Комплексная система ресурсосбережения в производстве лущеного шпона : монография / Ю. К. Калугин. – Барановичи : РИО БарГУ, 2011. – 223, [3] с.
- Калугин, Ю. К. Сравнительный анализ способов базирования фанерных чураков / Ю. К. Калугин, А. В. Петров // Деревообрабатывающая промышленность. – 2004. – № 5. – С. 16–17.

References

- Alifanov, A. V. Vliyaniye tochnosti bazirovaniya fanerных sortimentov i zhestkosti mekhanicheskoy sistemy lushchil'nogo oborudovaniya na kachestvo shpona / A. V. Alifanov, Yu. K. Kalugin, N. V. Burnosov // Trudy BGTU. – 2011. – № 2 (140). – S. 231–234.
- Rohin, V. L. Proektirovaniye shpindel'nyh uzlov na oporah kacheniya. metodicheskiye ukazaniya / V. L. Rohin. – Kurgan, 1998. Ch. 1. Tipovye konstrukcii shpindel'nyh uzlov : – 28 s.
- Kalugin, Yu. K. Kompleksnaya sistema resursosberezheniya v proizvodstve lushchenogo shpona : monografiya / Yu. K. Kalugin. – Baranovichy : RIO BarGU, 2011. – 223, [3] s.
- Kalugin, Yu. K. Sravnitel'nyy analiz sposobov bazirovaniya fanerных churakov / Yu. K. Kalugin, A. V. Petrov // Derevoobrabatvayushchaya promyshlennost'. – 2004. – № 5. – S. 16–17.

Материал поступил в редакцию 06.05.2022

EFFECT OF CLIMATIC FACTORS ON SERVICE LIFE OF INSULATING MATERIALS OF TRACTION ELECTRIC MACHINES

H. F. Kudina¹, A. S. Zalata², V. V. Karpenko³, I. V. Prihodzko⁴, P. A. Kuritsyn⁵

¹ Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Water Supply, Chemistry and Ecology, Belarusian State University of Transport (BelSUT); Leading Researcher, State Scientific Institution

"Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems them. V. A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus (GNU IMMS named after V. A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus), Gomel, Belarus, e-mail: kudina_mpri@tut.by

² Chief Designer of JSC "Ukrainian Energy Machines", Kharkiv, Ukraine, e-mail: icteo@spetm.com.ua

³ Ph.D in Engineering, Member of the Crimean Academy of Sciences, Deputy Chief Designer, Head of the Test Center for Traction Electrical Equipment, Ukrainian Power Machines JSC Kharkiv, Ukraine, e-mail: icteo@spetm.com.ua

⁴ Ph.D in Engineering, Associate Professor, Head of the Laboratory "Electrical and Electronic Systems" IC ZhT BelSUT, EE "Belarusian State University of Transport" (BelSUT), Gomel, Belarus, e-mail: iv_prihodko@mail.ru

⁵ Master of Technical Sciences, Junior Researcher of the Laboratory "Electrical and Electronic Systems" IC ZhT BelSUT, EE "Belarusian State University of Transport" (BelSUT), Gomel, Belarus, e-mail: pavelkuritsyn97@gmail.com

Abstract

The aspects of operation of electrical equipment under the influence of limit values of a number of climatic parameters, as well as the performance of equipment with a change in altitude, are considered. The results of experimental comparative studies of the electrical insulation resistance of TEM samples based on the insulation temperature resistance class of 220 with serial samples based on class *F* or *H* are presented. Based on the results of comparative tests confirmed the expediency and prospects of application of insulation class 220. The analysis of the results of the impact of climatic factors on the physical and mechanical properties and service life of insulation materials, as well as the safety and quality of electrical equipment.

Keywords: electrical equipment, electrical machines, climatic factors, class of insulation heating resistance, insulation resistance, safety and reliability of equipment.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Е. Ф. Кудина, А. С. Залата, В. В. Карпенко, И. В. Приходько, П. А. Курицын

Реферат

Рассмотрены аспекты функционирования электрооборудования под воздействием предельных значений ряда климатических параметров, а также характеристики оборудования с изменением высоты над уровнем моря. Представлены результаты экспериментальных сравнительных исследований сопротивления изоляции образцов тяговых электрических машин и агрегатов класса нагревостойкости 220 с серийными образцами с изоляцией классов *F* или *H*. По результатам сравнительных испытаний подтверждена целесообразность и перспективы применения изоляции класса 220. Приведен анализ результатов воздействия климатических факторов на физико-механические свойства и срок службы изоляционных материалов, а также безопасность и качество электрооборудования.

Ключевые слова: электрооборудование, электрические машины, климатические факторы, класс нагревостойкости изоляции, сопротивление изоляции, безопасность и надежность оборудования.

Introduction

Temperature changes significantly affect the properties of materials. As the temperature increases, the resistance of some metals increases, as well as the modulus of elasticity and ultimate strength decreases. A decrease in temperature leads to a change in the inductance of high-frequency coils and throttles, as well as a decrease in ductility and the appearance of brittleness of metals. And most importantly, temperature significantly affects the electrical characteristics of dielectric materials. The increase in temperature leads to a sharp drop in insulation resistance, an increase in dielectric losses, a decrease in dielectric constant, and individual dielectric materials lose strength characteristics.

The electrical strength of most dielectrics (polyethylene, epoxy resin, etc.) when exposed to heat first increases, and the mechanical strength decreases due to removal of moisture. Then, a significant decrease in electrical strength is observed, and the end result is mechanical breakdown of the dielectric. Insulation materials are subjected to intense aging under the action of cyclic exposure to heat and cold, accompanied by changes in electrical characteristics and physicochemical properties. Organic insulation materials are most susceptible to aging. Prolonged exposure to high temperature reduces the mechanical strength of organic materials, thereby making them more brittle and may eventually be destroyed by slight impact or vibration [1]. Thermal aging of elements is considered one of the factors increasing the percentage of equipment failures, as their service life is significantly reduced [2].

Checking the electrical strength and insulation resistance of materials is one of the stages of analysis that determine the possibility of further operation not only of dielectric materials, but also of equipment as a whole. This is especially important when it comes to high voltage. On railway rolling stock, a number of equipment (high-voltage inter-car connections, main switches, overvoltage limiters, etc.) are operated under a voltage of up to 30 kV, and a decrease in insulation resistance due to an increase in temperature, and, as a result, electrical strength, can cause breakdown of insulation or overlap on the surface, which can lead to irreparable consequences.

The negative influence of climatic factors may increase if high air humidity is added to the effects of temperature. In real-world settings, these factors are often concomitant. The influence of climatic parameters must be taken into account when designing not only control elements and control objects, but also traction equipment and, in particular, electrical machines. In addition, the analysis of the impact of these factors is an important task.

Influence of climatic parameters on operation of electric machines. Some equipment (electric motors, generators, etc.) during operation is able to release heat into the environment and thereby change climatic parameters. This applies primarily to equipment operating in a confined space. Heating of the electric machine as a whole and its individual parts, for example, winding and steel of the stator, rotor, bearings, is due to heat generation in these and other parts [3]. Determining the heating

temperature of individual parts of the electric machine by calculation is a rather complex process. The heating temperature of electrical machines may depend on various factors. The value of the steady state temperature of the engine depends on the load on its shaft. The application of a significant load leads to the release of a large amount of heat per unit time. The allowable heating of electrical machines depends on the insulation class of windings, manifold, contact rings, etc.

One of the main properties of insulation of windings of electrical machines is heating resistance of insulation material. In accordance with GOST 8865, this is the ability of electrical insulation materials, impregnating compositions and insulation of wires without damage and without significant deterioration of practically important properties to withstand the effects of increased temperature for a long time [4]. Increasing the temperature of the windings of electrical machines above permissible values leads to a reduction in the service life of the insulation. Thus, insulation heating resistance is one of the main parameters that determines the reliability of operation and the life of electrical machines. The most common insulation classes are E, B, F and H. Due to low operating temperatures, class E finds limited use in low-power machines. Insulation of classes B and F was most widespread, and in specialized electric machines operating in heavy load conditions, class H insulation is used (Figure 1) [4]. At the same time, a large reserve for improving technical characteristics, including the resource characteristics of traction electric machines (TEM), is the transition to an insulation class of 200 and 220. Such design of isolation finds more and more broad application in TEM of foreign manufacturers, including "Alstom transport" (France), General Electric (USA), Traktionssysteme Austria GmbH (Austria), etc.

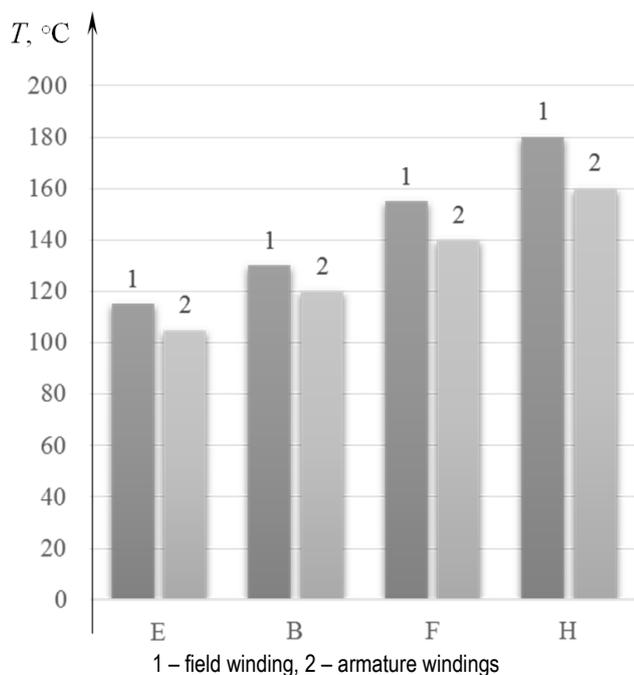


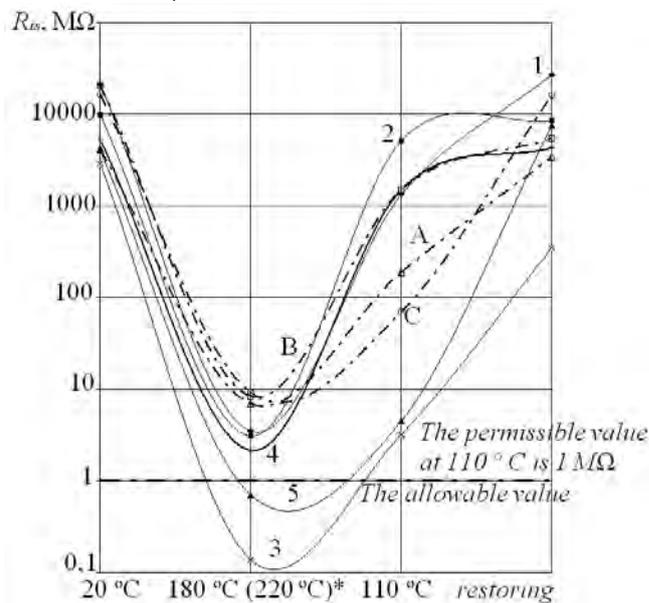
Figure 1 – Limit permissible exceeding winding temperature of electrical machines (at temperature environment from 10 °C to 40 °C)

As a result of research conducted at the test center of traction electrical equipment SE "Plant "Electrotyazhmash" it was found, that samples of TEM with a class of 220 have a significantly higher insulation heating resistance compared to samples of TEM with a class of H, as well as not inferior in resistance to low temperatures and show the ability to operate under conditions of high humidity for a longer period than most samples with a class of heating resistance H [5]. The quality assessment of insulation properties and their comparative analysis were carried out on the change of electrical resistance of insulation at various types of climatic effects.

Effect of elevated ambient temperature [6]. The samples were subjected to medium temperature (180 ± 3) °C for class H and (220 ± 3) °C for the 220 class in the test chamber, maintained until heated throughout the volume, then cooled to a temperature corresponding to normal climatic conditions tests (hereinafter referred to as n.c.c.t.).

Figure 2 presents the results of the studies in the form of temperature dependences $R_{is} = f(T)$.

All the presented samples showed high values of insulation resistance (the permissible value at a temperature of 110 °C is not less than 1 MΩ). Samples with an insulation class of 220 (Figure 2, and at a temperature of 220 °C had significantly higher insulation resistance values than samples with class H at a temperature of 180 °C (from 2 to 40 times), and also not inferior to class H according to the insulation resistance at a temperature of 110 °C.



* 180 °C heating temperature for insulation class H, 220 °C - heating temperature for insulation class 220

1-5 – insulation class H; A, B, C – insulation class 220

Figure 2 – Dependence of TEM insulation resistance values on the environment temperature effect (high temperature effect)

The effect of low ambient temperature [7]. The samples were exposed to a medium temperature of (minus 50 ± 3) °C in the test chamber, held until cooled throughout the volume, then heated to a temperature of (40 ± 3) °C. Figure 3 presents the results of the study of the samples in the form of temperature dependences $R_{is} = f(T)$. It can be seen from the figure that all the samples presented had high values of the insulation resistance over the entire range of ambient temperatures and restored them after the test to high values (the allowable value after the recovery in the n.c.c.t. is not less than 20 MΩ).

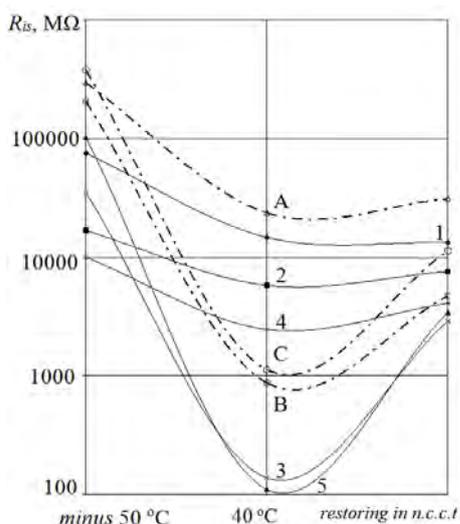
Samples with an insulation class of 220 showed insulation resistance values during the action of a reduced temperature minus 50 °C higher than samples with class H, and also did not yield to class H according to the insulation resistance with an increase in the temperature of the medium to 40 °C and recovery in n.c.c.t. [5].

The effect of high humidity of air [7]. The samples were subjected to six consecutive cycles (cycle time 24 hours), each of the first five cycles consisted of two steps: 16 hours at a temperature of 40 ± 2 °C and a relative humidity of 95 ± 3% and 8 hours at a temperature of 35 ± 2 °C and a relative humidity of 95-100%. In the last sixth cycle: 16 hours at a temperature of (40 ± 2) °C and relative humidity (95 ± 3)% and 8 hours at a temperature of (25 ± 2) °C and relative humidity (95-100)%.

Figure 4 shows the results of measurements of the insulation resistance of the samples in the form of time dependences $R_{is} = f(t)$.

where t is the duration of the test in hours, and R_{is} is the average values of insulation resistance of the samples in the n -th cycle, corresponding to each stage. $R_{is} = \sum R_{isi} / i$, where i is the number of measured insulation resistance values in each cycle (in stages of 16 hours $i = 4$, in stages of 8 hours $i = 2$).

All the samples presented during the exposure to high humidity showed high values of insulation resistance.

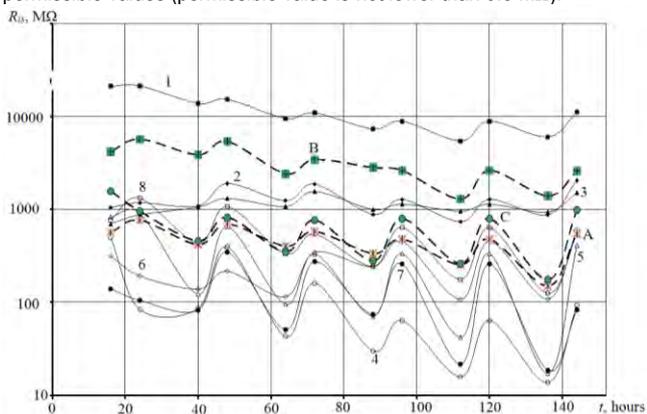


The allowable value after the recovery in n.c.c.t and 40 MΩ

1-5 – insulation class H;
A, B, C – insulation class 220

Figure 3 – Dependence of TEM insulation resistance values on the environment temperature effect (low temperature effect)

It can be seen from Fig. 4 that samples with an insulation class of 220 were not inferior to most samples with class H in the process of testing for insulation resistance values, and these values were not lower than permissible values (permissible value is not lower than 0.5 MΩ).



1-8 – insulation class H; A, B, C – insulation class 220

Figure 4 – Dependences of the insulation resistance to the housing against the time of exposure to high humidity

When exposed to high humidity, the dependence of insulation resistance on the time of exposure has the following dependence

$$R_{из} = R_0 \cdot e^{\gamma t}$$

where t – time, hour;

R_0 – characterizes initial insulation resistance before tests, MOhm;

γ – coefficient, which depends on physical properties of insulation, characterizes the rate of insulation resistance reduction when exposed to wet air.

In real-world operation, the TEM may be exposed to soil humidity much longer than the time the images were tested. Based on the obtained dependencies, it is possible to predict the value of R from after any period of operation and calculate for what time R from will reach the permissible value. To do this, you must express the time value from the above formula:

$$t = \frac{1}{\gamma} \cdot \ln \frac{R_{из}}{R_0}$$

By approximating the experimental data given in Figure 4, mathematical models of the dependence of insulation resistance on the exposure time of high humidity can be obtained.

As can be seen from Figure 5, in two out of eight TEM samples with insulation class H, insulation resistance for the presented period according to the forecast will decrease to values below the permissible 0.5 MOhm.

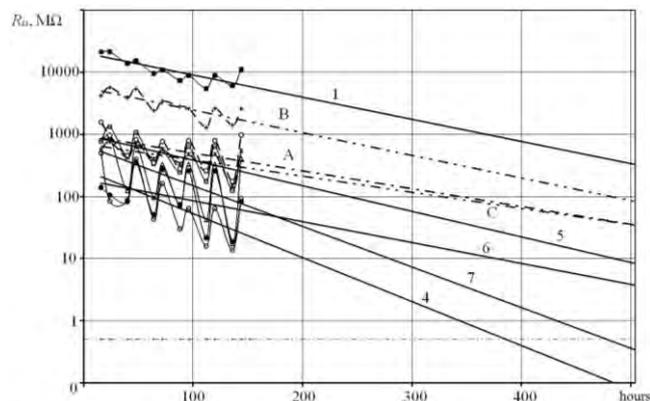


Figure 5 – Predicted dependence of insulation resistance relative to the housing on the time of exposure to high humidity

The time t at which the insulation of a TEM operated under increased moisture conditions retains the insulation resistance above the permissible value can either be considered analytically by the formula, or determined using the graphs shown in Figure 5, which is actually a continuation of Figure 4, where the time axis is extended by another 350 hours to more clearly show the change in the value of the insulation co-resistance of the samples. From the above results, it can be seen that under the same conditions of humidity testing, the insulation of class 220 compared to H has much better performance and therefore is more effective as an insulating coating of the current-carrying parts of electrical machines.

Insulating materials with prolonged exposure to elevated temperatures are subject to thermal aging, as a result of which physical and chemical changes occur in them. Prolonged exposure to elevated air temperature and oxygen can lead to thermal shrinkage of the insulation and, as a result, the formation of cracks. As a result of thermal oxidative degradation in the insulating material, polymer molecules cross-link, thereby increasing crispness and brittleness. And given that electric machines are sources of vibration during operation, this can intensify the process of their failure. Increasing the insulation temperature above the permissible level by 10 °C reduces its service life by half. This phenomenon is based on the general law of the dependence of the rate of chemical reactions on temperature, described by the Vant-Goff and Arrhenius equation [8]. In addition to temperature, changes in air pressure, the presence of ozone, which is a stronger oxidizing agent than oxygen, and other chemicals capable of intensifying this process, have a significant effect on the aging rate of the material.

The set of climatic factors acting on electrical equipment elements and their characteristics are determined by the climatic zone in which they are operated. Of considerable interest is the operation of electric machines in conditions other than normal. The permissible power of electrical machines, according to GOST 183, is determined by the permissible temperature of the stator winding at an ambient temperature of + 40 °C and operation at an altitude of not more than 1000 m above sea level. The actual ambient temperature and height above sea level significantly affect the output power of electrical machines, and if this is not taken into account, they can work for a long time at an ambient temperature exceeding the maximum working temperature. To avoid unacceptable excess of winding temperature, output power must be reduced (Figure 6) [9].

With an increase in the operating height of electric machines (more than 1000 m above sea level), it is also necessary to reduce the load on the shaft (Figure 7) [10]. This is due to a change in a number of operating

parameters. In addition to changing the ambient temperature, the atmospheric pressure decreases and, as a result, the air density decreases. Thus, the properties of the cooling medium (refrigerant) change, and electric machines, operating in the same conditions as at altitudes up to 1000 m, will undergo significant overheating, which will result in a reduction in its life.

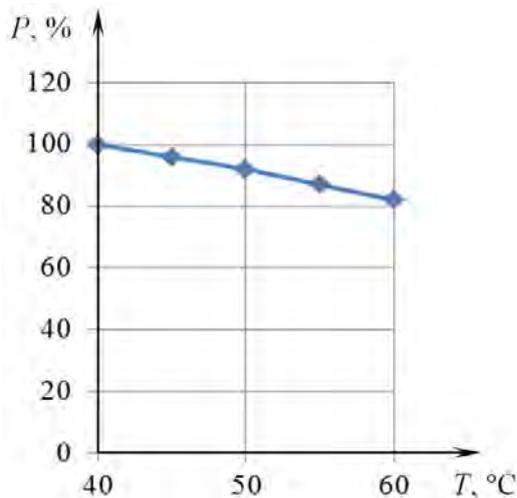


Figure 6 – Dependence of output power P of electric machines on temperature T

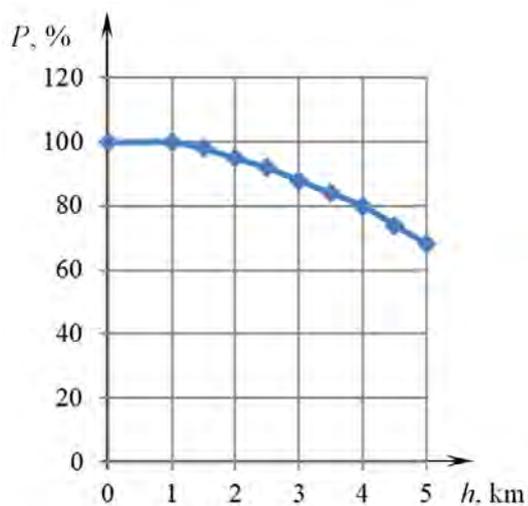


Figure 7 – Dependence of output power P of electric machines on height h

As the height increases due to the decrease in air density, the actual excess temperature of equipment that generates heat during operation and is completely or partially cooled by free or forced air convection increases. When using such articles at altitudes of more than 1000 m, the allowable temperature excess must be reduced by a value corresponding to the height correction. The standards or specifications for such products shall specify corrections for the amount of reduction of the nominal load of the product (if it is possible) or for the amount of reduction of the maximum permissible temperature exceedances exceeding normal. According to GOST 15150 for products designed for operation at a height of 1000 m to 4300 m, the upper temperature values can be calculated by reducing the maximum value by 0.6 °C for every 100 m for heights more than 1000 m.

Conclusion

Taking into account the influence of climatic factors at the stage of development and design of traction electrical equipment is an important condition that determines the duration and reliability of its operation. The results of climatic tests and mathematical modelling showed the feasibility of using the insulation of the heating resistance class 220 in the production of TEM. This is especially important for equipment that operates in difficult climatic conditions, and the choice of insulating materials largely depends on the life of the equipment.

References

1. Mitreikin, N. A. Reliability and testing of radio parts and radio components / N. A. Mitreikin, A. I. Ozersky. – M. : Radio and communications, 1981. – 272 p.
2. Bondarenko, I. B. Electrical radio elements: in 2 parts / I. B. Bondarenko. – SPb.: SPb. NIU ITMO, 2015. – Part 1: Resistors. – 2012. – 108 p.
3. Borisenko, A. I. Cooling of industrial electric machines / A. I. Borisenko, O. N. Kostikov, A. I. Yakovlev. – M. : Energoatomizdat, 1983. – 296 p.
4. Electric rotating traction machines. General specifications: GOST 2582-2013. – Vved. 01.04.2020. – M. : Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification: Standardinform, 2014. – 52 p.
5. Karpenko, V. V. Studies of insulation systems of the 220 °C class of traction electric machines for resistance to external climatic factors / V. V. Karpenko, D. Yu. Vasilenko, S. I. Yatsko // Fundamental and applied problems of technology and technology. – 2015. – № 5 (313). – P. 152–159.
6. Electrotechnical products. Test methods for resistance to climatic external factors: GOST 16962.1-89. – Vved. 01.02.2020. – Minsk : Gosstandard, 2011. – 44 p.
7. Integrated quality control system. Products of electronic engineering, quantum electronics and electrotechnical. Test methods: GOST 20.57.406-81. – Vved. 01.01.81 – M. : Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification : Standardinform, 2005. – 132 p.
8. Fundamentals of physical chemistry. Theory and problems: text manual for universities / V. V. Eremin [et al.]. – M. : Publishing house "Exam," 2005. – 480 p.
9. Technical catalog of electric motors of the Vladimir Electric Motor Plant VEMZ (RUSELPROM). – Vladimir : Vladimir Electric Motor Plant OJSC, 2007. – 108 p.
10. Yuldashev, A. A. The influence of altitude and ambient temperature on the output power of the asynchronous motor / A. A. Yuldashev, Z. Sh. Yuldashev // Bulletin of the Student Scientific Society. – 2014. – № 3. – P. 105–106.

Spisok citirovannykh istochnikov

1. Mitrejkin, N. A. Nadezhnost' i ispytaniya radiodetalej i radiokomponentov / N. A. Mitrejkin, A. I. Ozerskij. – M. : Radio i svyaz', 1981. – 272 s.
2. Bondarenko, I. B. Elektroradioelementy: v 2 chastyah / I. B. Bondarenko. – SPb. : SPb. NIU ITMO, 2015. – CHast' 1: Rezistory. – 2012. – 108 s.
3. Borisenko, A. I. Ohlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin / A. I. Borisenko, O. N. Kostikov, A. I. YAKovlev. – M. : Energoatomizdat, 1983. – 296 s.
4. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya: GOST 2582-2013. – Vved. 01.04.2020. – M. : Mezhgosudarstvennyj sovet po standartizacii, met-rologii i sertifikacii: Standartinform, 2014. – 52 s.
5. Karpenko, V. V. Issledovaniya sistem izolyacii klassa nagrevostojkosti 220 °S tyagovykh elektricheskikh mashin na ustojchivost' k vozdeystviyu vneshnih klimaticheskikh faktorov / V. V. Karpenko, D. Yu. Vasilenko, S. I. Yacko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 5 (313). – S. 152-159.
6. Izdeliya elektrotekhnicheskie. Metody ispytaniy na ustojchivost' k klimaticheskim vneshnim vozdeystvuyushchim faktoram: GOST 16962.1-89. – Vveden 01.02.2020. – Minsk: Gosstandart, 2011. – 44 r.
7. Kompleksnaya sistema kontrolya kachestva. Izdeliya elektronnoj tekhniki, kvantovoj elektroniki i elektrotekhnicheskie. Metody ispytaniy: GOST 20.57.406-81. Vveden 01.01.81 – M. : Standartinform, 2005. – 132 p.
8. Osnovy fizicheskoy himii. Teoriya i zadachi: ucheb. posobie dlya vuzov / V. V. Eremin [i dr.]. – M. : Izdatel'stvo «Ekzamen», 2005. – 480 s.
9. Tekhnicheskij katalog elektrodvigatelej Vladimirskogo elektromotornogo zavoda VEMZ (RUSELPROM). – Vladimir : OAO «Vladimirskij elektromotornyj zavod», 2007. – 108 s.
10. Yuldashev, A. A. Vliyaniye vysoty nad urovnem morya i temperatury okruzhayushchej sredy na otdavaemuyu moshchnost' asinhronnogo dvigatelya / A. A. Yuldashev, Z. Sh. Yuldashev // Vestnik studencheskogo nauchnogo obshchestva. – 2014. – № 3. – S. 105–106.

Материал поступил в редакцию 20.04.2022

ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ ЧИСЛА ТОНКИХ РАВНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

О. А. Медведев

*К. т. н., доцент, доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей
Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: olanmed56@gmail.com*

Реферат

В статье рассматривается методика расчета размеров тонких компенсаторов одинаковой длины (прокладок), используемых для достижения точности замыкающих звеньев линейных сборочных размерных цепей машин методом регулирования. Методика позволяет обоснованно определять число и параметры точности компенсаторов в комплекте на одно изделие и снизить долю бракованных изделий за счет учета возможных погрешностей сборочной оснастки и сборочных работ. Методика может быть полезна инженерам, разрабатывающим техпроцессы сборки машин.

Ключевые слова: компенсатор тонкий, точность, метод регулирования, методика, изделие, сборка.

THEORETICAL AND PROBABILISTIC CALCULATION OF THE NUMBER OF THIN EQUAL COMPENSATORS WHEN ACHIEVING ASSEMBLY ACCURACY BY THE REGULATION METHOD

O. A. Medvedev

Abstract

The article discusses a method for calculating the dimensions of thin expansion joints of the same length (spacers) used to achieve the accuracy of the closing links of linear assembly dimensional chains of machines by the control method. The technique makes it possible to reasonably determine the number and accuracy parameters of compensators in a set for one product and reduce the proportion of defective products by taking into account possible errors in assembly equipment and assembly work. The technique can be useful for engineers developing technical processes for assembling machines.

Keywords: compensator thin, precision, control method, technique, product, assembly.

Введение

Наборы из разного числа тонких прокладок (компенсаторов) равной толщины широко применяются в машиностроении для достижения точности сборки методом регулирования. Такой набор специально вводится в линейную сборочную конструкторскую размерную цепь машины. Изменением числа компенсаторов в наборе ступенчато компенсируется суммарное отклонение размеров деталей, входящих как составляющие звенья в сборочную конструкторскую размерную цепь. При изготовлении деталей указанные размеры можно выдерживать в пределах экономически приемлемых допусков, сумма которых превышает допуск замыкающего звена размерной цепи, заданный в технических условиях на сборку. При этом за счет допуска замыкающего звена можно компенсировать только часть суммарного поля рассеяния составляющих звеньев (величины компенсации), которая является ступенью компенсации. Без учета погрешностей изготовления компенсаторов и погрешностей определения, требуемого в конкретном экземпляре машины, размера набора компенсаторов, ступень компенсации равна допуску замыкающего звена. При использовании набора из одного компенсатора, толщиной равной ступени компенсации, аналогично можно компенсировать еще такую же часть величины компенсации, примыкающую к первой, и так далее.

Размер набора компенсаторов, требуемый для конкретного экземпляра машины, обычно определяется измерением полости под этот набор, сформированной при предварительной сборке экземпляра машины без компенсаторов. При этом на место замыкающего звена устанавливается его материальный эталон, размер которого равен желаемому значению замыкающего звена (обычно среднему в пределах допуска). Число компенсаторов в требуемом наборе, для отдельного экземпляра машины, равно частному от деления размера измеренной полости на размер одного компенсатора. После частичной разборки экземпляра изделия эталон удаляется и выполняется окончательная сборка этого объекта с принятым набором компенсаторов.

Индивидуальным выбором компенсатора устраняется прямая зависимость замыкающего звена от остальных составляющих звеньев,

а отклонение замыкающего звена от его среднего значения будет равно отклонению размера набора тонких компенсаторов от размера полости, которая измерялась при предварительной сборке.

Постановка задач исследования

Основной задачей, которая решается при расчетах размерных цепей в случае достижения точности их замыкающих звеньев методом регулирования, является расчет величины компенсации (части суммы допусков составляющих звеньев, подлежащей компенсации путем изменения размера компенсатора), ступени компенсации, минимально достаточного числа компенсаторов в наборе на одно изделие, номинальных размеров и допуска компенсаторов. Многолетний опыт использования в учебном процессе по дисциплине «Технология машиностроения» традиционных методик расчета этих параметров [1, 2, 3, и др.] показал их недостаточную обоснованность и рациональность, что позволяет их использовать только для предварительных расчетов.

Проанализируем основные положения указанных методик. Величину компенсации предлагается определять по формуле

$$V_K = \sum_{j=1}^n TA_j - TA_{\Delta}, \quad (1)$$

где TA_j – расширенный, экономически приемлемый допуск j -го составляющего звена;

TA_{Δ} – требуемый допуск замыкающего звена;

n – число составляющих звеньев в цепи.

При этом в первое слагаемое предписывается включать и расширенный экономически приемлемый допуск компенсатора, определенный аналогично допускам других составляющих звеньев.

Такое определение величины компенсации не оправдано по следующим причинам:

– величина компенсации и размер полости под компенсатор формируются в результате предварительной сборки изделия, когда

компенсатор не используется, а на место замыкающего звена устанавливается эталон. Поэтому допуск компенсатора не должен учитываться при определении величины компенсации;

- неоправданное увеличение величины компенсации путем включения в нее расширенного допуска компенсатора приводит к необоснованному увеличению числа компенсаторов в комплекте на одно изделие.

Кроме того, предлагаемая методика расчетов не учитывает влияние на точность замыкающего звена конструкторской размерной цепи таких погрешностей, возникающих при определении размера требуемого компенсатора, как погрешности сборочной оснастки и сборочных работ (погрешности эталона, установки эталона, измерения полости под компенсатор, выбора компенсатора).

Более адекватной представляется методика расчета величины компенсации для достижения точности сборки методом регулирования, описанная в [3]. Однако и в ней имеются неточности:

- не выявляются рациональные схемы компенсации допусков составляющих звеньев с целью минимизации числа компенсаторов в наборе;
- в величину компенсации, кроме допусков составляющих звеньев конструкторской размерной цепи, включаются погрешности сборочной технологической оснастки, которые не формируют поле рассеивания полости под компенсатор при окончательной сборке. Кроме того, эти погрешности не могут быть компенсированы выбором компенсатора, так как влияют на этот выбор и могут иметь разные случайные значения при сборке одного экземпляра изделия. Погрешности сборочных работ и оснастки влияют на формирование размера выбранного компенсатора, следовательно, формируют фактическое поле рассеивания замыкающего звена конструкторской размерной цепи и могут быть компенсированы только за счет его допуска TA_{Δ} . Необоснованное включение этих погрешностей в величину компенсации ведет к неоправданному увеличению числа компенсаторов в наборе и не позволяет составить объективное условие достижения точности сборки;
- допуск компенсатора назначается без учета погрешностей формирования размера выбираемого набора компенсаторов, и, следовательно, не гарантируется точность сборки при рассчитанном размере и принятом допуске компенсатора;
- при использовании тонких компенсаторов не учитывается тот факт, что допуск набора из нескольких компенсаторов больше допуска одного компенсатора;
- при определении величины компенсации, размеров компенсаторов и их погрешностей не учитывается случайный характер этих величин;
- не рассматриваются вопросы рационального определения минимально достаточное количество компенсаторов каждой ступени для собираемой партии изделий.

С учетом сказанного можно сделать вывод о недостаточной объективности и рациональности рассмотренных методик расчета компенсаторов и необходимости усовершенствования методики расчета сборочных размерных цепей при достижении точности сборки методом регулирования. Это позволит обоснованно установить требования к точности сборочных работ и сборочной оснастки, а также рационально определить число требуемых компенсаторов в комплекте на одно изделие и на партию собираемых изделий.

Разработка рациональных схем компенсации суммарного поля рассеивания составляющих звеньев

Системный анализ влияния компенсаторов на замыкающие звенья линейных сборочных конструкторских размерных цепей для машин разного назначения позволил разработать несколько типовых схем компенсации расширенных допусков составляющих звеньев, наглядно отражающих это влияние для всех возможных случаев. На основе этих схем можно установить связи между предельными размерами набора компенсаторов, замыкающего звена, составляющих звеньев, погрешностей формирования размера набора компенсаторов, погрешности изготовления компенсаторов.

Каждая из таких схем построена на основе трехзвенной линейной размерной цепи, математически тождественной реальной сборочной размерной цепи, и включает суммарное составляющее звено A_{Σ} ,

компенсатор K и замыкающее звено A_{Δ} . Среднее значение суммарного составляющего звена является алгебраической суммой средних значений всех увеличивающих и уменьшающих составляющих звеньев реальной цепи (кроме компенсатора). Его поле рассеивания TA_{Σ} равно сумме полей рассеивания составляющих звеньев (кроме компенсатора), определенной по правилу сложения случайных величин.

При этом все многообразие реальных конструкторских размерных цепей может быть сведено к трем вариантам математически тождественных трехзвенных цепей, отличающихся по влиянию компенсатора и суммарного составляющего звена на замыкающее звено: 1) увеличивающее суммарное составляющее звено и уменьшающий компенсатор; 2) увеличивающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор; 3) уменьшающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор. Третий вариант следует исключить из рассмотрения, так как он предполагает использование в качестве компенсатора достаточно крупной охватывающей детали, а не тонкой прокладки.

В схеме компенсации поля рассеивания составляющих звеньев трехзвенную конструкторскую цепь, тождественную реальной цепи, представим предельными размерами и полями рассеивания замыкающего и суммарного составляющего звеньев (рисунки 1, 2). Поле рассеивания суммарного составляющего звена TA_{Σ} разделим на несколько одинаковых частей, равных ступени компенсации C . Таким образом число ступеней компенсации определяется по формуле

$$N = \frac{TA_{\Sigma}}{C} \quad (2)$$

Средние размеры наборов компенсаторов должны связывать середину допуска замыкающего звена с серединами соответствующих ступеней компенсации в пределах поля рассеивания суммарного составляющего звена. Для того чтобы набор тонких компенсаторов при любом их числе оставался уменьшающим (или увеличивающим) и для того чтобы максимальное число требуемых тонких компенсаторов в наборе на одно изделие было на единицу меньше числа ступеней компенсации, надо середину TA_{Δ} совместить с серединой первой ступени компенсации. Такое частичное перекрытие TA_{Δ} и TA_{Σ} всегда можно сделать путем корректировки номинала любого из составляющих звеньев конструкторской цепи. Это позволяет без компенсатора, за счет допуска замыкающего звена, компенсировать часть суммарного поля рассеивания составляющих звеньев, примыкающую к его границе и равную ступени компенсации. Для этого увязка предельных размеров суммарного составляющего звена с полем допуска замыкающего звена конструкторской цепи производится по следующим уравнениям:

для уменьшающего компенсатора

$$A_{\Sigma min} = A_{\Delta cp} - c/2; \quad (3)$$

для увеличивающего компенсатора

$$A_{\Sigma max} = A_{\Delta cp} + c/2. \quad (4)$$

Погрешности сборочных работ и оснастки представим в схеме компенсации в виде элементов технологической сборочной размерной цепи. Как отмечалось ранее, при окончательной сборке изделия с выбранным набором компенсаторов отклонение замыкающего звена конструкторской цепи от эталона будет равно отклонению размера выбранного набора компенсаторов от размера полости под компенсатор, сформированной и измеренной при предварительной сборке. Для определения поля рассеивания этого отклонения следует выявить и решить технологическую сборочную размерную цепь, которая формируется на этапе предварительной сборки изделия. Замыкающим звеном в ней является размер полости под набор компенсаторов, а составляющими звеньями, кроме размеров деталей изделия, также являются размеры используемой сборочной оснастки (эталона замыкающего звена конструкторской цепи) и погрешности выполнения сборочных работ.

Отклонение размера выбранного набора компенсаторов от размера полости под компенсатор складывается из отклонений звеньев

технологической цели, отсутствующих в конструкторской цепи и звеньев, которые при предварительной сборке конкретного экземпляра изделия могут приобретать случайные значения, отличающиеся от их значений в конструкторской цепи (погрешность изготовления материального эталона среднего значения замыкающего звена ϵ_{Σ} , погрешность установки эталона $\epsilon_{УЭ}$, погрешность измерения полости под компенсатор ϵ_U , погрешность изготовления набора из n компенсаторов nTK), погрешность выбора набора компенсатора (ϵ_B). Погрешности таких звеньев могут быть компенсированы только за счет допуска замыкающего звена конструкторской цепи, а не выбором набора компенсаторов.

Технологическую цепь представим в схеме компенсации указанными погрешностями, которые в сумме не должны превышать допуска замыкающего звена конструкторской цепи TA_{Δ} . Расположим их в пределах допуска замыкающего звена TA_{Δ} симметрично относительно его середины, потому что, при размере эталона равном $A_{\Delta c}$, середина поля рассеивания размера полости под компенсатор будет соответствовать середине поля рассеивания замыкающего звена. На схемах компенсации (рисунки 1 и 2) сумма ϵ_{Σ} , $\epsilon_{УЭ}$, ϵ_U обозначена как погрешность определения размера набора компенсатора ϵ_{PK} .

Максимальное возможное значение погрешности выбора набора тонких компенсаторов равно ступени компенсации, то есть толщине одного тонкого компенсатора. С такой погрешностью измеренное значение полости под компенсатор воспроизводится на выбранном наборе компенсаторов при самом неблагоприятном сочетании размера измеренной полости и границы ближайших ступеней компенсации, при условии строго соблюдения сборщиком технологической дисциплины.

Так как ступень компенсации равна средней толщине одного тонкого компенсатора, то эта толщина, наряду с погрешностями сборочных работ, сборочной оснастки и допуском изготовления компенсаторов, определяет точность сборки. Изготавливать и использовать компенсаторы с толщиной менее 0,05 мм затруднительно из-за их малой жесткости. Поэтому использование компенсаторов равной толщины для выдерживания $TA_{\Delta} \leq 0,05$ мм обычно невозможно.

Схемы компенсации, учитывающие эти особенности, приведены на рисунках 1 и 2 (для уменьшающего и увеличивающего компенсатора соответственно).

Взаимосвязь точности замыкающего звена, компенсаторов и сборочной оснастки

Проведенный анализ формирования точности замыкающего звена методом регулирования и предложенные схемы компенсации поля рассеивания составляющих звеньев конструкторской цепи позволяют использовать теоретико-вероятностный метод определения параметров точности компенсаторов и сборочной оснастки.

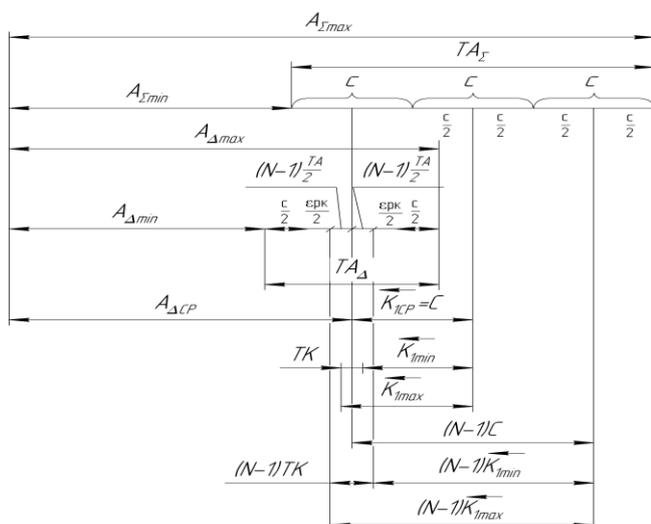


Рисунок 1 – Схема компенсации полей рассеивания составляющих звеньев регулированием комплектом одинаковых тонких уменьшающих компенсаторов

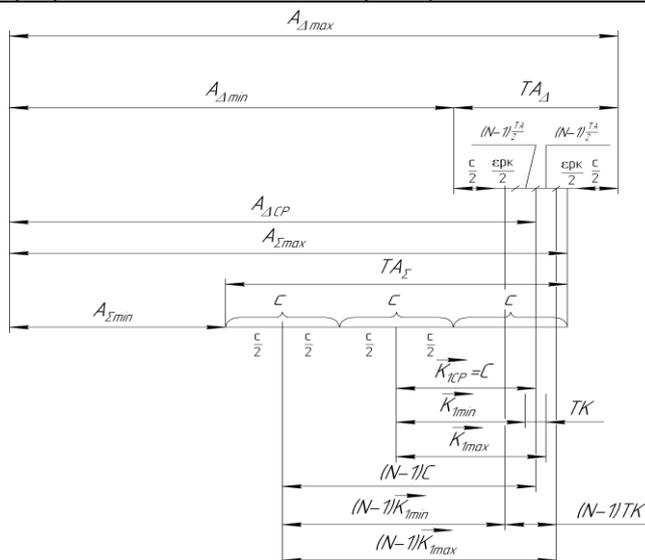


Рисунок 2 – Схема компенсации полей рассеивания составляющих звеньев регулированием комплектом одинаковых тонких увеличивающих компенсаторов

Его использование позволит получить преимущества, аналогичные тем, которые получают при достижении точности сборки методом неполной взаимозаменяемости [1, 2], то есть допуская небольшую экономически приемлемую долю бракованных изделий существенно снизить число компенсаторов в комплекте на одно изделие или снизить требования к точности сборочной оснастки.

Для составления условия достижения точности замыкающего звена на основе теоретико-вероятностного подхода будем считать звенья технологической размерной цепи случайными величинами, сумма которых определяет поле рассеивания суммарной погрешности формирования размера набора компенсаторов, а, следовательно, и замыкающего звена конструкторской размерной цепи. С учетом правила сложения полей рассеивания случайных величин [1]

$$\omega_{\Delta}^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{n+m} \lambda_j^2 \cdot \omega_j^2, \tag{5}$$

где ω_{Δ} – поле рассеивания суммарной случайной величины;
 t_{Δ} – коэффициент риска;
 λ_j – коэффициент относительного рассеивания j -й случайной величины;
 ω_j – поле рассеивания j -й случайной величины.

Коэффициент риска замыкающего звена t_{Δ} в формуле (5) учитывает допустимую долю бракованных изделий. Его можно определить по таблице значений функции Лапласа $\Phi(t_{\Delta})$. Для определения полного поля рассеивания (6б) суммарной погрешности формирования размера набора компенсаторов принимаем $t_{\Delta} = 3$. В это поле попадает 99,73 % реализаций этой суммарной погрешности. Заменив в формуле (5) ω_{Δ} на TA_{Δ} и ω_j на погрешности, определяющие точность размера набора компенсаторов, получим условие достижения точности замыкающего звена конструкторской размерной цепи A_{Δ} методом регулирования набором тонких равных компенсаторов для 99,73 % собираемых изделий

$$TA_{\Delta}^2 = (\lambda_{PK}^2 \cdot \epsilon_{PK}^2 + \lambda_c^2 \cdot c^2 + \lambda_k^2 \cdot (N-1) \cdot TK^2). \tag{6}$$

При составлении формулы (5), учтена наибольшая величина погрешности размера набора компенсаторов, возникающая при использовании набора с максимально возможным числом компенсаторов в одном изделии $N-1$.

Также точность A_{Δ} обеспечивается для тех случаев использования тонких компенсаторов, при которых левая часть выражения (6) больше правой. Однако для этого потребуются использовать более точные и дорогие средства технологического оснащения и компенсаторы, что снизит экономическую эффективность сборки.

Заменив в уравнении (6) N на TA_{Σ}/C , после преобразований получим кубическое уравнение для расчета максимально допустимо-го значения ступени компенсации C

$$\lambda_c^2 \cdot c^3 + \left[\lambda_{pk}^2 \cdot \varepsilon_{pk}^2 - \left(\frac{TA_{\Delta}}{t_{\Delta}} \right)^2 - \lambda_k^2 \cdot TK^2 \right] \cdot c + TA_{\Sigma} \cdot \lambda_k^2 \cdot TK^2 = 0. \quad (7)$$

После расчета корней кубического уравнения (7), один из них, имеющий физический смысл (положительное, натуральное число), проверить по условию (6) и скорректировать значения полей рассеяния составляющих звеньев конструкторской и технологической размерных цепей так, чтобы значение N получалось целым.

Определение числа компенсаторов, требуемых для партии собираемых изделий

Определяя общее число компенсаторов, предварительно изготавливаемых для партии собираемых изделий из P штук, при известном числе ступеней компенсации N , на производстве обычно исходят из того, что заранее неизвестно, сколько компенсаторов потребуется включить в набор для конкретного экземпляра изделия. Поэтому для каждого экземпляра изделия до начала сборки партии изделий изготавливается комплект из $N-1$ (максимально требуемое число) тонких компенсаторов. В таком случае общее число компенсаторов для всей партии составит

$$Q = (N - 1) \cdot P. \quad (8)$$

Однако из каждого комплекта, включающего $N-1$ компенсатор, в процессе сборки будет использована лишь некоторая их часть, соответствующая той ступени компенсации, к которой будет относиться собираемый экземпляр изделия. При этом остальные компенсаторы комплекта окажутся лишними, и нет гарантии, что все они потребуются в дальнейшем, так как аналогичное количество компенсаторов будет подготовлено и для следующей партии изделий.

Снизить расходы на изготовление компенсаторов можно, если учесть, что суммарное составляющее звено, как сумма большого числа составляющих случайных величин в пределах партии собираемых изделий, подчиняется нормальному закону распределения, независимо от законов распределения слагаемых. При этом значения A_{Σ} , близкие к середине поля его рассеяния, составляют подавляющее большинство. Доля изделий, которая будет относиться к определенной ступени компенсации, может быть определена на основе положений теории вероятностей при известных параметрах распределения A_{Σ} .

Среднеквадратическое отклонение суммарного составляющего звена можно определить по формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{TA_{\Sigma}}{6}. \quad (9)$$

Для определения доли экземпляров изделий, у которых A_{Σ} попадает в пределы каждой ступени компенсации, можно воспользоваться функцией Лапласа, которая показывает вероятность попадания нормально распределенной случайной величины в интервал, выраженный числом среднеквадратических отклонений и отсчитываемый от середины поля рассеяния случайной величины [2, 3]. Применительно к схемам компенсации, представленных на рисунках 1, 2, функцию Лапласа можно использовать для определения вероятности попадания значений A_{Σ} в интервал между серединой TA_{Σ} и границей определенной ступени компенсации. Аргументом функции Лапласа $\Phi(t)$ является коэффициент риска t , который в данном случае можно определить делением указанного интервала на среднеквадратическое отклонение σ_{Σ} .

С учетом изложенного для первой и последней (N -й) ступеней компенсации коэффициент риска следует определять по формуле:

$$t_1 = t_N = \frac{TA_{\Sigma}/2 - c}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{3\sigma_{\Sigma} - 6\sigma_{\Sigma}/N}{\sigma_{\Sigma}} = 3 - \frac{6}{N}. \quad (10)$$

Значение функции Лапласа $\Phi(t)$ для полученного аргумента t можно определить по специальной таблице [1, 2, 3]. Учитывая, что вероятность попадания значений A_{Σ} в половину поля его рассеяния равна 0,5, выражение для определения доли изделий с A_{Σ} в пределах первой и N -й ступени компенсации q_1 и q_N получим, вычитая из 0,5 значение $\Phi(t_1)$:

$$q_1 = q_N = 0,5 - \Phi(t_1) = 0,5 - \Phi\left(3 - \frac{6}{N}\right). \quad (11)$$

Для второй и $N-1$ -й ступеней компенсации коэффициент риска следует определять по формуле

$$t_2 = t_{N-1} = \frac{TA_{\Sigma}/2 - 2c}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{3\sigma_{\Sigma} - 12\sigma_{\Sigma}/N}{\sigma_{\Sigma}} = 3 - \frac{12}{N}. \quad (12)$$

Доли изделий с A_{Σ} в пределах второй и $N-1$ -й ступени компенсации q_2 , q_{N-1} получим, вычитая из $\Phi(t_1)$ значение $\Phi(t_2)$:

$$q_2 = q_{N-1} = \Phi(t_1) - \Phi(t_2) = \Phi\left(3 - \frac{6}{N}\right) - \Phi\left(3 - \frac{12}{N}\right). \quad (13)$$

В общем случае доли изделий с A_{Σ} в пределах i -й и $N-(i-1)$ -й ступени компенсации определяются по формуле

$$q_i = q_{N-i+1} = \Phi(t_{i-1}) - \Phi(t_i) = \Phi\left(3 - \frac{6(i-1)}{N}\right) - \Phi\left(3 - \frac{6 \cdot i}{N}\right). \quad (14)$$

При четном числе ступеней компенсации N в пределах поля рассеяния A_{Σ} расчеты долей изделий по формуле (14) следует выполнить для ступеней с номерами $i \leq N/2$, пока $\Phi(t_i) \geq 0$.

При нечетном числе ступеней N расчеты долей изделий по формуле (14) следует выполнить для ступеней с номерами $1 \leq i \leq N/2 - 0,5$. Доля изделий с значениями A_{Σ} в пределах средней ступени компенсации с номером $i = N/2 + 0,5$ следует определять по формуле

$$q_{N/2+0,5} = 2 \cdot \Phi\left(\frac{3}{N}\right). \quad (15)$$

Число собираемых изделий, имеющих значение A_{Σ} в пределах отдельной ступени компенсации, можно определить как произведение соответствующей доли изделий на общее число изделий собираемой партии P :

$$P_i = q_i \cdot P. \quad (16)$$

Число компенсаторов, требуемых для изделий, относящихся к i -ой ступени (при $i - 1$ компенсаторе на каждое изделие):

$$Q_i = (i - 1) \cdot q_i \cdot P. \quad (17)$$

Общее число требуемых тонких компенсаторов для партии из P изделий при четном числе ступеней компенсации получим, подставляя в (17) выражение (14) и суммируя полученные слагаемые (отдельно для первой половины TA_{Σ} и отдельно для второй половины TA_{Σ})

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i = P \cdot \sum_{i=1}^{N/2} (i-1) \cdot \left[\Phi \left(3 - \frac{6(i-1)}{N} \right) - \Phi \left(3 - \frac{6 \cdot i}{N} \right) \right] + \\ + P \cdot \sum_{i=N/2+1}^N (i-1) \cdot \left[\Phi \left(3 - \frac{6(N-i)}{N} \right) - \Phi \left(3 - \frac{6 \cdot (N-i+1)}{N} \right) \right]. \quad (18)$$

Общее число требуемых тонких компенсаторов для партии из P изделий при нечетном числе ступеней компенсации получаем аналогично выражению (18) с добавлением числа компенсаторов для изделий, относящихся к средней ступени компенсации с учетом формулы (15)

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i = P \cdot \sum_{i=1}^{N/2-0.5} (i-1) \cdot \left[\Phi \left(3 - \frac{6(i-1)}{N} \right) - \Phi \left(3 - \frac{6 \cdot i}{N} \right) \right] + \\ + 2 \cdot P \cdot \left(\frac{N}{2} - 0,5 \right) \cdot \Phi \left(\frac{3}{N} \right) + \\ + P \cdot \sum_{i=N/2+1}^N (i-1) \cdot \left[\Phi \left(3 - \frac{6(N-i)}{N} \right) - \Phi \left(3 - \frac{6 \cdot (N-i+1)}{N} \right) \right]. \quad (19)$$

Программное обеспечение для расчета ступени компенсации и числа компенсаторов

Для возможности использования полученных сложных зависимостей в практике проектирования техпроцессов сборки разработано программное обеспечение для решения кубического уравнения при расчете ступени компенсации и для расчета числа тонких компенсаторов, требуемых для сборки партии изделий.

В приложении Excel на языке Visual Basic for Application (VBA) разработана компьютерная программа, вычисляющая корни уравнения (7) ($Y1=C_1$, $Y2=C_2$, $Y3=C_3$) по формулам Кардано. Исходными данными для расчёта являются: TA_{Σ} – суммарный допуск составляющих звеньев конструкторской размерной цепи (мм); TA_{Δ} – допуск замыкающего звена (мм); погрешность эталона (мм); погрешность установки эталона (мм); погрешность измерений (мм); λ^2 – коэффициент закона распределения. При запуске программы в рабочем окне появляется исходная таблица с кнопкой вызова формы для ввода исходных данных. Выбор закона распределения производится из выпадающего меню. Коэффициенты относительного рассеяния (для закона равной вероятности $\lambda^2 = 1/3$, для закона Симпсона $\lambda^2 = 1/6$, для нормального закона распределения $\lambda^2 = 1/9$) занесены в таблицу в защищенные ячейки, откуда затем и происходит их считывание. В поле "Погрешность размера компенсатора" происходит автоматический расчет допуска толщины компенсатора при вводе исходных данных в поля: "Погрешность эталона"; "Погрешность установки эталона"; "Погрешность измерений". При щелчке по кнопке "Расчёт" происходит вызов формы результатов расчёта корней кубического уравнения.

Заключение

Многочисленные расчеты числа компенсаторов для размерных цепей плунжерных насосов, червячных редукторов и других изделий, выполненных методом максимума-минимума по методике, изложенной в [4], и предлагаемым теоретико-вероятностным методом, показали, что, рискуя 3 изделиями из 1000 (при коэффициенте риска $t_{\Delta} = 3$), можно сократить число требуемых компенсаторов, в среднем, в полтора раза. Таким образом, предлагаемая методика теоретико-вероятностного расчета компенсаторов позволяет избежать необоснованно высоких требований к точности сборочной оснастки, сократить число компенсаторов в наборе на одно изделие и партию изделий и, следовательно, сократить себестоимость сборки. Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием технологических процессов сборки машин.

Список цитированных источников

1. Допуски и посадки : справочник : в 2 ч. / М. А. Палей [и др.] – СПб. : Политехника, 2001. – Часть 2. – 608 с.
2. Проектирование технологических процессов сборки машин : учебник / под общ. ред. А. А. Жолобова. – Минск : Новое знание, 2005. – 410 с.
3. Технология машиностроения (специальная часть) : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.] – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Медведев, О. А. Обоснование выбора технологической оснастки для достижения точности сборки машин методом регулирования неподвижных компенсаторов / О. А. Медведев, П. Н. Ковальчук // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2008. – № 4 : Машиностроение. – С. 40–44.

References

1. Dopuski i посадки : spravochnik : v 2 ch. / M. A. Palej [i dr.]. – SPb. : Politekhnik, 2001. – CHast' 2. – 608 s.
2. Proektirovanie tekhnologicheskikh processov sborki mashin : uchebnik / pod obshch. red. A. A. Zholobova. – Minsk : Novoe znanie, 2005. – 410 s.
3. Tekhnologiya mashinostroeniya (special'naya chast') : uchebnik dlya mashinostroitel'nykh special'nostej vuzov / A. A. Gusev [i dr.]. – M. : Mashinostroenie, 1986. – 480 s.
4. Medvedev, O. A. Obosnovanie vybora tekhnologicheskoy osnastki dlya dostizheniya tochnosti sborki mashin metodom regulirovaniya nepodviznykh kompensatorov / O. A. Medvedev, P. N. Koval'chuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2008. – № 4 : Mashinostroenie. – S. 40–44.

Материал поступил в редакцию 17.03.2022

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОТИВОУДАРНЫХ СТРУКТУР В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

А. А. Мишин¹, А. С. Люев², М. Н. Мануйлов³

¹ Преподаватель кафедры средств наземного обеспечения полетов военного факультета Белорусской государственной академии авиации, Минск, Беларусь, e-mail: SNOBPBGA@gmail.com

² Начальник кафедры средств наземного обеспечения полетов военного факультета Белорусской государственной академии авиации, Минск, Беларусь, e-mail: SNOBPBGA@gmail.com

³ Старший преподаватель кафедры средств наземного обеспечения полетов военного факультета Белорусской государственной академии авиации, Минск, Беларусь, e-mail: SNOBPBGA@gmail.com

Реферат

Выполнен анализ современного состояния и направлений развития способов создания противоударных защитных структур для авиационной техники. Обосновано применение структурированных слоев из сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Показано, что применение сверхвысокомолекулярного полиэтилена позволит существенно сократить массу баллистической защиты, что положительно повлияет на тактико-технические характеристики и возможности вертолетов как грузовых судов.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, бронезащита.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING SHOCKPROOF STRUCTURES IN AVIATION TECHNOLOGY

A. A. Mishin, A. S. Lyuev, M. N. Manuilov

Abstract

The analysis of the current state and directions of development of methods for creating anti-shock protective structures for aircraft. The use of structured layers made of ultrahigh molecular weight polyethylene is substantiated. It is shown that the use of ultrahigh molecular weight polyethylene will significantly reduce the mass of ballistic protection, which will positively affect the tactical and technical characteristics and capabilities of helicopters as cargo ships.

Keywords: ultrahigh molecular weight polyethylene, armor.

Начиная с проведения специальных операций за линией фронта и заканчивая гуманитарными и спасательными операциями, в условиях современных кризисов вертолеты необходимы для военных служб. Однако характер угроз, с которыми они сталкиваются, делает их легкой мишенью для вражеских сил. Летательным аппаратам угрожает не только легкое стрелковое оружие и осколки, но и оружие среднего и крупного калибра, пулеметы, а также зенитные орудия. Случайное попадание в двигатель, хвостовой винт или в пилота может привести к тому, что вертолет станет неуправляемым, что в свою очередь может стать причиной падения и возможных потерь среди экипажа и пехотных войск. Это обуславливает необходимость в большей баллистической защите вертолетов.

Баллистическая защита вертолетов может быть улучшена путем использования решений брони в критически важных областях фюзеляжа и места пилота. Однако установка на одном воздушном судне дополнительной брони стоит сотни тысяч долларов. Броня сильно увеличивает вес, что влияет на характеристики и грузоподъемность вертолета. Помимо этого, внесение каких-либо структурных изменений в фюзеляж может отрицательно повлиять на аэродинамику вертолета. Поэтому требуется повторная сертификация воздушного судна на предмет полетопригодности.

Однако усовершенствованные решения брони могут играть важную роль в модернизации целого флота схожих вертолетов, позволяя адаптировать вертолеты в зависимости от назначения. Если вертолет применяется для спасательных операций или боевого поиска, может быть установлена дополнительная броня для обеспечения баллистической защиты. Для гуманитарных и спасательных операций эта дополнительная броня может быть снята с вертолета с целью увеличения грузоподъемности. Это позволяет варьировать грузоподъемность.

В настоящее время является актуальной задача определения варианта исполнения средств баллистической бронезащиты, обеспечивающего заданный уровень защищенности техники при ограничениях на общую массу. При обеспечении баллистической защиты для вертолетов важен каждый килограмм веса, благодаря экономии веса летательного аппарата можно перемещать больше людей

и боеприпасов на гораздо большее расстояние с максимальной баллистической защитой. В результате возникает задача определения варианта, при котором обеспечивается заданный уровень защищенности при ограничениях на общую массу бронезащиты, которые определяются заданной продолжительностью его боевого функционирования.

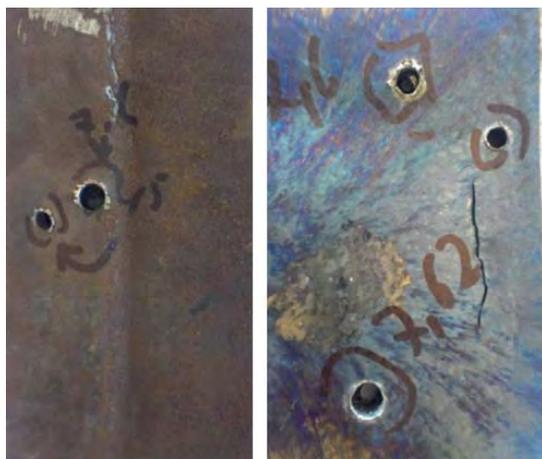
Современные средства бронезащиты, как правило, представляют собой двухслойную структуру, состоящую из бронепанели и многослойного пакета баллистических тканей за ней (рисунок 1, 2). Снижение общей массы возможно по двум основным направлениям. Первое направление связано с применением в конструкции бронепанелей неметаллических материалов и технической керамики (Al_2O_3 , B_4C , SiC , AlN , Si_3N_4), плотность которой в 2–3 раза меньше стали. Полученные в настоящее время результаты свидетельствуют о перспективности данного подхода [1]. Второе направление связано с повышением пулевой стойкости стальной бронепанели, поглощающей кинетическую энергию пули при ударе, а также использованием в ее конструкции легких металлов. Однако возможности снижения веса бронепанелей за счет повышения пулевой стойкости стали в результате легирования и термообработки довольно ограничены (приблизительно на 10 %) [2]. Также при твердости стальных защитных элементов выше 52 HRC повышается хрупкость и, как следствие, вероятность пролома или раскола. В свою очередь применение легких металлов, в частности титановых и алюминиевых сплавов, позволяет добиться заметного снижения веса панелей (приблизительно на 20 %), но при этом повышает стоимость комплекта. Альтернативным способом создания элементов защиты является оптимизация распределения свойств материала металлической бронепанели. Примером реализации данного подхода является гетерогенная броня, имеющая наружный (воспринимающий удар средства поражения) слой высокой твердости и тыльный (или тыльные) вязкий, пластичный слой, который не создает осколков или так называемого тыльного скола, поражающих запреградное пространство [2, 3]. Фактически данная конструкция является примером градиентного материала. Для создания гетерогенных защитных элементов в настоящее время применяются сварка взрывом и пакетная

прокатка. Основными ограничениями применяемых способов являются номенклатура соединяемых материалов, ограничения по форме поверхности (в первую очередь кривизне), необходимость использования уникального оборудования, проведения работ в заводских условиях и использования взрывчатых веществ.



а) пластины стали 65Г, плакированные листовым алюминием;
б) лист алюминия, плакированного титаном

Рисунок 1 – Композиции, полученные сваркой взрывом



а) пластины стали 65Г, плакированные листовым алюминием и сталью 3; б) лист алюминия, плакированного титаном

Рисунок 2 – Композиции, полученные сваркой взрывом, после прострела

Аналогичный подход принят при конструировании баллистического пакета из высокопрочных синтетических арамидных тканей на основе волокон CBM, Kevlar™, Twaron™, Dyneema™, Spectra™, которые обеспечивает быстрое превращение кинетической энергии пули в работу деформирования достаточно большого объема защитного материала. Преимущества данных тканей в том, что они состоят из арамидных нитей или нитей из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, которые обладают наибольшими значениями удельного модуля упругости или удельной прочности среди известных конструкционных материалов. Такие материалы эффективно распределяют кинетическую энергию пули за счет высокой скорости звука в нитях, однако при постепенном торможении пули динамические процессы в нитях затухают и наступает стадия сравнительно медленного фрикционного взаимодействия нитей внутри каждого слоя ткани. При проектировании защитных структур необходимо учитывать не только динамическую, но и фрикционную фазу работы слоев тканей, что обеспечит снижение прогиба тыльной стороны защитной структуры и соответствующее снижение травмирования человека [4]. В наружных слоях бронезилета, контактирующих с высокоскоростной пулей, превалирует динамическая фаза работы тканей, а в тыльных слоях – фрикционная, низкоскоростная. Такое

деление бронеструктуры заставляет по-разному относиться к взаимодействию нитей в тканевых слоях: снижать трение в наружных и повышать трение между нитями в тыльных слоях или применять ткани с различными типами переплетения (сатин, саржа, полотно) по толщине бронеструктуры. В работе [4] представлен технологичный способ управления процессом сухого трения между нитями – поверхностная обработка различными составами (суспензия ПВА, канифоль, силиконовая смазка) с незначительным утяжелением ткани. Известны также конструктивные способы усиления фрикционного взаимодействия нитей в слоях за счет плотной просточки пакета из нескольких тыльных слоев, покрытие тканей слоем полимера [5], использование неньютоновских жидкостей. На основании данного анализа нами сформулирована гипотеза о перспективности создания материалов на основе арамидных тканей, которые имеют области динамического и фрикционного взаимодействия нитей, т. е. «дискретных» материалов.

Перспективными направлениями являются создание защитных структур на основе максимального использования энергетической поглотительной способности разрушаемого материала [6] и использование новых материалов, в частности современных полимеров. Во всех неструктурированных материалах скорость напряжения уменьшается с увеличением деформации из-за развития дефектов, открытия микротрещин и других механизмов. Эти явления приводят к концентрациям напряжений, которые в конечном итоге разрушают материал. Концентрация напряжений может быть уменьшена с помощью бистабильных структур (рисунок 3). В отличие от обычных структур, бистабильная структура преобразует энергию удара в направленные бегущие волны, которые рассеивают энергию по большей области. Делокализация повреждения достигается за счет того, что частичный внутренний отказ предшествует окончательному отказу. Такие структуры будут равномерно распределять напряжение, и будет стабильным даже при частичном разрушении. Структуры с внутренней нестабильностью создают многочисленные внутренние разрывы, которые приводят к устойчивой структурной трансформации, а также транспортируют повреждения от зоны воздействия. В результате структура может выдерживать большие деформации.



(а) решетка с избыточными направлениями нагрузки;
(б) трубка и цилиндр; (в) трубка и конус; (г) многослойная структура;
(д) структура со спиралями («белковая» структура)

Рисунок 3 – Структуры, которые поглощают энергию при частичном повреждении с сохранением структурной целостности

Перспективным материалом для создания покрытий в настоящее время является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Полиэтилен высокой плотности с молекулярной массой более 1500000 принято считать СВМПЭ (UHMWPE – Ultrahight Molecular Weight Polyethylene). Это полимер линейной структуры с очень длинными цепями, не имеющими боковых ответвлений [7, 8]. Основными производителями СВМПЭ являются Германия, Голландия, Япония: Mitsui Petrochemical Ind., Япония; Allied-Signal Fibers Co., Allied-Signal Inc., Chemical Research Center, Petersburg (Питсбург, Вирджиния), Ticona Engineering Polymers for Technical Solutions (Германия) и др.

Основной особенностью СВМПЭ являются длинные линейные параллельно ориентированные цепочки полиэтилена со сверхвысокой массой молекул (до 6 млн) и относительно слабыми связями между (10–20 кДж/моль) [9] по сравнению, например, с кевларом, имеющим короткие молекулы и сильные связи между ними. Это способствует более эффективной передаче и распределению нагрузки на материал, что обеспечивает его высокую жесткость и ударопрочность, превосходящую по данному показателю любой другой термопластичный полиэтилен.

В целом СВМПЭ можно определить как конструкционный полимерный материал с уникальными физико-механическими свойствами для разнообразных областей применения, в том числе в экстремальных условиях [9].

Применение сверхвысокомолекулярного полиэтилена ограничивается трудностями, возникающими при его переработке в изделия вследствие высокой вязкости расплава. Материал при температуре выше точки плавления его кристаллической фазы не переходит в вязкотекучее состояние, а остается деформационно-упругим. В результате исследований, посвященных разработке и совершенствованию технологий переработки СВМПЭ, в промышленном масштабе освоены такие способы переработки, как горячее прессование, спекание, рэм-экструзия, напыление (горячепламенное, электростатическое), а для получения волокна – гель-формование. Некоторые предприятия освоили нанесение пленочных защитных покрытий из СВМПЭ методом газопламенного и газоплазменного напыления. Данный метод отличается простотой и универсальностью применяемого оборудования, позволяющий создавать покрытия из широкой номенклатуры материалов (металлы, полимеры, керамика). Так, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН установил влияние нано-размерных керамических наполнителей на физико-механические свойства покрытий из СВМПЭ [10]. В работе [11] представлены результаты исследований физико-механических свойств композиционных газопламенных покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с добавлением карбида кремния. Напыление покрытий на стальные подложки проводили газопламенным методом. Показано, что данное композиционное покрытие на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена характеризуется значительной прочностью при ударе. Результаты данных исследований подтверждают целесообразность использования газопламенного напыления для создания покрытий из СВМПЭ. Вместе с тем необходимо отметить недостаточность информации о влиянии параметров процесса напыления на свойства полученных покрытий, в первую очередь на параметры молекулярной цепи.

Выполнен анализ современного состояния и перспектив развития способов создания защитных противоударных структур. Установлено, что в настоящее время повышение стойкости возможно в результате формирования градиентных структур, в которых наружный слой и тыльный внутренний обладают различными свойствами. Для пакета баллистических тканей реализация данного подхода выражается в повышении трения между нитями тыльных слоев пакета, что обеспечивает фрикционную (низкоскоростную) фазу работы. Возможные технологические способы управления процессом сухого трения между нитями – поверхностная обработка различными составами, покрытие тканей слоем полимера, использование неньютоновских жидкостей. Сформулирована гипотеза о перспективности создания дискретных материалов на основе арамидных тканей, которые имеют области динамического и фрикционного взаимодействия нитей.

Решение брони из СВМПЭ и арамидных тканей обеспечивает универсальность применения, поскольку оно может просто устанавливаться в тех случаях, когда необходима дополнительная баллистическая защита вертолета. По завершении операции бронеконтакт может быть снят и быстро установлен на другом готовом к бою вертолете для повышения его баллистической защиты. Данное решение подходит для широкого ряда вертолетов. Кроме того, поскольку комплект может применяться для различных вертолетов одного типа, стоимость владения значительно снижается.

Список цитированных источников

1. Толочко, Н. К. Конструктивные особенности броневых панелей на основе керамики / Н. К. Толочко // Перспективные материалы. – 2011. – № 3. – С. 59–66.
2. Беспалов, И. А. Легкие защитные структуры / И. А. Беспалов, М. О. Алексеев, Д. Г. Купрюнин. – М.: РадиоСофт, 2017. – С. 368.
3. Драгобецкий, В. В. Разработка элементов средств индивидуальной защиты нового поколения на основе слоистых металлических композиций / В. В. Драгобецкий, А. А. Шаповал, В. Г. Загорянский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Том 58, № 1. – С. 44–48.
4. Поверхностная обработка арамидной ткани и ее влияние на механику фрикционного взаимодействия нитей / А. В. Игнатова [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2017. – № 4. – С. 121–137.
5. Gawandi, A. Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric / A. Gawandi // Journal of Materials Science. – 2011. – Vol. 46. No. 1. – P. 77–89.

6. Cherkaev, A. Principles of Optimization of Structures Against an Impact / A. Cherkaev // Journal of Physics: Conference Series 319. – 2011.
7. Ашпина, О. Сверхвысокомолекулярный проект / О. Ашпина // The Chemical Journal. – Сентябрь 2006 – С. 30–33.
8. Свойства композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена / С. В. Адашкевич [и др.] // Приборостроение-2016 : материалы 9-й Международной научно-технической конференции, Минск, 23–25 ноября 2016 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 246–247.
9. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования / Г. Е. Селютин [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – № 18. – С. 375–388.
10. Белоцерковский, М. А. Получение композиционных покрытий на основе полиэтилена газопламенным методом / М. А. Белоцерковский, В. И. Дубкова, И. И. Таран // Актуальные вопросы машиноведения. – 2015. – Выпуск 4. – С. 327–330.
11. Modeling and Simulation of Impact and Perforation in Fiber Reinforced Composites / M. Tehrani, A. Y. Boroujeni, M. S. Al-Haik / Conference: 29th Annual American Society for Composites Technical Conference, September 8, 2014 – September 10, 2014, At San Diego, CA, United states. – <https://www.researchgate.net/publication/272478466>.

References

1. Tolochko, N. K. Konstruktivnye osobennosti bronevyyh panelej na osnove keramiki / N. K. Tolochko // Perspektivnye materialy. – 2011. – № 3. – S. 59–66.
2. Bespalov, I. A. Legkie zashchitnye struktury / I. A. Bespalov, M. O. Alekseev, D. G. Kupryunin. – M.: RadioSoft, 2017. – S. 368.
3. Dragobekij, V. V. Razrabotka elementov sredstv individual'noj zashchity novogo pokoleniya na osnove sloistyyh metallicheskikh kompozicij / V. V. Dragobekij, A. A. SHapo-val, V. G. Zagoryanskij // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Chernaya metallurgiya. – 2015. – Tom 58, № 1. – S. 44–48.
4. Poverhnostnaya obrabotka aramidnoj tkani i ee vliyanie na mekhaniku frikcionno-go vzaimodejstviya nitej / A. V. Ignatova [i dr.] // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika, 2017. – № 4. – S. 121–137.
5. Gawandi, A. Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric / A. Gawandi // Journal of Materials Science. – 2011. – Vol. 46. No. 1. – P. 77–89.
6. Cherkaev, A. Principles of Optimization of Structures Against an Impact / A. Cherkaev // Journal of Physics: Conference Series 319. – 2011.
7. Ashpina, O. Sverhvysokomolekulyarnyj proekt / O. Ashpina // The Chemical Journal. – Sentyabr' 2006 – S. 30–33.
8. Svoystva kompozita na osnove sverhvysokomolekulyarnogo polietilena / S. V. Adashkevich [i dr.] // Priborostroenie-2016 : materialy 9-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Minsk, 23–25 noyabrya 2016 g. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: O. K. Gusev [i dr.]. – Minsk, 2016. – S. 246–247.
9. Kompozicionnye materialy na osnove sverhvysokomolekulyarnogo polietilena: svoystva, perspektivy ispol'zovaniya / G. E. Selyutin [i dr.] // Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya. – 2010. – № 18. – S. 375–388.
10. Belocerkovskij, M. A. Poluchenie kompozicionnyh pokrytij na osnove polietilena gazoplammennym metodom / M. A. Belocerkovskij, V. I. Dubkova, I. I. Taran // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. – 2015. – Vypusk 4. – S. 327–330.
11. Modeling and Simulation of Impact and Perforation in Fiber Reinforced Composites / M. Tehrani, A. Y. Boroujeni, M. S. Al-Haik / Conference: 29th Annual American Society for Composites Technical Conference, September 8, 2014 – September 10, 2014, At San Diego, CA, United states. – <https://www.researchgate.net/publication/272478466>.

Материал поступил в редакцию 01.03.2022

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АДДИТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ**Е. В. Овчинников¹, А. И. Веремейчик²,
В. М. Хвйсевиц³, Г. А. Костюкович⁴, А. В. Попрыкайло⁵**¹ Д. т. н., доцент, доцент кафедры логистики и методов управления

Гродненского государственного университета им. Я. Купальи, г. Гродно, Республика Беларусь, e-mail: ovchin_1967@mail.ru

² К. ф.-м. н., доцент, старший научный сотрудник испытательного центра

Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by

³ К. т. н., доцент, профессор кафедры прикладной механики

Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: vmhvisevich@bstu.by

⁴ К. т. н., профессор кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий

Гродненского государственного университета им. Я. Купальи, заместитель директора по техническому развитию ОАО «Белкард», г. Гродно, Республика Беларусь, e-mail: info@belcard-grodno.com

⁵ Аспирант кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий

Гродненского государственного университета им. Я. Купальи, г. Гродно, Республика Беларусь, e-mail: kaf_mirt@grsu.by

Реферат

В статье представлены результаты исследования физико-механических характеристик аддитивных покрытий, полученных сочетанием методов электрофизической наплавки и электроискрового легирования. Рассмотрены вопросы структурных трансформаций при создании покрытий методом аддитивных технологий. Установлено, что основополагающее влияние на прочностные и триботехнические характеристики покрытий оказывает химический состав используемых электродов. Наблюдается образование как сверхтвердых фаз в получаемых гибридных покрытиях, так и фаз со слоистой структурой характеризующимися высокими триботехническими характеристиками. Состав покрытий, технологические режимы их получения оказывают существенное влияние на значения удельной поверхностной энергии. При использовании предлагаемой технологии получения покрытий возможно формирование наноструктур в матрице аддитивных покрытий. Использование данного технологического метода позволяет существенно улучшить физико-механические характеристики сверхтвердых покрытий.

Ключевые слова: электроискровое легирование, дуговой разряд, наплавка, покрытия, физико-механические свойства.

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ADDITIVE COATINGS**Y. V. Auchynnikau, A. I. Verameichyk, V. M. Khvisevich, G. A. Costykovich, A. V. Poprykailo****Abstract**

The article presents the results of a study of the physical and mechanical characteristics of additive coatings obtained by a combination of methods of electrophysical surfacing and electrospark alloying. The issues of structural transformations during the creation of coatings by the method of additive technologies are considered. It has been established that the chemical composition of the electrodes used has a fundamental influence on the strength and tribotechnical characteristics of the coatings. The formation of both superhard phases in the resulting hybrid coatings and phases with a layered structure characterized by high tribotechnical characteristics is observed. The composition of the coatings, the technological modes of their production have a significant impact on the values of the specific surface energy. When using the proposed technology for obtaining coatings, it is possible to form nanostructures in the matrix of additive coatings. The use of this technological method can significantly improve the physical and mechanical characteristics of superhard coatings.

Keywords: electrospark alloying, arc discharge, surfacing, coatings, physical and mechanical properties.

Введение

В настоящее время используется достаточно большое количество технологических приемов для синтеза неорганических и органических покрытий в вакууме путем конденсации или парофазной реакции на поверхности подложек различной природы. Данные технологии не включают операции термической или термохимической диффузии, происходящие фактически в воздушной среде, но включают ионную имплантацию, т. е. данный процесс модифицирования поверхности происходит в вакууме. Согласно классическим представлениям, общие ограничения почти всех методов физического осаждения из паровой фазы (PVD) заключаются в следующем: создание достаточно тонких (10^{-7} – 10^{-4} м) слоев. Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) применяется как для тонких слоев, так и для слоев с толщиной более 1 мм [1–3]. Благодаря своей стойкости к изнашиванию и коррозии, такие покрытия очень удобны для модифицирования технологических изделий и конструкций, что очень важно для использования в различных инженерных приложениях. Кроме того, данные покрытия находят широкую область применения в электронных и оптических устройствах, при изготовлении украшений и в дизайнерских решениях, применяемых в архитектуре. Большое сочетание методов PVD и CVD подразумевает, что их полное разделение и различие затруднено. Однако выше перечисленные физические и химические методы получения покрытий требуют специализированного дорогостоящего оборудования. Существует достаточно простые в технологическом и аппаратном исполнении физические

методы осаждения защитных высокотвердых слоев. Так, метод электродуговой наплавки позволяет упрочнять и восстанавливать различные конструкционные изделия двигателей автомобиля, в частности коленчатые и распределительные валы, шестерни и т. п. Данная технология позволяет существенно снизить себестоимость проводимого ремонта различных узлов автотракторной техники. Существует несколько способов наплавки: газовая наплавка, дуговая наплавка, наплавка под флюсом, электрошлаковая наплавка, дуговая наплавка с вольфрамовым электродом в защитной атмосфере инертного газа, аргодуговая сварка вольфрамовым электродом с присадочным прутком (GTA), газовая дуговая сварка металлическим электродом (GMA), наплавка с использованием самозащитных порошковых проволок (SSA), плазменная наплавка (PTA), лазерная наплавка и другие методы [4–10]. Качество наплавочного материала также зависит от скорости его кристаллизации – как правило, чем быстрее происходит кристаллизация, тем выше качество наплавочного шва. Эти процессы зависят от скорости движения манипулятора, мощности дуги и способности системы отводить тепло в процессе наплавки. Для придания дополнительных физико-механических характеристик наплавленным материалам возможно использование других электрофизических методов формирования покрытий. В частности, в данном случае подходит технология электроискрового легирования (ЭИЛ). Электроискровое легирование – стандартная технология модифицирования проводящих поверхностей твердых тел, которая характеризуется высокой плотностью энергии и низким тепловыделением

в процессе нанесения покрытия. Данный метод нашел широкое применение для создания упрочненных поверхностей изделий путем формирования модифицированных упрочняющих покрытий [4–5]. Применение импульсного разряда высокой энергии между вибрирующим электродом и металлической подложкой позволяет инициировать микрометаллургические процессы, что обеспечивает высокую адгезионную прочность между покрытием и подложкой.

Методика эксперимента

В ходе проведенных исследований для формирования покрытий необходимой толщины применялись следующие методы электрофизического воздействия: дуговая наплавка (I), дуговая наплавка с неплавящимся электродом в защитной атмосфере защитного газа (в качестве защитного газа использовали CO₂) (II), аргонодуговая наплавка с неплавящимся электродом (III). В качестве легирующих материалов применялась электродная проволока ОЗС-12 для метода (I), проволока Св-08Г2С для метода (II), проволока СВ-08А для метода (III). Химический состав применяемых проволок приведен в таблицах 1–3.

Особенности строения граничных слоев в композиционных материалах функционального назначения исследовался с привлечением современных методов: растровой электронной, атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа (ДРОН-3.0) по стандартным методикам. Рентгеноструктурный анализ применялся для определения структуры тонкослойных вакуумных покрытий. Рентнограммы были получены на рентгеновском дифрактометре общего назначения марки ДРОН-3.0, используя излучение линии K_α от трубки с медным антикатодом, фильтрованное на длине волны λ = 1,541 Å.

Для оценки химического состава формирующихся покрытий на стальной подложке из стали 45 применялся метод рентгеновской флуоресцентной спектроскопии. Исследования проведены на приборе МАКС-G. Наплавленные образцы подвергались предварительной обработке путем шлифования до 9–10 класса чистоты.

Результаты исследований

Результаты исследований по определению химического состава наплавленных покрытий приведены на рисунке 1.

Таблица 1 – Химический состав электродной проволоки ОЗС-12

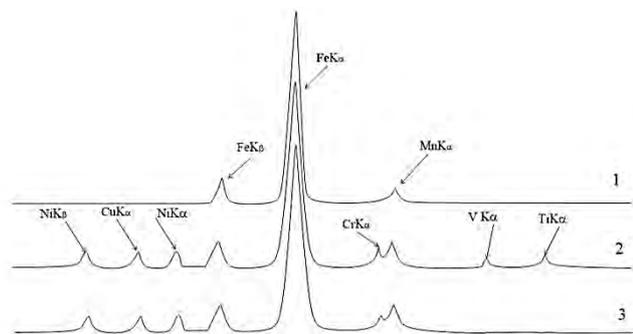
C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %
не более 0,12	0,45–0,8	0,1–0,25	0,03	не более 0,025

Таблица 2 – Химический состав электродной проволоки Св-08Г2С

C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr, %	Mo, %	Ni, %	V, %	Ti, %	Al, %	Cu, %	N, %	As, %
0,05–0,11	1,8–2,1	0,7–0,95	<0,025	<0,03	<0,2	<0,15	<0,25	0,05	<0,04	<0,05	<0,25	<0,01	<0,08

Таблица 3 – Химический состав электродной проволоки Св-08А

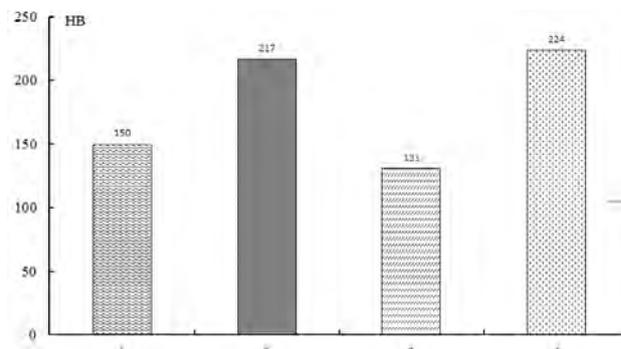
C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Al, %	Cu, %
<0,1	0,35–0,6	<0,03	<0,04	<0,04	<0,15	<0,3	<0,01	<0,25



1 – покрытие, полученное по методу I; 2 – по методу II; 3 – по методу III
Рисунок 1 – Спектры РФА металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродугуговой наплавки

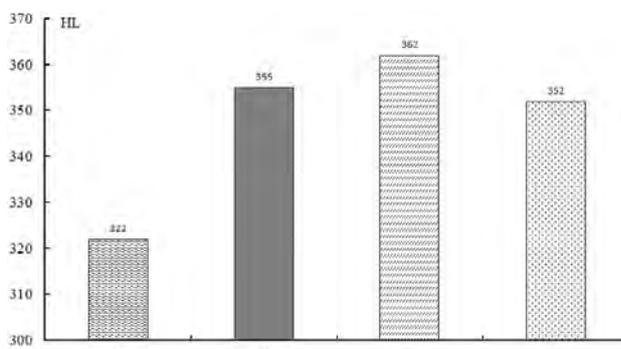
Согласно полученным данным, химический состав осаждаемых покрытий фактически не отличается от химического состава электродных проволок, применяемых для формирования защитных слоев. В связи с этим возможно предположить, что механические характеристики восстановленных металлических поверхностей будут соответствовать

свойствам материалов, применяемых для напыления (рисунок 2, 3). Твердость наплавленных образцов определялась методами Либса (динамическое индентирование) и Бринелля (статическое индентирование). Результаты исследований приведены на рисунках 2, 3.



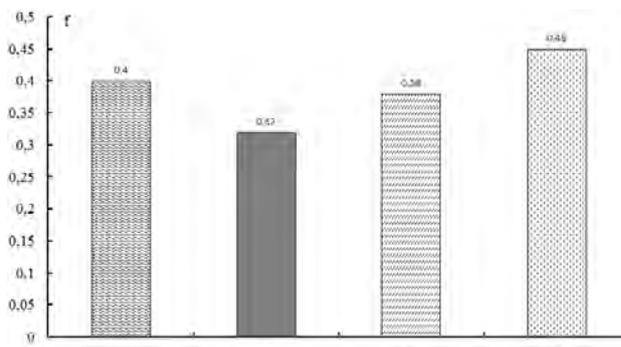
1 – покрытие, полученное по методу I; 2 – по методу II; 3 – по методу III; 4 – исходная сталь 45

Рисунок 2 – Твердость по Бринеллю металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродугуговой наплавки



1 – покрытие, полученное по методу I; 2 – по методу II; 3 – по методу III; 4 – исходная сталь 45

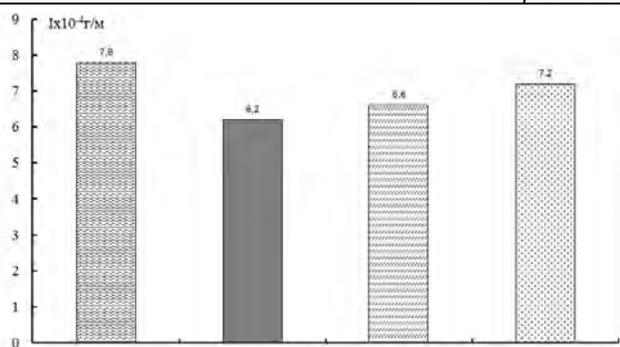
Рисунок 3 – Твердость по Либсу металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродугуговой наплавки



1 – покрытие, полученное по методу I; 2 – по методу II; 3 – по методу III; 4 – исходная сталь 45

Рисунок 4 – Коэффициент трения металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродугуговой наплавки

Исходя из полученных данных, наблюдается хорошая корреляция между данными динамического и статического индентирования. Данная зависимость прочностных характеристик от метода получения покрытий должна оказывать существенное влияние на триботехнические характеристики сформированных защитных металлических слоев. Согласно полученным данным триботехнических испытаний, проведенных на трибометре FT-2, установлено, что наиболее оптимальными характеристиками обладает покрытие, полученное по методу 2 (рисунки 4, 5).



1 – покрытие, полученное по методу I;
2 – по методу II; 3 – по методу III; 4 – исходная сталь 45

Рисунок 5 – Массовая интенсивность изнашивания металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки



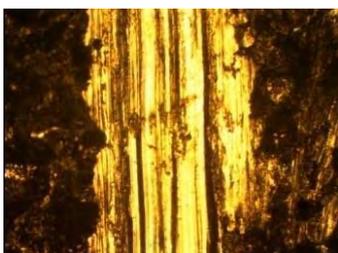
1)



2)



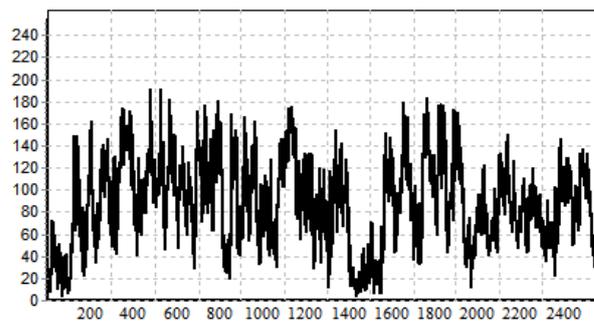
3)



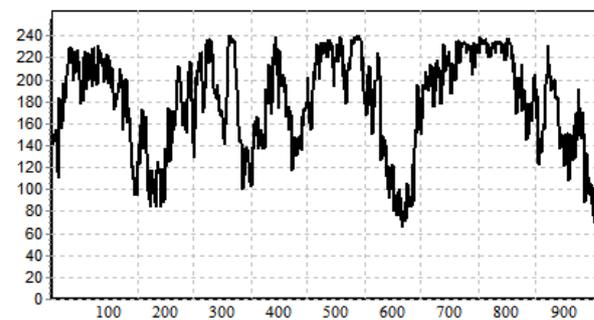
4)

1 – покрытие, полученное по методу I;
2 – по методу II; 3 – по методу III; 4 – исходная сталь 45

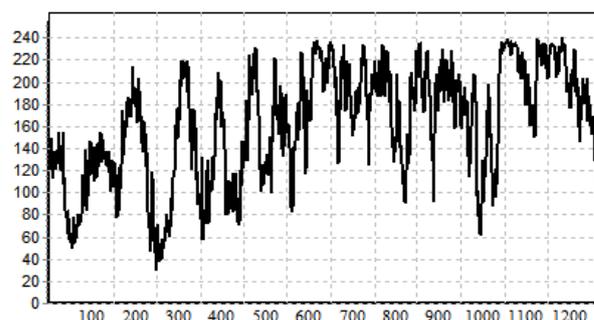
Рисунок 6 – Морфология поверхности трения металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки



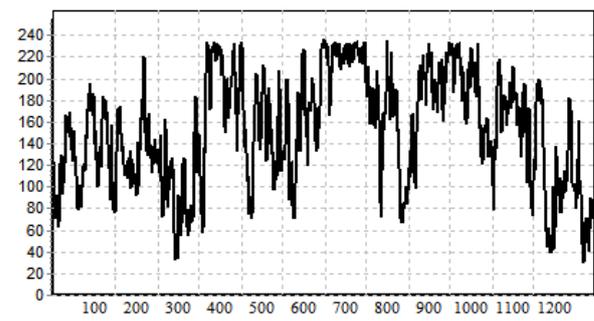
1)



2)



3)



4)

1 – покрытие, полученное по методу I;
2 – по методу II; 3 – по методу III; 4 – исходная сталь 45

Рисунок 7 – Топография поверхности трения металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки

Исходя из данных, представленных на рисунках 6 и 7, видно, что наблюдается выглаживание исходного рельефа при трении по стали ШХ15 по наплавленным металлам. Наиболее сглаженный рельеф наблюдается у образца, полученного по методу II. Образование сглаженного рельефа объясняет снижение значений коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытий, получаемых по методу II.

Для повышения эксплуатационных характеристик базовых наплавленных материалов применялся метод электроискрового легирования.

Использовался метод послойного формирования защитных покрытий, что существенно удешевляет процесс формирования защитных слоев. В таблице 4 приведены составы покрытий. Применение различных режимов и составов покрытий обусловлено необходимостью показать общую тенденцию образования сверхтвердых слоев методом ЭИЛ на подслоях, сформированных электродуговой наплавкой на стали 45.

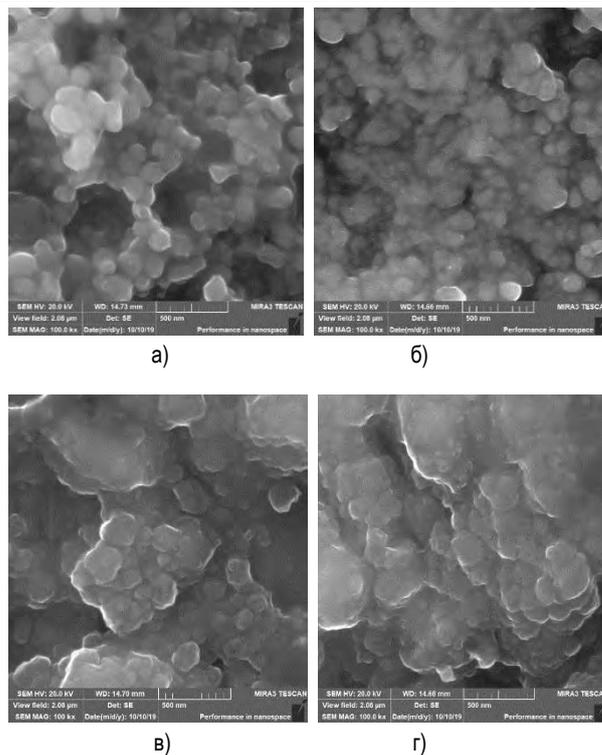
Таблица 4 – Технологические параметры формирования покрытий ЭИЛ и состав электродов

Образец	Параметры формирования покрытий		
	режим формирования покрытия, Дж	Субстрат	состав электрода
№ 1	0,9	покрытие, полученное по методу 1	Ti+Al+C
№ 2	3	покрытие, полученное по методу 2	Ti+Al+C
№ 3	0,9	покрытие, полученное по методу 3	Ti+Si+C
№ 4	3	исходная сталь 45	Ti+Si+C

Структура сформированных ЭИЛ покрытий на металлических наплавленных подслоях изучалась методом рентгеноструктурного анализа. Результаты исследований приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчетов межплоскостного расстояния для аддитивных многокомпонентных покрытий, сформированных методом электроискрового легирования

№ Рефлекса	Образец № 1		Образец № 2		Образец № 3		Образец № 4	
	d/n	l	d/n	l	d/n	l	d/n	l
1	4,665	4,9	5,031	5,05	3,76	2,7	3,76	4,86
2	4,352	5,22	4,627	5,49	3,39	4,75	3,39	6,86
3	3,956	3,83	4,344	5,31	3,13	5,14	3,13	8,4
4	3,393	7,24	4,058	4,56	2,51	33,59	2,51	4,13
5	2,831	4,18	3,371	7,47	2,35	7	2,35	54,676
6	2,758	4,23	2,81	5,18	2,31	7,85	2,31	6,13
7	2,487	57,45	2,488	64,84	2,24	19,16	2,24	9,11
8	2,308	34,18	2,332	37,06	2,16	31,45	2,16	18,77
9	2,152	68,71	2,236	8,15	1,92	6,09	1,92	40,16
10	2,029	13,19	2,154	77,11	1,83	2,21	1,83	9,13
11	1,994	10,34	2,027	17,11	1,72	3,1	1,72	4,01
12	1,927	5,6	1,994	11,24	1,63	1,9	1,63	2,82
13	1,72	3,39	1,928	7,07	1,6	1,68	1,6	20,59
14	1,521	32,62	1,725	3,098	1,52	15,86	1,52	2,46
15	1,516	26,13	1,703	3,15	1,47	3,03	1,47	2,18
16	1,432	8,98	1,668	3,44	1,42	2,32	1,42	3,46
17	1,408	5,59	1,521	35,03	1,41	3,02	1,41	3,14
18	1,361	2,98	1,472	3,27	1,37	2,71	1,37	3,31
19	1,331	5,42	1,431	10,34	1,33	5,75	1,33	8,04
20	1,297	15,75	1,405	6,21	1,3	7,42	1,3	10,98
21	1,239	11,06	1,381	2,88	1,26	2,54	1,26	3,72
22	1,222	8,06	1,363	3,37	1,25	7,26	1,25	8,41
23	1,202	5,16	1,329	5,03	1,17	1,66	1,17	2,09
24	1,168	5,06	1,298	18,11	1,15	1,83	1,15	2,04
25	1,148	3,86	1,242	12,06	1,12	1,65	1,12	1,51
26	1,075	4,86	1,223	9,04	1,1	1,91	1,1	2,27
27	1,062	92,98	1,204	5,13	1,09	1,31	1,09	1,81
28			1,171	5,86	1,07	2,18	1,07	3,03
29			1,18	4,13	1,06	1,66	1,06	1,66
30			1,07	4,9	1,04	1,79	1,04	2,93
31			1,06	2,72				



а – образец № 1, б – образец № 2, в – образец № 3, г – образец № 4

Рисунок 8 – Морфология электроискровых покрытий (снимки получены методом растровой электронной микроскопии)

Выводы

Исходя из полученных данных, видно, что в результате электроискрового получения покрытий, структура исходных материалов претерпевает существенные изменения. Образуются многокомпонентные покрытия, причем режимы формирования оказывают существенное влияние на структуру получаемых покрытий.

Изучение морфологии электроискровых покрытий методом растровой электронной микроскопии показало наличие нанодисперсных фаз, независимо от режимов и химического состава покрытий (рисунок 8).

Изменения в структуре, морфологии покрытий должны отражаться на физико-механических характеристиках покрытий. Проведенный анализ механических свойств электроискровых слоев, сформированных на стальных подслоях, формируемых электродуговой наплавкой составы с последующим нанесением покрытий методом ЭИЛ различными электродами, показал, что значения микротвердости аддитивных покрытий находятся в области 10–15 ГПа (нагрузка на алмазную пирамиду составляла $m = 50$ гр), в зависимости от условий формирования ЭИЛ покрытия и состава электрода (таблица 1). Значения микротвердости стали 45 и электродуговых подслоев находились в области ~1,9-2,5 ГПа (нагрузка на алмазную пирамиду составляла $m = 50$ гр).

Таким образом, показано, что условия формирования электроискровых покрытий оказывают существенное влияние на структуру получаемых защитных слоев. Структура покрытий также существенно зависит от химического состава электродов. Наблюдается возможность формирования МАХ-фаз в исследуемых покрытиях. Установлено изменение зависимости значений удельной поверхностной энергии от состава покрытия и технологических режимов формирования. Для всех исследуемых типов покрытий наблюдается образование нанодисперсных систем в структуре покрытия. Изменения в структуре, физических параметрах получаемых покрытий положительно сказывается на прочностных характеристиках, что выражается в увеличении значений микротвердости изучаемых покрытий в 1,5–3 раза.

Список цитированных источников

1. Costa, M. Y. P. An investigation on sliding wear behavior of PVD coatings / M. Y. P. Costa // Tribol. Int. – 2010. – Vol. 43. – P. 2196–2202.
2. Banerjee, D. Synthesis of amorphous carbon nanowalls by DC-PECVD on different substrates and study of its field emission properties / D. Banerjee, S. Mukherjee, K. K. Chattopadhyaya // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – P. 3717–3722.
3. An Investigation into the Tribological Performance of Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings on High Thermal Conductivity Cu-Alloy Substrates and the Effect of an Intermediate Electroless Ni-P Layer Prior to PVD Treatment / J. C. Avelar-Batista Wilson [et al.] // Thin Solid Films. – 2012. – Vol. 520. – P. 2922–2931.
4. Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования. Краткий обзор. Часть I. Особенности массопереноса, структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях, их износ- и жаростойкость / В. В. Михайлов [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2013. – Т. 49. – № 5 – С. 21–44.
5. Михайлов, В. В. Особенности электроискрового легирования алюминия и его сплавов / В. В. Михайлов, А. П. Абрамчук // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 2. – С. 36–41.
6. Структурные особенности наноконпозиционных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования / Е. В. Овчинников [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 1. – С. 93–100.
7. Wang, R. J. Structural and interfacial analysis of WC92–Co8 coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition / R. J. Wang, Y. Y. Qian, J. Liu // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 228 (1). – P. 405–409.
8. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications / C. B. Tang [et al.] // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257 (15). – P. 6364–6371.
9. Electric Spark. Allouing of Metal Surfaces / A. E. Gitlevich [et al.]. – Kishinev : Stiintsa, 1985. – 196 p.
10. Gitlevich, A. E. Electrode processes during electrospark alloying – transformations at the cathode / A. E. Gitlevich, A. I. Mikhailyuk, V. V. Mikhailov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 1995. – № 3. – P. 16–32.

References

1. Costa, M. Y. P. An investigation on sliding wear behavior of PVD coatings / M. Y. P. Costa // Tribol. Int. – 2010. – Vol. 43. – P. 2196–2202.
2. Banerjee, D. Synthesis of amorphous carbon nanowalls by DC-PECVD on different substrates and study of its field emission properties / D. Banerjee, S. Mukherjee, K. K. Chattopadhyaya // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – P. 3717–3722.
3. An Investigation into the Tribological Performance of Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings on High Thermal Conductivity Cu-Alloy Substrates and the Effect of an Intermediate Electroless Ni-P Layer Prior to PVD Treatment / J. C. Avelar-Batista Wilson [et al.] // Thin Solid Films. – 2012. – Vol. 520. – P. 2922–2931.
4. Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования. Краткий обзор. Часть I. Особенности массопереноса, структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях, их износ- и жаростойкость / В. В. Михайлов [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2013. – Т. 49. – № 5 – С. 21–44.
5. Mihajlov, V. V. Osobennosti elektroiskrovogo legirovaniya alyuminiya i ego splavov / V. V. Mihajlov, A. P. Abramchuk // Elektronnaya obrabotka materialov. – 1986. – № 2. – С. 36–41.
6. Strukturnye osobennosti nanokompozicionnyh pokrytij, poluchaemyh metodom elektroiskrovogo legirovaniya / E. V. Ovchinnikov [i dr.] // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2020. – № 1. – С. 93–100.
7. Wang, R. J. Structural and interfacial analysis of WC92–Co8 coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition / R. J. Wang, Y. Y. Qian, J. Liu // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 228 (1). – P. 405–409.
8. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications / C. B. Tang [et al.] // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257 (15). – P. 6364–6371.
9. Electric Spark. Allouing of Metal Surfaces / A. E. Gitlevich [et al.]. – Kishinev : Stiintsa, 1985. – 196 p.
10. Gitlevich, A. E. Electrode processes during electrospark alloying – transformations at the cathode / A. E. Gitlevich, A. I. Mikhailyuk, V. V. Mikhailov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 1995. – № 3. – P. 16–32.

Материал поступил в редакцию 01.04.2022

ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ В АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПРЯМОЗУБЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В СОСТАВЕ МНОГОВАЛЬНЫХ ПРИВОДОВ

А. Н. Парфиевич¹, Ю. Н. Саливончик², М. В. Селивоник³

¹ К. т. н., заведующий кафедрой прикладной механики

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: mts7247021@yandex.by

² Старший преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: ynsalivonchik@rambler.ru

³ Преподаватель-стажер кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: smvpsych@gmail.com.

Реферат

В статье рассмотрен нейросетевой подход при мониторинге технического состояния зубчатых колес в составе многовального привода, основанный на синтезе спектрального анализа акустического сигнала и алгоритмов обработки информации искусственными нейросетевыми моделями. Приведены различные варианты классических архитектур нейронных сетей, применяемых для решения задач классификации. Показана достаточно высокая эффективность и точность выявления локального дефекта зубчатого колеса многовального привода при проведении безразборной диагностики.

Ключевые слова: зубчатое колесо, дефект, диагностика, искусственная нейронная сеть, архитектура.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODELS IN ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF STRAIGHT-TOOTHED GEARS AS PART OF MULTI-SHAFT DRIVES

A. N. Parfievich, Yu. N. Salivonchik, M. V. Selivonik

Abstract

The article considers a neural network approach for monitoring of the technical condition of gears as part of a multi-shaft drive, based on the synthesis of spectral analysis of an acoustic signal and algorithms for processing information by artificial neural network models. Various variants of classical architectures of neural networks used to solve classification problems are presented. Sufficiently high efficiency and accuracy of detecting a local defect in a gear wheel of a multi-shaft drive during CIP diagnostics is shown.

Keywords: gear wheel, defect, diagnostics, artificial neural network, architecture.

Введение

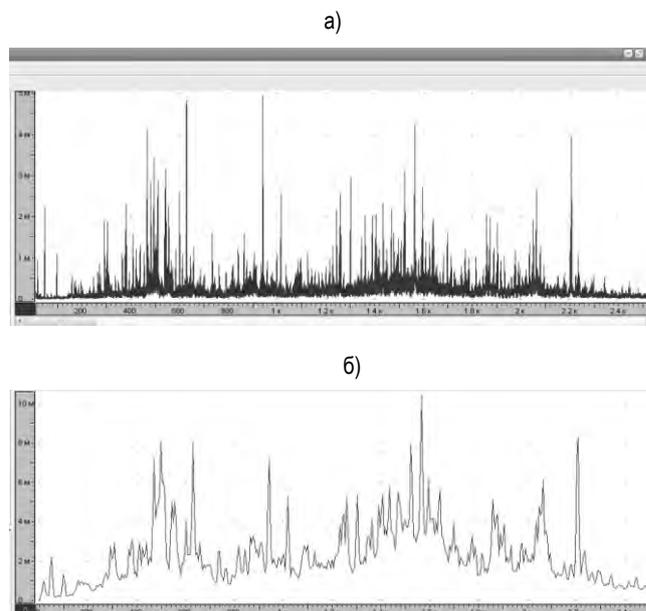
Одной из основных задач при диагностировании многовальных зубчатых приводов в условиях эксплуатации является выделение из общего сигнала информативных составляющих, характеризующих состояние каждого элемента. Необходимость конкретизирования видов неисправностей требует использования более чувствительных характеристик акустических процессов [1]. Один из наиболее простых путей этого вопроса – применение спектрального анализа, математическая основа которого достаточно широко изучена и реализована в системах виброакустического контроля механизмов [2].

Не только зубчатые колеса формируют итоговый анализируемый сигнал, но другие элементы привода, что приводит к получению чрезмерно насыщенных информативными частотами узкополосных спектров. В результате их анализ становится трудноразрешимой проблемой. Исходя из этого, необходимость использования надежных признаков изменения технического состояния элементов зубчатых передач в составе многовального привода является весьма актуальной задачей.

Постановка задачи

Эффективность диагностики и мониторинга текущего состояния исследуемого объекта зависит от числа составляющих анализируемого сигнала, доступных для его измерения и анализа с представлением в виде спектра посредством преобразования Фурье [3]. В наиболее часто применяемых анализаторах разрешение спектра составляет 4000–8000 линий, что приводит к потере некоторых составляющих, которые могут нести важную информацию о техническом состоянии исследуемого объекта. В экспериментальных исследованиях использовался аппаратно-программный комплекс, который позволяет получать спектральные характеристики с количеством линий до 524000 (рисунок 1). Это дает возможность добиться разрешения по оси частот не более 0,1 Гц в частотном диапазоне до 20 кГц. Благодаря высокому динамическому диапазону применяемого оборудования, составляющему более 90 дБ, реально зафик-

сировать мельчайшие по амплитуде частотные составляющие во всех частотных диапазонах.



а – фрагмент спектра акустического сигнала многовального зубчатого привода при использовании окна Ханна и числа линий спектра 524000;
б – фрагмент спектра акустического сигнала многовального зубчатого привода при использовании окна Ханна и числа линий спектра 8000

Рисунок 1 – Фрагменты спектров акустического сигнала многовального зубчатого привода

Если для обработки искусственной нейросетевой модели подать всю информацию, содержащуюся в спектре акустического сигнала, то для нахождения в нем условных связей необходимы мощная вычислительная машина и продолжительный промежуток времени согласно применяемому алгоритму ее обучения. Чтобы избежать этого, предлагаем вычлнить из анализируемого сигнала искомые данные тех составляющих, которые являются следствием работы интересующих элементов диагностируемого привода – зубчатых колес конкретного вала. Как показывают результаты исследований [4, 5, 6], структура колебательного сигнала, фиксируемого с зубчатого привода, всегда имеет определенные компоненты, обусловленные спецификой работы зубчатых передач:

- низкочастотные составляющие, кратные частоте вращения элементов привода f_o :

$$f_{оbi} = \frac{k \cdot n_i}{60}, \quad (1)$$

$$n_i = n_{i-1} \frac{z_{i-1}}{z_i}, \quad (2)$$

где n_i – частота вращения i -го вала;

z_{i-1}, z_i – количество зубьев ведущего колеса предыдущего вала и ведомого колеса i -го вала;

k – коэффициент, равный 1, 2, 3 и т. д.;

- высокочастотные составляющие с частотами пересопряжения зубьев всех зубчатых пар f_z , а также кратные им частоты:

$$f_{zj} = n \cdot f_{оbi} \cdot z_j, \quad (3)$$

где n – коэффициент, равный 1, 2, 3 и т. д.;

- составляющие колебаний с комбинированными частотами:

$$f_k = m \cdot f_z \pm k \cdot f_o \quad (4)$$

для каждого исследуемого колеса привода, возникающие вследствие различного рода модуляций сигнала ($m, k = 1; 1,5; 2$ и т. д.);

- составляющие колебаний, генерируемые подшипниками качения, на частотах:

- перекатывания тел качения по внешней обойме:

$$F_H = f_o \cdot (N_{mk} / 2 - 1,2); \quad (5)$$

- перекатывания тел качения по внутренней обойме:

$$F_B = f_o \cdot (N_{mk} / 2 + 1,2); \quad (6)$$

- сепаратора:

$$F_C = f_o \cdot (1 - 1,2 / N_{mk}); \quad (7)$$

- модулированные составляющие, проявляющиеся на комбинированных частотах:

$$k \cdot F_B \pm m \cdot f_o \text{ и } k \cdot F_H \pm m \cdot f_o, \quad (8)$$

где N_{mk} – количество тел качения в одном ряду подшипника;

f_o – оборотная частота вращения ротора;

D_{mk} – диаметр тела качения;

D_c – средний диаметр сепаратора;

- шумовые компоненты во всем диапазоне частот.

Из приведенной выше информации следует, что для характеристики состояния зубчатого колеса необходимо проанализировать зубцовые частоты f_z , кратные им гармоники $m \cdot f_z$ и комбинированные частоты $m \cdot f_z \pm k \cdot f_o$ в окрестности частоты пересопряжения

зубьев, как наиболее чувствительные к появлению локального дефекта на поверхности зуба.

Объект исследования

В качестве объекта исследования использовался цилиндрический двухступенчатый редуктор (рисунок 2). В качестве диагностического средства использовался аппаратно-программный комплекс, технико-метрологические характеристики которого приведены в [7]. На одном из колес редуктора моделировался локальный дефект рабочей поверхности зуба (рисунок 3). Для создания числового образа каждого состояния (25 %, 50 %, 75 % отсутствия длины зуба и без зуба) проводилось 25 замеров. Результаты, которые были получены при использовании всех серийных колес, были приняты как эталонные.

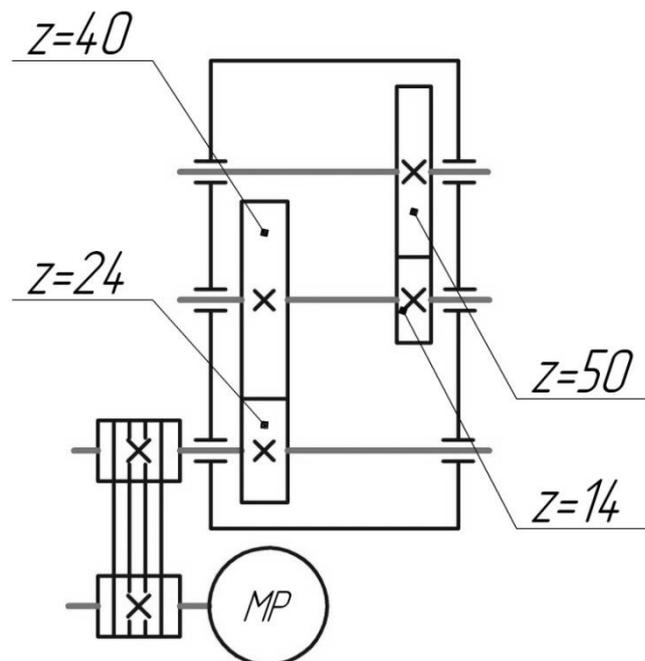


Рисунок 2 – Кинематическая схема цилиндрического двухступенчатого редуктора



Рисунок 3 – Общий вид диагностируемого локального повреждения зуба зубчатого колеса в составе многовального привода

Основная часть

Поскольку искусственные нейронные сети в процессе обучения способны устанавливать сложные зависимости между входными и выходными данными, которые отсутствовали в обучающей выборке, и способны корректно классифицировать образы, полученные с объектов с высокой степенью виброакустической активности всех элементов исследуемой механической системы на основе зубчатых колес, они являются привлекательным инструментом для решения сложных и разнообразных задач классификации.

Представим нейронную сеть для классификации в виде черного ящика, который имеет n входов и m выходов (рисунок 4).

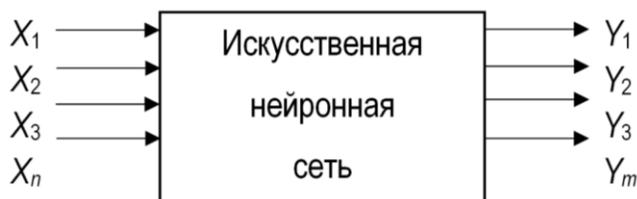


Рисунок 4 – Условное обозначение искусственной нейронной сети для классификации исследуемого состояния зуба

Количество входов нейросетевого классификатора напрямую зависит от анализируемых данных и равняется размеру скользящего окна, а количество выходов – от количества классов анализируемых данных. В рассматриваемой задаче данные были разбиты на 5 классов в зависимости от состояния зуба (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация состояния зуба экспериментальной шестерни $Z = 43$

№ класса	Состояние зуба
1	Без дефектов
2	25 % длины зуба повреждено
3	50 % длины зуба повреждено
4	75 % длины зуба повреждено
5	Скол зуба

Соответственно, количество выходов нейросетевого классификатора равняется 5. Таким образом, пространство выходных значений классификатора можно представить в следующем виде (таблица 2).

Таблица 2 – Пространство выходных значений классификатора

Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Класс
1	0	0	0	0	Без дефектов
0	1	0	0	0	25 % длины зуба повреждено
0	0	1	0	0	50 % длины зуба повреждено
0	0	0	1	0	75 % длины зуба повреждено
0	0	0	0	1	Скол зуба

Существует большое количество разнообразных классических архитектур нейронных сетей, применяемых для решения тех или иных сложных инженерных задач:

- многослойные перцептроны (Multi-Layer Perceptron – MLP) [8, 9, 10] характеризуются прямым распространением входного сигнала от слоя к слою и состоят из множества входных нейронных элементов, из одного или нескольких скрытых слоев нейронных элементов и выходного слоя. Среди главных преимуществ таких сетей назовем возможность решать трудно формализуемые задачи или задачи, для которых алгоритмическое решение неизвестно, но для которых возможно составить репрезентативный набор примеров с известными решениями. MLP при обучении, за счет своего внутреннего строения, устанавливают корреляцию между входными и выходными образами и тем самым обобщают полученный на обучающей выборке опыт;

- нейронные сети с радиально-базисной функцией активации (Radial Basis Function networks – RBF) [8, 9, 10] применяются для решения задач прогнозирования, аппроксимации функций, распознавания образов и т. д.;
- нейронные сети Кохонена позволяют в результате обучения осуществлять топологически непрерывное отображение n -мерного пространства в выходное m -мерное пространство. Структура такой нейронной сети представляет собой сеть с прямым распространением сигнала. В качестве метода обучения для нее используется конкурентное обучение. По мере поступления входных образов на такую сеть при обучении происходит разбиение n -мерного входного пространства на различные области решений, каждой из которых соответствует отдельный нейрон;
- нейронная сеть векторного квантования (Learning Vector Quantization – LVQ) [8, 9, 10] является расширением сети Кохонена и содержит, кроме конкурентного слоя, линейный слой, который осуществляет классификацию кластеров, выделенных слоем Кохонена.

К предлагаемой системе классификации предъявляется ряд жестких требований, одним из которых является функционирование в режиме реального времени. В результате необходимо минимизировать временные затраты, связанные с обучением нейронной сети, а также с ее функционированием. Еще одним немаловажным требованием является размер обучающей выборки. Специфика анализируемых данных не позволяет получить достаточно их большой объем; следовательно, необходимо выбрать такую архитектуру нейронной сети, которая характеризовалась бы малым размером обучающей выборки и, соответственно, минимальным временем обучения.

MLP обучаются при помощи алгоритма обратного распространения ошибки (back-propagation algorithm) [8, 9, 10, 11] и успешно применяются для решения многих сложных задач классификации, распознавания и др. В [8, 9, 10, 11] отмечается, что на способность нейронной сети к корректному обобщению влияют размер обучающей выборки и архитектура нейронной сети.

Для корректного обучения нейронной сети достаточно, чтобы размер обучающей выборки L удовлетворял следующему соотношению [8, 9, 10, 11]:

$$L = O \cdot \left(\frac{W}{\epsilon}\right), \tag{9}$$

где W – общее количество настраиваемых параметров (весовых коэффициентов и пороговых значений);

ϵ – допустимая точность ошибки классификации;

$O(\dots)$ – порядок величины, т. е., например, для ошибки в 5 % количество примеров обучения должно в 5 раз превосходить количество свободных параметров сети W .

Общее количество настраиваемых параметров вычисляется согласно следующему выражению [8, 9, 10, 11]:

$$W = n \cdot m + m \cdot k + m + k, \tag{10}$$

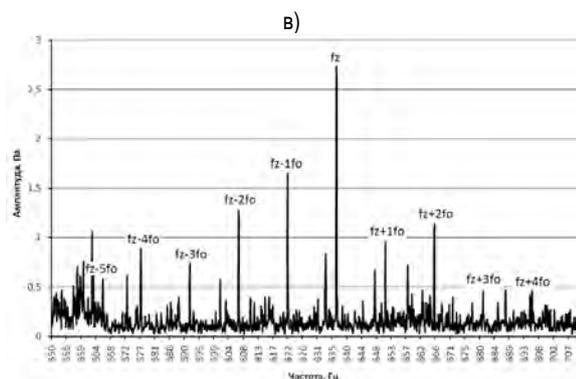
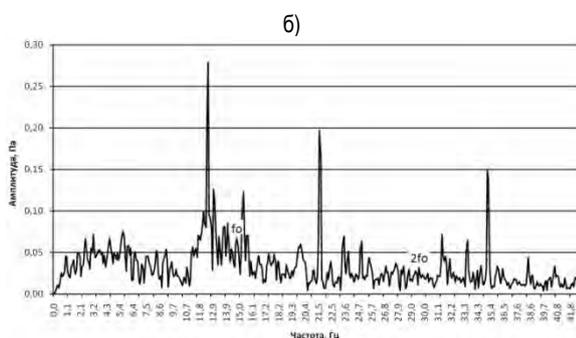
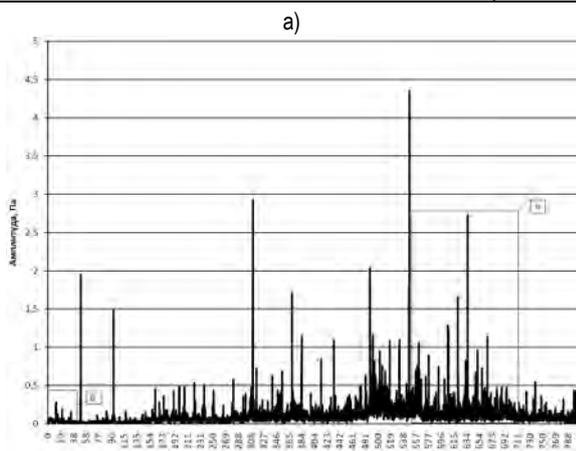
где n – количество входных нейронов;

m – количество скрытых нейронов;

k – количество выходных нейронов.

Рассчитаем размер обучающей выборки для MLP, RBF и LVQ соответственно (при аналогичных параметрах структуры нейронной сети):

1. Количество входных нейронов должно равняться размеру скользящего окна, сформированного на основе функции аппаратно-программного комплекса «Анализ гармоник», – в нашем случае $n = 60$ (рисунок 5).



г)

		Амплитуды гармоник, мкм										
i	оборотной частоты f_{oi}	зубцовой частоты f_{zi}	модулированных боковых полос $f_{z \pm k f_{oi}}$									
			k=-5	k=-4	k=-3	k=-2	k=-1	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
1	0,067	2,73	1,06	0,89	0,74	1,28	1,65	0,96	1,14	0,46	0,46	0,15
2	0,032	0,78	0,58	0,48	1,33	0,88	1,03	0,55	0,14	0,48	0,25	0,07
3	0,017	0,67	0,84	0,13	0,16	0,41	0,22	0,15	0,17	0,72	0,20	0,44
4	0,023	0,06	0,05	0,06	0,06	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09
5	0,028	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,11	0,03	0,02	0,02	0,03

а – фрагмент спектра акустического сигнала исследуемого объекта; б – фрагмент спектра акустического сигнала в области оборотных частот исследуемой шестерни; в – фрагмент спектра акустического сигнала в области частот $(f_z - k \cdot f_0) - (f_z + k \cdot f_0)$ исследуемой шестерни; г – экспериментальные данные, полученные с помощью функции комплекса «Анализ гармоник» для исследуемой шестерни

Рисунок 5 – Спектр акустического сигнала многозубчатого зубчатого привода и результат его обработки программными средствами комплекса «ВИКМА»

2. Количество скрытых нейронов $m = 30$.
3. Количество выходных нейронов $k = 5$, т. е. каждый из выходных нейронов отображает тот или иной класс входного образа согласно таблице 2.

Исходя из этого, в случае применения MLP в качестве классификации, обучающая выборка для обучения нейронной сети с допустимой ошибкой классификации $\epsilon = 0,1$ должна состоять, согласно выражениям (9) и (10), из 19850 образов.

Нейронные сети на основе радиальных базисных функций также являются многослойными нейронными сетями [8, 9, 10, 11]. Первый их слой является входным и обеспечивает связь сети с внешней средой. Второй слой – скрытый, он выполняет нелинейное преобразование входного пространства образов в скрытое пространство, зачастую имеющее существенно более высокую размерность, чем входное. Третий слой – выходной, он состоит из линейных нейронов. В [8, 9, 10] выявлено, что для размерности обучающей выборки L оптимальное количество скрытых нейронных элементов для обеспечения минимальной ошибки обобщения должно быть следующим:

$$m \approx L^{1/3} \quad (11)$$

Соответственно, размерность обучающей выборки равняется

$$L \approx m^3 \quad (12)$$

При $m = 30$ $L \approx 27000$, что не подходит для обучения нейросетевого классификатора.

Рассмотрим обучающийся векторный квантователь (LVQ) [8, 9, 10] с идентичным количеством нейронов в каждом из слоев. В скрытом слое такой сети будем использовать нейронные элементы Кохонена [8, 9, 10, 12]. Для обучения такой сети достаточно, чтобы размер обучающей выборки был равным согласно следующему выражению [8, 9]:

$$L > 2 \cdot m \quad (13)$$

Таким образом, для обучения сети LVQ с нейронами Кохонена в скрытом слое необходимо иметь обучающую выборку с размерностью больше 60 образов.

В результате, основываясь на выдвинутых ранее требованиях к системе классификации, выберем в качестве основы нейросетевого классификатора нейронную сеть векторного квантования LVQ с нейронами Кохонена, которая характеризуется малым объемом обучающейся выборки, что позволит обучить нейросетевой классификатор на ограниченном объеме обучающей выборки.

Рассмотрим структуру предлагаемой нейронной сети для классификации (рисунок 6):

1. Первый слой нейронных элементов предназначен для распределения входных сигналов на нейроны Кохонена скрытого слоя. Размерность входного слоя (количество нейронов во входном слое) определяется размерностью анализируемых данных и равна 60, сформированные на основе функции аппаратно-программного комплекса «Анализ гармоник» (рисунок 5г).
2. Второй слой искусственной нейронной сети состоит из нейронов Кохонена, размерной которого определена экспериментально и в нашем случае равняется 30. Для обучения слоя Кохонена используется конкурентный метод обучения с одним победителем [8, 9, 10].
3. Третий слой состоит из 5 линейных нейронных элементов и осуществляет отображение кластеров, сформированных слоем Кохонена, в 5 классов соответственно.

Из представленных ниже результатов видно, что общая точность классификации разработанного нейросетевого классификатора составляет 92,2 %. Причем точность классификации 1-го класса составила 88,9 %, 2-го, 3-го и 4-го классов – 100 %, а точность классификации 5-го класса – 72,7 % (рисунок 7).

Относительно невысокая точность классификации пятого класса связана со средней квадратичной ошибкой обучения нейронной сети, которая составила 0,00533, т. е. нейронная сеть не смогла обучиться полностью (идеальным является значение средней квадратичной ошибки, равное нулю). Как видно из рисунка 8, в процессе обучения нейронная сеть не смогла корректно научиться классифицировать образы из 5-го класса, где она показала точность классификации, равной 93,3 %, что и отразилось на группировании тестового набора данных. Путем изменения количества нейронов в скрытом слое или увеличением размерности обучающей выборки можно устранить данный недостаток.

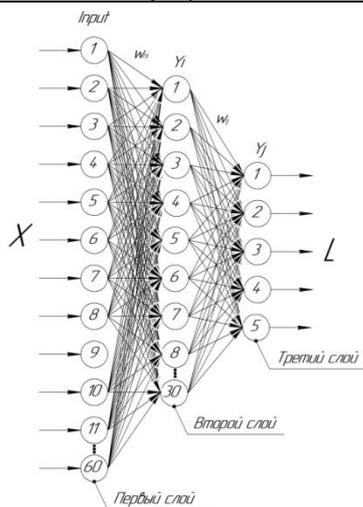


Рисунок 6 – Условное отображение структуры нейронной сети для классификации

Confusion Matrix

	1	2	3	4	5	
1	8 15.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
2	1 2.0%	10 19.6%	0 0.0%	0 0.0%	3 5.9%	71.4%
3	0 0.0%	0 0.0%	11 21.6%	0 0.0%	0 0.0%	100%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 19.6%	0 0.0%	100%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 15.7%	100%
	88.9%	100%	100%	100%	72.7%	92.2%
	11.1%	0.0%	0.0%	0.0%	27.3%	7.8%
	1	2	3	4	5	

Рисунок 7 – Результаты решения задачи классификации

Training Confusion Matrix

	1	2	3	4	5	
1	15 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
2	0 0.0%	15 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 1.3%	93.8%
3	0 0.0%	0 0.0%	15 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	15 20.0%	0 0.0%	100%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	14 18.7%	100%
	100%	100%	100%	100%	93.3%	98.7%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.7%	1.3%
	1	2	3	4	5	

Рисунок 8 – Результаты обучения нейросетевого классификатора

Заключение

Нейросетевой подход в диагностике многозубчатых приводов позволяет сформулировать методику их диагностирования, состоящую из следующих этапов:

- выделение информативных частот и оценка их значимости;
- создание вектора диагностических признаков;
- оценка технического состояния исследуемого объекта на основе применения теории распознавания образов.

Это позволяет минимизировать участие человека в процедуре диагностирования, что позволяет повысить объективность полученных результатов. Несмотря на то, что данный метод требует дополнительных действий, не связанных непосредственно с процессом диагностики: большого объема предварительных исследований, обучения сети на определенных диагностических признаках, определения технологии подготовки данных, – подготовив искусственную нейронную сеть по определенным критериям, ее можно в дальнейшем использовать для

постановки диагноза на других аналогичных объектах, имеющих схожую природу формирования анализируемого сигнала.

Список цитированных источников

1. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Русов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. – Пермь, 2012. – 252 с.
3. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Электронный ресурс] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – Санкт-Петербург : 2014. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm>.
4. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
5. Иванов, В. И. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / В. И. Иванов, И. Э. Власов ; под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 7 : Кн. 1 : Метод акустической эмиссии. – М. : Машиностроение, 2005. – С. 12–341.
6. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / Ф. Я. Балицкий [и др.] ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2005. – Т. 7, кн. 2: Вибродиагностика. – С. 341–820.
7. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем / А. В. Драган [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. – № 4. – С. 17–26.
8. Головки, В. А. Нейросетевые технологии обработки данных : учебное пособие / В. А. Головки, В. В. Краснопрошин. – Минск : БГУ, 2017. – 263 с.
9. Искусственные нейронные сети и искусственные иммунные системы для обнаружения вторжений : моногр. / М. П. Комар [и др.]. – Тернополь : ТНЭУ, 2018. – 192 с.
10. Уоссерман, Ф. Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика / Ф. Уоссерман. – М. : Мир, 1992. – 236 с.
11. Хайкин, С. Нейронные сети / С. Хайкин. – М. : Вильямс, 2006. – 1103 с.
12. Kohonen, T. The self organizing map / T. Kohonen // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 1990. – Vo1. 78. – P. 1464–1480.

References

1. Genkin, M. D. Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov / M. D. Genkin, A. G. Sokolova. – M. : Mashinostroenie, 1987. – 288 s.
2. Rusov, V. A. Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam / V. A. Rusov. – Perm', 2012. – 252 s.
3. Barkov, A. V. Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii [Elektronnyj resurs] / A. V. Barkov, N. A. Barkova, A. Yu. Azovcev. – Sankt-Peterburg : 2014. – Rezhim dostupa: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm>.
4. Nerazrushayushchij kontrol' i diagnostika : spravochnik : v 7 t. / pod obshch. red. V. V. Klyueva. – M. : Mashinostroenie, 2003. – 656 s.
5. Ivanov, V. I. Nerazrushayushchij kontrol' : spravochnik : v 7 t. / V. I. Ivanov, I. E. Vlasov ; pod obshch. red. V. V. Klyueva. – T. 7 : Kn. 1 : Metod akusticheskoy emissii. – M. : Mashinostroenie, 2005. – S. 12–341.
6. Nerazrushayushchij kontrol' : spravochnik : v 7 t. / F. YA. Balickij [i dr.] ; pod obshch. red. V. V. Klyueva. – M. : Mashinostroenie, 2005. – T. 7, kn. 2: Vibrodiagnostika. – С. 341–820.
7. Novye apparatno-programmnye sredstva dlya issledovaniya i diagnostiki mekhanicheskikh sistem / A. V. Dragan [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2006. – № 4. – S. 17–26.
8. Golovko, V. A. Nejrosetevye tekhnologii obrabotki dannyh : uchebnoe posobie / V. A. Golovko, V. V. Krasnoprosin. – Minsk : BGU, 2017. – 263 s.
9. Iskusstvennye nejronnye seti i iskusstvennye immunnye sistemy dlya obnaruzheniya vtorzhenij : monogr. / M. P. Komar [i dr.]. – Ternopol' : TNEU, 2018. – 192 s.
10. Uosserman, F. Nejrokompyuternaya tekhnika. Teoriya i praktika / F. Uosserman. – M. : Mir, 1992. – 236 s.
11. Hajkin, S. Nejronnye seti / S. Hajkin. – M. : Vil'yams, 2006. – 1103 s.
12. Kohonen, T. The self organizing map / T. Kohonen // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 1990. – Vo1. 78. – P. 1464–1480.

Материал поступил в редакцию 01.06.2022

РАСПРАЦОЎКА АЛГАРЫТМУ АНАЛІТЫЧНАГА МЕТАДУ КІНЕМАТЫЧНАГА АНАЛІЗУ ЧАТЫРОХЗВЕННАГА МЕХАНІЗМА ЛАНЦУЖНАГА АГРЭГАТА

У. А. Патапаў¹, С. І. Русан², Л. А. Сівачэнка³, С. У. Болатоў⁴

¹ Старшы выкладчык кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі

Баранавіцкага дзяржаўнага ўніверсітэта, г. Баранавічы, Рэспубліка Беларусь, e-mail: vladimir-potapov-1990@mail.ru

² К. т. н., дацэнт, Баранавіцкага дзяржаўнага ўніверсітэта г. Баранавічы, Рэспубліка Беларусь, e-mail: rusan33@mail.ru

³ Д. т. н., прафесар, прафесар кафедры транспартныя і тэхналагічныя машыны

Беларуска-Расійскага ўніверсітэта, г. Магілёў, Рэспубліка Беларусь, e-mail: 228011@mail.ru

⁴ К. т. н., дацэнт, дэкан электратэхнічнага факультэта Беларуска-Расійскага ўніверсітэта,

г. Магілёў, Рэспубліка Беларусь, e-mail: s.v.bolotov@mail.ru

Рэферат

У артыкуле распрацаваны алгарытм аналітычнага метаду кінематычнага аналізу чатырохзвеннага механізма, які дазваляе з высокай дакладнасцю вызначыць значэнні скорасці і паскарэння яго звенняў у любы момант часу. Чатырохзвеннікі знаходзяць шырокае распаўсюджанне як самастойныя механізмы, так і ў складзе механічных сістэм. Даследуемы тут варыянт механізма плануецца выкарыстаць у якасці прываднага ў ланцужных агрэгатах.

Ключавыя словы: чатырохзвенны механізм, аналітычны метада, кінематычны аналіз, скорасць, паскарэнне, ланцужны агрэгат.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE ANALYTICAL METHOD FOR THE KINEMATIC ANALYSIS OF A FOUR-LINK MECHANISM OF A CHAIN UNIT

V. A. Potapov, S. I. Rusan, L. A. Sivachenko, S. V. Bolotov

Abstract

The algorithm of the analytical method for the kinematic analysis of a four-link mechanism is developed in the article, which makes it possible to determine with high accuracy the values of the speed and acceleration of its links at any time. Four-links mechanisms are widely used both as independent mechanisms and as part of mechanical systems. The variant of the mechanism studied here is planned to be used as a drive in chain units.

Keywords: four-link mechanism, analytical method, kinematic analysis, speed, acceleration, chain unit.

Уступ

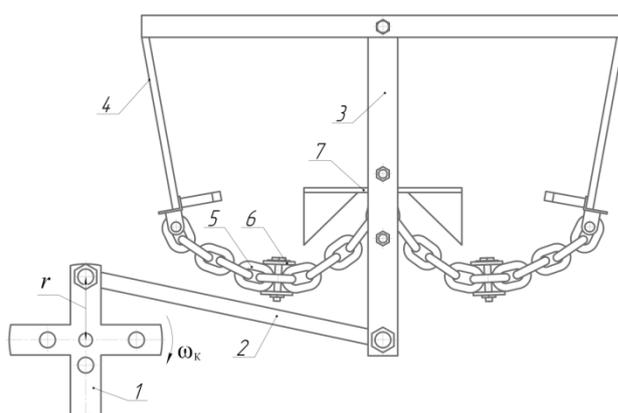
Чатырохзвенныя механізмы, інакш – чатырохзвеннікі, шырока выкарыстоўваюцца ў разнастайных аб'ектах тэхнікі. Таму з'яўляюцца прадметам вывучэння ў падручніках і дапаможніках па тэорыі механізмаў і машын [1–10]. Рух іх звенняў пераважна даследуецца распрацаванымі ў мінулым графічнымі метадамі, недахоп якіх агульнавядомы. У наш час імклівага прагрэсу вылічальнай тэхнікі адкрываецца магчымасць пераходу да больш дакладных аналітычных метадаў вывучэння руху механізмаў, у тым ліку і чатырохзвеннікаў. У прыведзеным тут матэрыяле выкладзена спроба распрацаваць сродкамі тэарэтычнай механікі, аналітычнай геаметрыі і дыферэнцыяльнага вылічэння адпаведны алгарытм. Дадзенае даследаванне ў пэўнай ступені накіравана на рашэнне прыкладной задачы, а менавіта – распрацоўцы алгарытму кінематычнага аналізу чатырохзвеннага механізма ланцужнага агрэгата, што выкарыстоўваецца ў тэхналогіі здрабнення дыскрэтных матэрыялаў.

Функцыяванне прываднага механізма ў ланцужным агрэгате

Апісаны ніжэй чатырохзвеннік з'яўляецца прывадным механізмам у ланцужным агрэгате. Яго схема і рабочыя элементы прадстаўлены на рысунку 1.

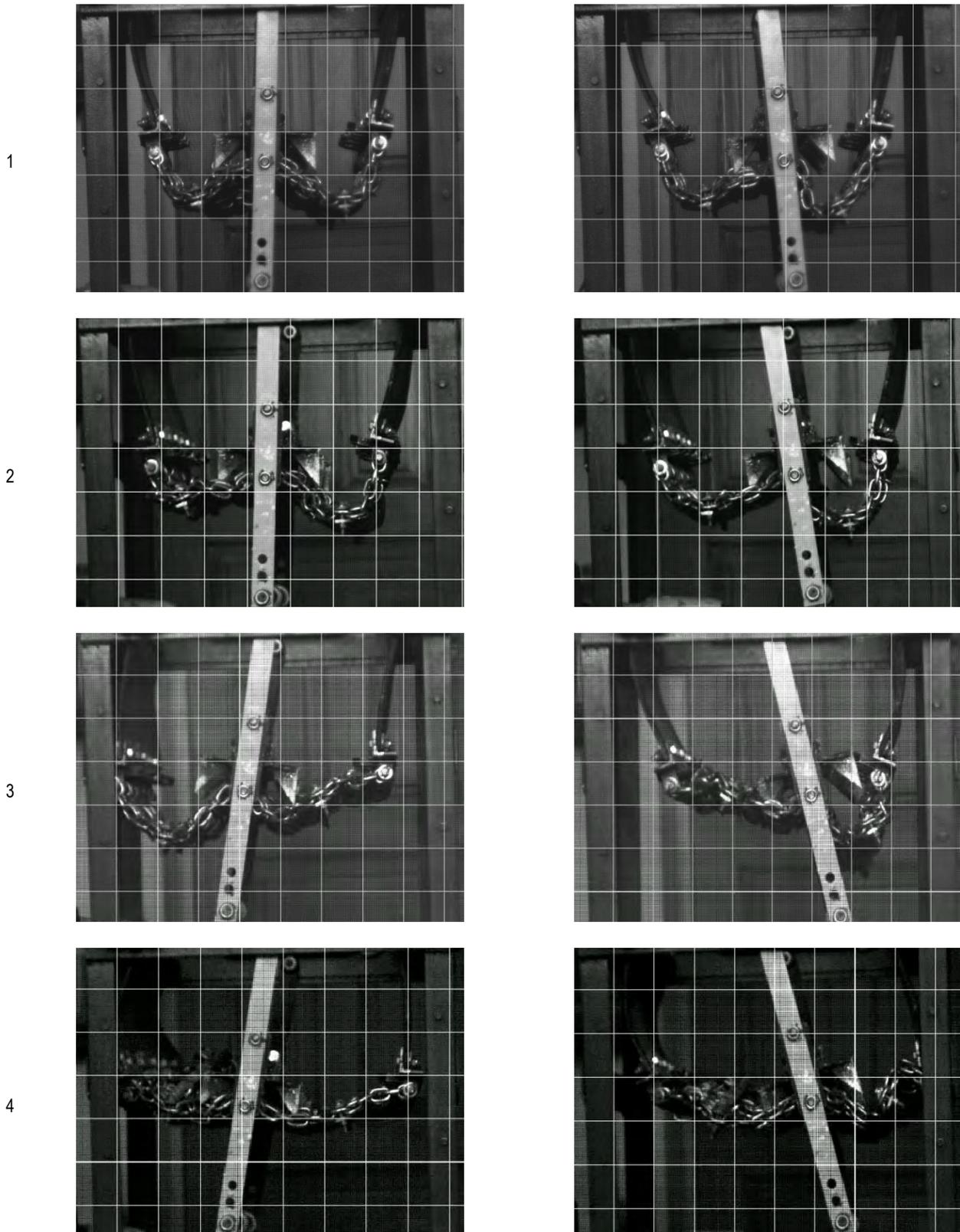
На падставе раней праведзеных даследаванняў якасці перапрацоўкі мелу было ўстаноўлена, што з павелічэннем даўжыні крывашыпа r і яго вуглавой скорасці ω_k (вар'іруемыя параметры) павялічваецца значэнне ступені драбнення і спажыванай магутнасці [11]. Для вывучэння руху была праведзена хуткасная відэаздымка прываднага механізма і рабочых элементаў ланцужнага агрэгата, якая дазволіла візуальна ацаніць формы ненагружаных рабочых элементаў у залежнасці ад вар'іраваных параметраў у крайніх становішчах маятнікавых рычагоў. На рысунку 2 паказаны вынікі

хуткаснай відэаздымкі выходных звенняў – каромысла і рабочыя элементы (ланцужныя палотны, штанга, гнуткія сценкі і здымныя планкі) – пры розных значэннях r і ω_k .



- 1 – крывашып; 2 – шатун; 3 – два каромысла (на рысунку сумяшчаюцца, інакш маятнікавыя рычагі); 4 – гнуткія сценкі; 5 – ланцужныя палотны; 6 – здымныя планкі; 7 – штанга; r – даўжыня крывашыпа; ω_k – вуглавая скорасць крывашыпа

Рысунк 1 – Прывадны механізм і рабочыя элементы ланцужнага агрэгата

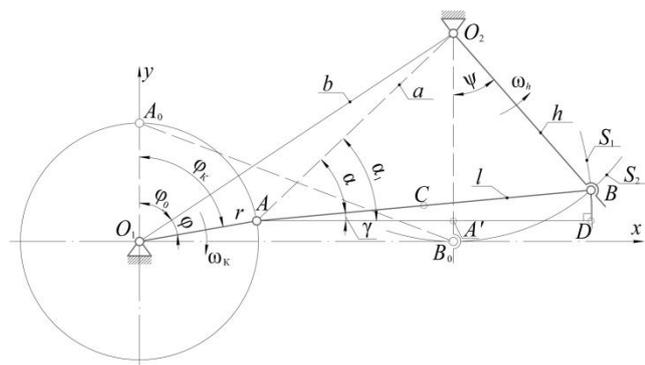


Рисунак 2 – Вынікі хуткаснай відээздымкі пры розных значэннях даўжыні крывашыпа r і яго вуглавой скорасці ω_k (першы рад: $r = 30$ мм, $\omega_k = 31,4$ рад / с; другі рад: $r = 30$ мм, $\omega_k = 62,8$ рад / с; трэці рад: $r = 75$ мм, $\omega_k = 31,4$ рад / с; чацвёрты рад: $r = 75$ мм, $\omega_k = 62,8$ рад / с)

Як бачым, змена ўваходных геаметрычных і кінематычных параметраў прываднога механізма значна ўплывае на характар руху рабочых элементаў, а ў канчатковым выніку і на выходныя тэхналагічныя і энергетычныя параметры ланцужага апрагата [11]. Атрыманы ніжэй алгарытм аналітычнага метаду кінематычнага аналізу прываднога механізма дазволіць дакладна вызначыць абсалютныя і адносныя значэнні скорасці і паскарэння выходных звянняў і адпаведна ацаніць уплыў зададзеных геаметрычных і кінематычных параметраў на іх значэнне.

Распрацоўка алгарытму аналітычнага метаду кінематычнага аналізу чатырохзвеннага механізма

Пры распрацоўцы алгарытму прыем наступную схему прываднога механізма (рысунк 3).



Рысунк 3 – Схема чатырохзвенніка O_1ABO_2 ; ілюстрацыя да вызначэння вуглоў (5)

Ён прадстаўлены ў выглядзе чатырохзвенніка, які складаецца з рухомага звяння – крывашыпа O_1A , шатуна AB , маятнікавага рычага O_2B , і нерухомага – O_1O_2 . Нерухомае звяно ў тэорыі механізмаў і машын называюць стойкай, а маятнікавы рычаг – каромыслам. Абазначым даўжыні звянняў O_1A , AB , O_2B , O_1O_2 адпаведна літарамі r , l , h і b . Пачатак каардынат сумяшчаем з востра вярчэння крывашыпа O_1 . Каардынатную вось O_1x накіроўваем управа па датычнай да траекторыі шарніра B , а вось O_1y – ўверх перпендыкулярна да O_1x . Становішча крывашыпа ў адвольны момант часу t будзем вызначаць вуглом φ_k , які адлічваецца ад восі O_1y па стрэлцы гадзінніка, а яго вугал павароту адносна стойкі O_1O_2 абазначым праз φ . Пачатковае становішча механізма (пры $\varphi_k = 0$) на рысунку 3 паказана пункцірам $O_1A_0B_0O_2$. Вуглавое перамяшчэнне каромысла адносна яго пачатковага становішча абазначым літарай ψ . Далей будзем лічыць, што крывашып верціцца з пастаяннай вуглавой скорасцю ω_k . У даследаванні неабходна пры зададзеных геаметрычных параметрах механізма і ω_k вызначыць кінематычныя характарыстыкі руху яго звянняў. Для гэтага спачатку знойдзем ураўненні іх руху, гэта значыць вуглы павароту і каардынаты цэнтра мас шатуна як функцыі часу t . Ураўненне руху крывашыпа са становішча O_1A_0 прадставім формулай

$$\varphi_k = \varphi_0 + \varphi,$$

дзе $\varphi = \omega_k(t - t_0)$, $t_0 = \varphi_0 / \omega_k$. Каардынаты шарніра A у адвольны момант часу вызначаюцца па формулах:

$$x_A = r \sin \varphi_k; y_A = r \cos \varphi_k.$$

Шатун будзем лічыць аднародным стрыжнем пастаяннага сцяжэння. Яго цэнтр мас знаходзіцца пасярэдзіне даўжыні l у пунце C . Шатун выконвае плоскапаралельны рух, які апісваецца трыма ўраўненнямі: каардынатамі x_C , y_C пункта C і вуглом павароту γ адносна нерухомай восі O_1x . На рысунку 3 лінія AD паралельна да восі O_1x . Як відаць, вугал $\gamma = \alpha_1 - \alpha$. Знаходзім вуглы α і α_1 . У трохвугольніку ABO_2 невядома старана $a = AO_2$. Вызначаем яе па тэарэме косінусаў з трохвугольніка AO_1O_2 :

$a^2 = r^2 + b^2 - 2rb \cos \varphi$, дзе $\varphi = \varphi_k - \varphi_0$. Паводле той жа тэарэмы ў трохвугольніку ABO_2 $h^2 = a^2 + l^2 - 2al \cos \alpha$, адкуль $\cos \alpha = (a^2 + l^2 - h^2) / 2al = f_1$ і $\alpha = \arccos f_1$. У прававугольным трохвугольніку $AA'O_2$ $\operatorname{tg} \alpha_1 = A'O_2 / AA' = \Delta y / \Delta x = f_2$, дзе $\Delta x = x_{O_2} - x_A$, $\Delta y = y_{O_2} - y_A$ (x_{O_2}, y_{O_2} – каардынаты восі O_2). Адсюль $\alpha_1 = \operatorname{arctg} f_2$.

Такім чынам,

$$\gamma = \operatorname{arctg} f_2 - \arccos f_1. \quad (1)$$

Як відаць з рысунка 3,

$$x_C = x_A + l(\cos \gamma) / 2; y_C = y_A + l(\sin \gamma) / 2. \quad (2)$$

Сістэма ўраўненняў (1), (2) апісвае плоскапаралельны рух шатуна.

Становішча пункта B у адвольны момант часу t можна вызначыць графічна шляхам засечак дугамі S_1, S_2 радыусаў l і h з цэнтраў A і O_2 . Для аналітычнага вызначэння яго каардынат запішам сістэму ўраўненняў дзвюх адпаведных дугам S_1, S_2 акружнасцей у параметрычнай форме:

$$x_B = x_A + l \cos \gamma; y_B = y_A + l \sin \gamma; \quad (3)$$

$$x_B = x_{O_2} + h \sin \psi; y_B = y_{O_2} - h \cos \psi. \quad (4)$$

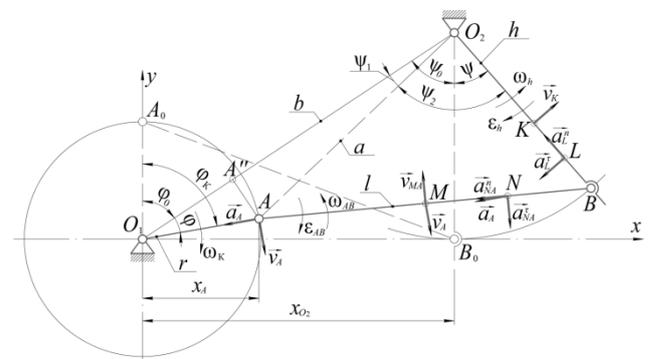
З сістэмы (3), (4) выключаем x_B, y_B ; атрымаем: $x_A + l \cos \gamma = x_{O_2} + h \sin \psi; y_A + l \sin \gamma = y_{O_2} - h \cos \psi$. Адсюль:

$$\sin \psi = (l \cos \gamma - \Delta x) / h = f_3; \cos \psi = (\Delta y - l \sin \gamma) / h = f_4$$

$$\psi = \arcsin f_3; \psi = \arccos f_4. \quad (5)$$

Кожная з формул (5) апісвае вярчальны рух маятнікавага рычага O_2B . Для кантролю разлікаў выкарыстоўваецца вядомая з трыганаметрыі залежнасць: $\sin^2 \psi + \cos^2 \psi = 1$.

Каб павысіць пэўнасць даследавання руху выходнага звяна O_2B з рабочым органам (на рысунку ён не паказаны), пажадана на стадыі распрацоўкі алгарытму ўраўнення (5) прадубліраваць у іншым варыянце. Разгледзім вуглы пры цэнтры O_2 на рысунку 4.



Рысунк 4 – Ілюстрацыя да вываду формулы (6) і кінематычныя характарыстыкі руху звянняў

Відавочна, вугал $\psi = \psi_1 + \psi_2 - \psi_0$. Знойдзем складаемыя ψ_1, ψ_2, ψ_0 . Праводзім адрэзак AA'' , перпендыкулярны да лініі O_1O_2 . У трохвугольніку $AA''O_2$ $\operatorname{tg} \psi_1 = AA'' / A''O_2$,

дзе $AA'' = r \sin \varphi$, $A''O_2 = b - r \cos \varphi$. Тады $tg \psi_1 = (r \sin \varphi) / (b - r \cos \varphi) = f_5$. З трохвугольніка AO_2B вызначаем: $l^2 = a^2 + h^2 - 2ah \cos \psi_2$, адкуль $\cos \psi_2 = (a^2 + h^2 - l^2) / 2ah = f_6$. Пастаянны вугал ψ_0 у трохвугольніку $O_1O_2B_0$ знаходзім па формуле $\psi_0 = \arctg(x_{O_2} / h)$.

Ураўненне руху каромысла прымае від:

$$\psi = \arctg f_5 + \arccos f_6 - \arctg(x_{O_2} / h). \quad (6)$$

Знойдзем вуглавую скорасць ω_{AB} шатуна AB . Ураўненню вярчальнай часткі яго руху (1) адпавядае дзвюхкампанентная формула вуглавой скорасці

$$\omega_{AB} = \omega_{AB1} - \omega_{AB2}. \quad (7)$$

Тут, паводле формулы (1),

$$\omega_{AB1} = \frac{d(\arctg f_2)}{dt} = \frac{d(\arctg f_2)}{df_2} \cdot \frac{df_2}{dt} = (1 + f_2^2)^{-1} \frac{[\Delta x \cdot d(\Delta y) / dt - \Delta y \cdot d(\Delta x) / dt]}{(\Delta x)^2} = \frac{(\Delta x)^2 [(x_{O_2} - r \sin \varphi_K) r \sin \varphi_K \omega_K - (y_{O_2} - r \cos \varphi_K)(-r \cos \varphi_K \omega_K)]}{a^2 (\Delta x)^2},$$

ці

$$\omega_{AB1} = \frac{r \omega_K (x_{O_2} \sin \varphi_K + y_{O_2} \cos \varphi_K - r)}{a^2}. \quad (8)$$

$$\omega_{AB2} = \frac{d(\arccos f_1)}{dt} = \frac{d(\arccos f_1)}{df_1} \cdot \frac{df_1}{dt} = -(1 - f_1^2)^{-\frac{1}{2}} \frac{[2al \cdot d(q^2) / dt - q^2 2l \cdot d(a) / dt]}{4a^2 l^2},$$

дзе $q^2 = a^2 + l^2 - h^2$.

Далей будзем улічваць, што тут

$$(1 - f_1^2)^{-\frac{1}{2}} = 2al(4a^2 l^2 - q^4)^{-\frac{1}{2}};$$

$$d(q^2) / dt = d(a^2) / dt = 2rb \sin \varphi \omega_K;$$

$$d(a) / dt = d(\sqrt{r^2 + b^2 - 2rb \cos \varphi}) / dt = rb \sin \varphi \omega_K / a.$$

Атрымліваем:

$$\omega_{AB2} = \frac{rb \omega_K \sin \varphi (q^2 - 2a^2)}{a^2 \sqrt{4a^2 l^2 - q^4}}. \quad (9)$$

Падстаўляем (8) і (9) у (7); знаходзім:

$$\omega_{AB} = r \omega_K \left\{ \left[\frac{(x_{O_2} \sin \varphi_K + y_{O_2} \cos \varphi_K - r)}{a^2} \right] - \left[\frac{b \sin \varphi (q^2 - 2a^2)}{a^2 \sqrt{4a^2 l^2 - q^4}} \right] \right\}. \quad (10)$$

Лінейную скорасць v_M любога пункта M шатуна (рысунк 4) вылічваем па формуле $\vec{v}_M = \vec{v}_A + \vec{v}_{MA}$, дзе $v_A = \omega_K r$, $v_{MA} = \omega_{AB} \cdot AM$, $\vec{v}_{MA} \perp AM$.

Пераходзім да вызначэння вуглавога паскарэння ε_{AB} шатуна AB . Сыходзім з формулы (7)

$$\varepsilon_{AB} = d\omega_{AB} / dt = d\omega_{AB1} / dt - d\omega_{AB2} / dt, \text{ ці}$$

$$\varepsilon_{AB} = \varepsilon_{AB1} - \varepsilon_{AB2}. \quad (11)$$

Каб вызначыць ε_{AB1} , формулу (8) запішам у выглядзе:

$$\omega_{AB1} = r \omega_K (p / k), \text{ дзе } p = (x_{O_2} \sin \varphi_K + y_{O_2} \cos \varphi_K - r)$$

; $k = a^2$. Тады $\varepsilon_{AB1} = r \omega_K d(p / k) / dt$, ці

$$\varepsilon_{AB1} = \frac{r \omega_K (kp' - pk')}{k^2}. \quad (12)$$

Тут $p' = dp / dt = \omega_K (x_{O_2} \cos \varphi_K - y_{O_2} \sin \varphi_K)$;

$$k' = d(a^2) / dt = 2rb \omega_K \sin \varphi.$$

Формулу (9) прадстаўляем у выглядзе:

$$\omega_{AB2} = br \omega_K [(u / v) \cdot (s / w)], \text{ дзе } u = \sin \varphi; v = a^2;$$

$s = q^2 - 2a^2$; $w = \sqrt{4a^2 l^2 - q^4}$. Знаходзім:

$$\varepsilon_{AB2} = d(\omega_{AB2}) / dt = br \omega_K [(u / v)(s / w)' + (u / v)'(s / w)] = br \omega_K \left\{ [(u / v)(ws' - w's) / w^2] + [(vu' - uv') / v^2] / (s / w) \right\},$$

альбо

$$\varepsilon_{AB2} = br \omega_K \left\{ [u(ws' - w's) / vw^2] + s(vu' - uv') / wv^2 \right\}. \quad (13)$$

У формуле (13) $u' = \cos \varphi \cdot \omega_K$; $v' = 2rb \sin \varphi \omega_K$;

$$s' = -2rb \sin \varphi \omega_K;$$

$$w' = (8l^2 rb \sin \varphi \omega_K - 4q^2 rb \sin \varphi \omega_K) / 2\sqrt{4a^2 l^2 - q^4} =$$

$$= 2rb \omega_K \sin \varphi (2l^2 - q^2) / \sqrt{4a^2 l^2 - q^4}.$$

Па формуле (11) знаходзім:

$$\varepsilon_{AB} = r \omega_K^2 \left\{ (kp'' - pk'') / k^2 - b \left\{ \frac{[u(ws'' - w''s) / vw^2]}{+ s(vu'' - uv'')} / wv^2 \right\} \right\}. \quad (14)$$

Тут множнікі, абазначаныя двума штрыхамі ("'), адрозніваюцца ад выкарыстаных у формулах (12) і (13) адсутнасцю ω_K – у формуле (14) ω_K вынесена за дужкі. Паскарэнне адвольнага пункта N шатуна вылічваецца па формуле

$$\vec{a}_N = \vec{a}_A + \vec{a}_{NA}^n + \vec{a}_{NA}^t, \quad (15)$$

дзе $a_A = r \omega_K^2$, $a_{NA}^n = \omega_{AB}^2 \cdot AN$, $a_{NA}^t = \varepsilon_{AB} \cdot AN$, $\vec{a}_{NA}^n \parallel AN$, $\vec{a}_{NA}^t \perp AN$.

Напрамкі вектароў, падсумаваных у формуле (15), паказаны на рысунку 4.

Для вызначэння вуглавой скорасці ω_h каромысла скарыстаемся ўраўненнем яго руху (6), паводле якога $\psi = \psi_1 + \psi_2 - \psi_0$.

Знаходзім: $\omega_h = d\psi_1 / dt + d\psi_2 / dt + d\psi_0 / dt$. Паколькі $d\psi_0 / dt = 0$, то

$$\omega_h = \omega_{h1} + \omega_{h2}. \quad (16)$$

Тут

$$\omega_{h1} = \frac{d\psi_1}{dt} = \frac{d(\arctg f_5)}{dt} = \frac{d(\arctg f_5)}{df_5} \cdot \frac{df_5}{dt} =$$

$$= (1 + f_5^2)^{-1} \left[\frac{(b - r \cos \varphi) r \cos \varphi \omega_K - (r \sin \varphi) r \sin \varphi \omega_K}{(b - r \cos \varphi)^2} \right]$$

дзе $(1 + f_5^2)^{-1} = (b - r \cos \varphi)^2 / [(b - r \cos \varphi)^2 + (r \sin \varphi)^2]$.

Канчаткова атрымліваем:

$$\omega_{h1} = \frac{r\omega_K(b \cos \varphi - r)}{a^2}.$$

Далей знаходзім:

$$\omega_{h2} = \frac{d\psi_2}{dt} = \frac{d(\arccos f_6)}{dt} = \frac{d(\arccos f_6)}{df_6} \cdot \frac{df_6}{dt} =$$

$$= -(1 - f_6^2)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{2ah \cdot d(q_1^2) / dt - q_1^2 2h \cdot d(a) / dt}{4a^2 h^2} \right]$$

дзе $q_1^2 = a^2 + h^2 - l^2$.

$$d(q_1^2) / dt = d(a^2) / dt = 2rb \sin \varphi \omega_K;$$

$$d(a) / dt = d(\sqrt{r^2 + b^2 - 2rb \cos \varphi}) / dt = rb \sin \varphi \omega_K / a.$$

Атрымліваем:

$$\omega_{h2} = \frac{rb\omega_K \sin \varphi (q_1^2 - 2a^2)}{a^2 \sqrt{4a^2 h^2 - q_1^4}}. \quad (17)$$

Такім чынам, паводле формулы (16) вуглавая скорасць каромысла роўна:

$$\omega_h = r\omega_K \left\{ \left[\frac{b \cos \varphi - r}{a^2} \right] + \left[\frac{b \sin \varphi (q_1^2 - 2a^2)}{a^2 \sqrt{4a^2 h^2 - q_1^4}} \right] \right\}. \quad (18)$$

Скорасць v_K адвольнага пункта K , у тым ліку і рабочага органа, роўна: $v_K = \omega_h \cdot O_2K$; вектар $\vec{v}_K \perp O_2K$.

Шляхам дыферэнцыравання роўнасці (16) знаходзім вуглавое паскарэнне каромысла ў выглядзе сумы:

$$\varepsilon_h = \varepsilon_{h1} + \varepsilon_{h2}. \quad (19)$$

Тут

$$\varepsilon_{h1} = \frac{d\omega_{h1}}{dt} = r\omega_K \frac{d \left[(b \cos \varphi - r) / a^2 \right]}{dt} =$$

$$= r\omega_K \frac{\left[a^2 (-b \sin \varphi \omega_K) - (b \cos \varphi - r) \cdot 2br \sin \varphi \omega_K \right]}{a^4},$$

ці

$$\varepsilon_{h1} = \frac{-br\omega_K^2 \sin \varphi \left[a^2 + 2r(b \cos \varphi - r) \right]}{a^4}. \quad (20)$$

Для вызначэння ε_{h2} структуру формулы (17) прадставім у выглядзе: $\omega_{h2} = br\omega_K [(u_1 / v_1) \cdot (s_1 / w_1)]$, дзе $u_1 = \sin \varphi$;

$$v_1 = a^2; s_1 = q_1^2 - 2a^2; w_1 = \sqrt{4a^2 h^2 - q_1^4}. \text{ Знаходзім:}$$

$$\varepsilon_{h2} = d(\omega_{h2}) / dt = br\omega_K [(u_1 / v_1)(s_1 / w_1)' + (u_1 / v_1)'(s_1 / w_1)] =$$

$$= br\omega_K \left\{ \left[(u_1 / v_1)(w_1 s_1' - w_1' s_1) / w_1^2 \right] + \left[(v_1 u_1' - u_1 v_1') / v_1^2 \right] (s_1 / w_1) \right\},$$

альбо

$$\varepsilon_{h2} = br\omega_K \left\{ [u_1(w_1 s_1' - w_1' s_1) / v_1 w_1^2] + s_1(v_1 u_1' - u_1 v_1') / w_1 v_1^2 \right\}. \quad (21)$$

У формуле (21) $u_1' = \cos \varphi \cdot \omega_K$; $v_1' = 2rbs \sin \varphi \omega_K$; $s_1' = -2rb \sin \varphi \omega_K$;

$$w_1' = (8h^2 rb \sin \varphi \omega_K - 4q_1^2 rb \sin \varphi \omega_K) / 2\sqrt{4a^2 h^2 - q_1^4} =$$

$$= 2rb\omega_K \sin \varphi (2h^2 - q_1^2) / \sqrt{4a^2 h^2 - q_1^4}$$

Падстаўляем (20) і (21) у (19); атрымліваем вуглавое паскарэнне каромысла:

$$\varepsilon_h = br\omega_K^2 \left\{ -\left\{ \sin \varphi \left[a^2 + 2r(b \cos \varphi - r) \right] / a^4 \right\} + \right.$$

$$\left. + \left[u_1(w_1 s_1' - w_1' s_1) / v_1 w_1^2 + s_1(v_1 u_1' - u_1 v_1') / w_1 v_1^2 \right] \right\}. \quad (22)$$

Тут, як і вышэй у формуле (14), множнікі, абазначаныя ('), адрозніваюцца ад адпаведных множнікаў з (') адсутнасцю скорасці ω_K .

Паскарэнне адвольнага пункта L каромысла роўна

$$\vec{a}_L = \vec{a}_L^n + \vec{a}_L^t,$$

дзе $\vec{a}_L^n = \omega_h^2 \cdot O_2L$, $\vec{a}_L^t = \varepsilon_h \cdot O_2L$, $\vec{a}_L^n \parallel O_2L$, $\vec{a}_L^t \perp O_2L$.

Каб прыдаць формулам для вылічэння кінематычных характарыстык руху звенняў абагульнены выгляд, прыйдзем да адносных геаметрычных параметраў $\rho = r / l$ і $\lambda = h / l$. Тады формулы (10), (14), (18), (22) прымуць выгляд:

$$\omega_{AB} = \rho\omega_K \left[\frac{2 \sin \varphi_K \sqrt{\lambda^2 - \eta^2} \sqrt{1 - \rho^2} - 2\eta \eta_1 \sin \varphi - 2\rho \sqrt{\lambda^2 - \eta^2} + 2\lambda^2 \eta_1 \sin \varphi + 2\lambda}{2\sqrt{\lambda^2 - \eta^2}} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\cos \varphi_K \sqrt{\lambda^2 - \eta^2}}{(\lambda^2 - 2\eta + 1)} \right],$$

$$\varepsilon_{AB} = \rho\omega_K^2 \left\{ (k_1 \rho_1' - \rho_1 k_1') / k_1^2 - \right.$$

$$\left. - b_1 \left[u_2(w_2 s_2' - w_2' s_2) / v_2 w_2^2 \right] + s_2(v_2 u_2' - u_2 v_2') / w_2 v_2^2 \right\},$$

$$\omega_h = -\rho\omega_K \frac{2\rho \sqrt{\lambda^2 - \eta^2} + 2\eta_1 \sin \varphi - 2\eta \eta_1 \sin \varphi + 2\eta_1 \sqrt{\lambda^2 - \eta^2} \left(2 \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2 - 1 \right)}{2\sqrt{\lambda^2 - \eta^2} (\lambda^2 - 2\eta + 1)},$$

$$\varepsilon_h = \eta_1 \rho \omega_K^2 \left\{ -\left\{ \sin \varphi \left[a_1^2 + 2\rho(\eta_1 \cos \varphi - \rho) \right] / a_1^4 \right\} + \right.$$

$$\left. + \left[u_3(w_3 s_3' - w_3' s_3) / v_3 w_3^2 + s_3(v_3 u_3' - u_3 v_3') / w_3 v_3^2 \right] \right\},$$

дзе $\eta = \eta_1 \rho \cos \varphi$; $\eta_1 = \sqrt{\lambda^2 - \rho^2 + 1}$;

$$k_1 = \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2; \rho_1 = \sqrt{1 - \rho^2} \sin \varphi_K + \lambda \cos \varphi_K - \rho;$$

$$k_1' = 2\rho \eta_1 \sin \varphi; \rho_1' = \sqrt{1 - \rho^2} \cos \varphi_K - \lambda \sin \varphi_K; u_2 = \sin \varphi;$$

$$w_2 = \sqrt{4 \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2 - \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta + 1 - \lambda^2} \right)^4};$$

$$s_2 = \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta + 1 - \lambda^2} \right)^2 - 2 \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2;$$

$$v_2 = \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2; u'_2 = \cos \varphi;$$

$$w'_2 = \frac{2\rho\eta_1 \sin \varphi \left[2 - \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta + 1 - \lambda^2} \right)^2 \right]}{\sqrt{4 \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2 - \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta + 1 - \lambda^2} \right)^4}};$$

$$s'_2 = -2\rho\eta_1 \sin \varphi; v'_2 = 2\rho\eta_1 \sin \varphi;$$

$$a_1 = \sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta}; u_3 = \sin \varphi;$$

$$w_3 = \sqrt{4 \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2 \lambda^2 - \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta + \lambda^2 - 1} \right)^4};$$

$$s_3 = \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta + \lambda^2 - 1} \right)^2 - 2 \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2;$$

$$v_3 = \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2; u'_3 = \cos \varphi;$$

$$w'_3 = \frac{2\rho\eta_1 \sin \varphi \left[2\lambda^2 - \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta + \lambda^2 - 1} \right)^2 \right]}{\sqrt{4 \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta} \right)^2 \lambda^2 - \left(\sqrt{\rho^2 + \eta_1^2 - 2\eta + \lambda^2 - 1} \right)^4}};$$

$$s'_3 = -2\rho\eta_1 \sin \varphi; v'_3 = 2\rho\eta_1 \sin \varphi.$$

У канструкцыі ланцужнага аграгата, як адзначалася раней, даўжыня крывашыпа r з'яўляецца вар'іруемым параметрам. Згодна з праведзенымі раней даследаваннямі асіметрыі ваганняў выходнага звяна прываднага механізму ланцужнага аграгата устаноўлена, што з павелічэннем адноснага геаметрычнага параметра ρ у дыяпазоне ад 0,1 да 0,5 пры $\lambda = 2/3$ вуглы ваганняў (паварота) каромысла істотна ўзрастаюць і павялічваецца асіметрыя ваганняў маятнікавага рычага (каромысла) [12].

Такім чынам, узнікае неабходнасць прааналізаваць углы змены адноснага геаметрычнага параметру ρ на кінематычныя характарыстыкі чатырохзвеннага механізма. Для гэтага пабудуем графікі ў адносных кінематычных характарыстыках: $\omega_{AB}^\xi = \omega_{AB} / \omega_K$; $\omega_h^\xi = \omega_h / \omega_K$; $\varepsilon_{AB}^\xi = \varepsilon_{AB} / \omega_K^2$; $\varepsilon_h^\xi = \varepsilon_h / \omega_K^2$.

Разлік і пабудову графікаў правядзем пры значэннях $\rho = 0,1$ і $0,5$; $\lambda = 2/3$.



Рысунк 5 – Графік змянення адноснай вуглавой скорасці шатуна ω_{AB}^ξ у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k (пры $\rho = 0,1$)



Рысунк 6 – Графік змянення адноснай вуглавой скорасці шатуна ω_{AB}^ξ у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k (пры $\rho = 0,5$)



Рысунк 7 – Графік змянення адноснай вуглавой скорасці каромысла ω_h^ξ у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k (пры $\rho = 0,1$)

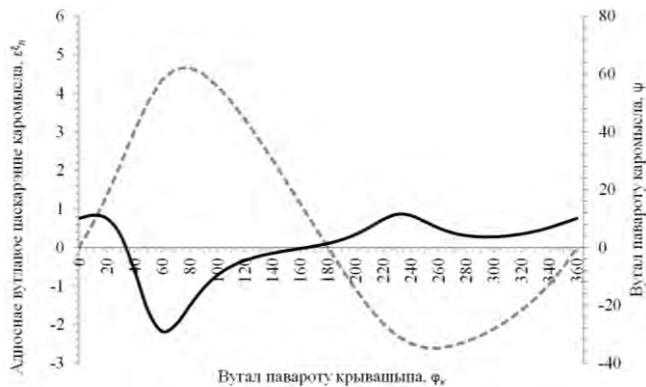


Рысунк 8 – Графік змянення адноснай вуглавой скорасці каромысла ω_h^ξ у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k (пры $\rho = 0,5$)



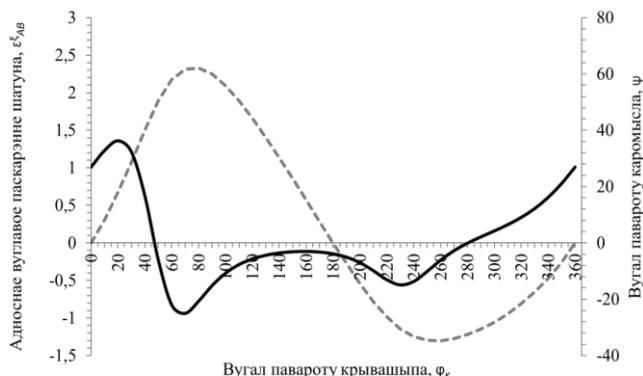
— Адноснае вуглавое паскарэнне шатуна --- Вугал павароту каромысла

Рысунк 9 – Графік змянення адноснага вуглавога паскарэння шатуна ε_{AB}^{ξ} у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k (пры $\rho = 0,1$)



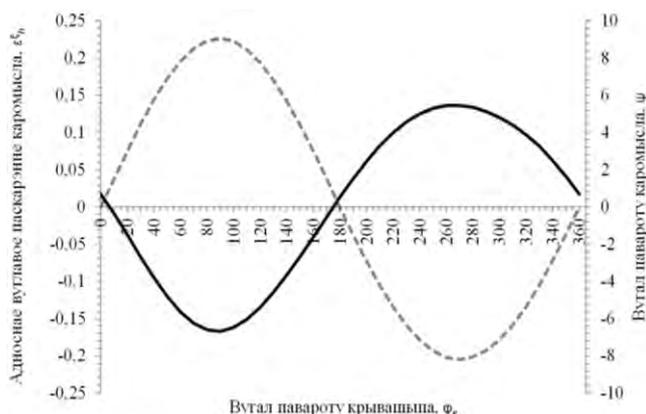
— Адноснае вуглавое паскарэнне каромысла --- Вугал павароту каромысла

Рысунк 12 – Графік змянення адноснага вуглавога паскарэння каромысла ε_h^{ξ} у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k (пры $\rho = 0,5$)



— Адноснае вуглавое паскарэнне шатуна --- Вугал павароту каромысла

Рысунк 10 – Графік змянення адноснага вуглавога паскарэння шатуна ε_{AB}^{ξ} у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k (пры $\rho = 0,5$)



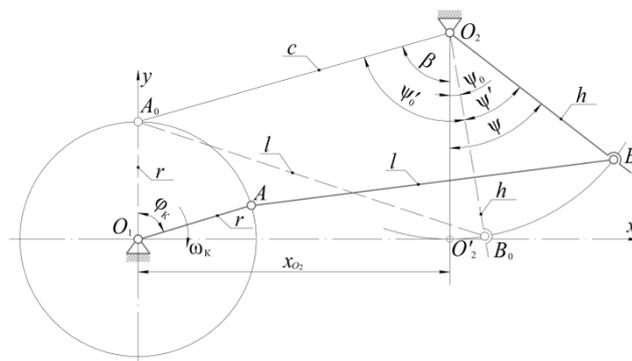
— Адноснае вуглавое паскарэнне каромысла --- Вугал павароту каромысла

Рысунк 11 – Графік змянення адноснага вуглавога паскарэння каромысла ε_h^{ξ} у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k (пры $\rho = 0,1$)

Атрыманыя ў разліках адноснага кінематычныя характарыстыкі руху звенняў і пабудаваныя графікі іх змяненняў дазваляюць уявіць велічыню характарыстык у параўнанні з вядомымі характарыстыкамі руху крывашыпа ω_k і $\omega_k^2 = a_A / r$ (a_A – паскарэнне пункта A). З атрыманых графікаў відаць, што пры павелічэнні параметра ρ значна ўзрастае як асіметрыя перамяшчэнняў звенняў, так і кінематычныя характарыстыкі іх руху. Так, пры $\rho = 0,1$ каэфіцыент асіметрыі η вугла ψ_h роўны $\eta = 0,9$, а пры $\rho = 0,5$ $\eta = 0,56$; пры гэтым абсалютнае значэнне амплітуднага вугла ўзрастае ў 6,88 разоў. Найбольшая вуглавая скорасць ω_h узрасла ад 0,151 да 1,145 (у 7,58 разоў).

Вышэй пры даследаванні чатырохзвенніка меркавалася, што яго рух пачынаецца са становішча, у якім каромысел паралельны да крывашыпа (рысункі 3, 4). Аднак у працэсе даследнага вывучэння тэхналагічных характарыстык ланцужнага агрэгата даводзіцца вар'іраваць геаметрычнымі параметрамі механізма, у прыватнасці, велічыней ρ . Пры гэтым, каб у пачатковым становішчы механізма захоўваць паралельнасць згаданых яго звенняў, даводзіцца перасоўваць (змяняць каардынату x_{O_2}) вось вярчэння каромысла.

На практыцы пры правядзенні даследаў гэтая аперацыя стварае пэўныя нязручнасці. Каб іх пазбегнуць, разгледзім варыянт разліковай схемы механізма, пры якім каромысел у пачатковым становішчы не паралельны да крывашыпа (рысунк 13).



Рысунк 13 – Ілюстрацыя да вызначэння вугла павароту ψ каромысла

У гэтым варыянце схемы механізма да трох яго незалежных геаметрычных параметраў r, l, h дадаецца чварты – x_{O_2} . Цяпер у пачатковым становішчы механізма $O_1A_0B_0O_2$ каромысел O_2B_0 утварае з вертыкаллю $O_2O'_2$ (а, значыць, і з крывашыпам) вугла ψ_0 .

Як відаць на рысунку 13, $\psi_0 = \psi'_0 - \beta$, дзе

$\beta = \arctg(x_{O_2} / (h - r))$. Вугал ψ'_0 знаходзім з трохвугольніка

$A_0B_0O_2$, у якім старана $A_0O_2 = c = \sqrt{x_{O_2}^2 + (h - r)^2}$. Паводле

тэарэмы косінусаў $l^2 = c^2 + h^2 - 2ch \cos \psi'_0$, адкуль

$\cos \psi'_0 = (c^2 + h^2 - l^2) / 2ch = f_7$ і $\psi'_0 = \arccos f_7$.

Цяпер ураўненне руху каромысла прымае від:

$$\psi = \psi_0 + \psi' \quad (23)$$

дзе ψ' – вугал павароту каромысла, што адпавядае каардынаце Φ_K і вылічваецца па формуле (6). Як бачым, новае ўраўненне руху (23) каромысла адрозніваецца ад папярэдняга (6) толькі пастаянным складнікам ψ_0 . Алгарытм вылічэння ω_n , ϵ_n па формуле (23) не змяняецца.

Заклучэнне

У артыкуле выкладзена распрацоўка сродкамі тэарэтычнай механікі, аналітычнай геаметрыі і дыферэнцыяльнага вылічэння аналітычнага метаду кінематычнага аналізу чатырохзвеннага механізма. Аналітычны алгарытм значна спрашчае пошук аптымальнага варыянту руху выходнага звяна з рабочым органам. Вынікі работы могуць быць выкарыстаны не толькі пры праектаванні ланцужных аграгатаў, але і пры праектаванні машын разнастайнага прызначэння, у склад якіх уваходзяць чатырохзвеннікі.

Спіс цытаваных крыніц

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин : учеб. для втузов / И. И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1988. – 640 с.
2. Теория механизмов и механика машин: учеб. для втузов / К. Ф. Фролов [и др.] ; под. ред. К. В. Фролова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1998. – 496 с.
3. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин : учеб. пособие для инж.-техн. спец. вузов / В. К. Акулич [и др.] ; под общ. ред. Г. Н. Девойно. – Минск : Вышэйшая школа, 1986. – 285 с.
4. Кожевников, С. Н. Теория механизмов и машин: учеб. пособие для машин. спец. вузов / С. Н. Кожевников. – 3-е изд., исправ. и доп. – М. : Машиностроение, 1969. – 584 с.
5. Краснов, А. А. Теория механизмов и машин. Кинематический анализ плоских механизмов с низшими кинематическими параметрами: учеб. пособие / А. А. Краснов. – Иваново, 2005. – 153 с.
6. Лачуга, Ю. Ф. Теория механизмов и машин. Кинематика, динамика и расчет: учеб. пособие для вузов / Ю. Ф. Лачуга, А. Н. Воскресенский, М. Ю. Чернов. – М. : Колос-с, 2007. – 304 с.
7. Прикладная механика : теория механизмов и машин : учеб. пособие / А. Д. Бардовский [и др.]. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 96 с.
8. Тимофеев, Г. А. Теория механизмов и машин : учебник и практикум для прикладного бакалавриата / Г. А. Тимофеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2019. – 368 с.
9. Fundamentals of Machine Theory and Mechanisms / Antonio Simon Mata [et al.]. – Malaga : University of Malaga, 2016. – Volume 40. – 409 p.
10. Uicker, John. J. Theory of machines and mechanisms / John. J. Uicker, Gordon.R. Pennock, Joseph. E. Shigley. – New York ; Oxford : Oxford Univ. Press, 2017. – 5th edition. – 977 p.
11. Потапов, В. А. Исследование влияния режимов работы целного агрегата на показатели процесса измельчения мела в технологии производства извести / В. А. Потапов, Л. А. Сиваченко, В. А. Дремук // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. – 2021. – Вып. 9. – С. 37–43.
12. Патапаў, У. А. Даследаванне асіметрыі ваганняў выхаднага звяна прываднага механізма ланцужнага аграгата / У. А. Патапаў, С. І. Русан, Л. А. Сівачэнка // Механіка. Даследаванні і інавацыі. – 2021. – Вып. 14. – С. 167–173.

References

1. Artobolevskij, I. I. Teoriya mekhanizmov i mashin : ucheb. dlya vtuzov / I. I. Artobolevskij. – 4-e izd., pererab. i dop. – M. : Nauka, 1988. – 640 s.
2. Teoriya mekhanizmov i mekhanika mashin: ucheb. dlya vtuzov / K. F. Frolov [i dr.]; pod. red. K. V. Frolova. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Vysshaya shkola, 1998. – 496 s.
3. Kursovoe proektirovanie po teorii mekhanizmov i mashin : ucheb. posobie dlya inzh.-tekhn. spec. vuzov / V. K. Akulich [i dr.]; pod obshch. red. G. N. Devojno. – Minsk : Vyshejschaya shkola, 1986. – 285 s.
4. Kozhevnikov, S. N. Teoriya mekhanizmov i mashin: ucheb. posobie dlya mashin. spec. vuzov / S. N. Kozhevnikov. – 3-e izd., isprav. i dop. – M. : Mashinostroenie, 1969. – 584 s.
5. Krasnov, A. A. Teoriya mekhanizmov i mashin. Kinematicheskij analiz ploskih mekhanizmov s nizshimi kinematicheskimi parami: ucheb. posobie / A. A. Krasnov. – Ivanovo, 2005. – 153 s.
6. Lachuga, Yu. F. Teoriya mekhanizmov i mashin. Kinematika, dinamika i raschet: ucheb. posobie dlya vuzov / Yu. F. Lachuga, A. N. Voskresenskij, M. Yu. Chernov. – M. : Kolos-s, 2007. – 304 s.
7. Prikladnaya mekhanika : teoriya mekhanizmov i mashin : ucheb. posobie / A. D. Bardovskij [i dr.]. – M. : Izd. Dom MISiS, 2015. – 96 s.
8. Timofeev, G. A. Teoriya mekhanizmov i mashin : uchebnik i praktikum dlya prikladnogo bakalavriata / G. A. Timofeev. – 3-e izd., pererab. i dop. – M. : Yurajt, 2019. – 368 s.
9. Fundamentals of Machine Theory and Mechanisms / Antonio Simon Mata [et al.]. – Malaga : University of Malaga, 2016. – Volume 40. – 409 p.
10. Uicker, John. J. Theory of machines and mechanisms / John. J. Uicker, Gordon.R. Pennock, Joseph. E. Shigley. – New York ; Oxford : Oxford Univ. Press, 2017. – 5th edition. – 977 p.
11. Potapov, V. A. Issledovanie vliyaniya rezhimov raboty celnogo agregata na pokazateli processa izmel'cheniya mela v tekhnologii proizvodstva izvesti / V. A. Potapov, L. A. Sivachenko, V. A. Dremuk // Vestn. BarGU. Ser. Tekhnicheskie nauki. – 2021. – Vyp. 9. – S. 37–43.
12. Patapaŭ, U. A. Dasledavanne asimetrii vagannyaŭ vyhadnaga zv'yana pryvadnaga mekhanizma lancuzhnaga agregata / U. A. Patapaŭ, S. I. Rusan, L. A. Sivachenka // Mekhanika. Dasledavanni i inavacyi. – 2021. – Vyp. 14. – S. 167–173.

Материал поступил в редакцию 06.05.2022

ТЕХНОЛОГИЯ ГЛУБОКОГО РЫХЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПЛУГА-ГЛУБОКОРЫХЛИТЕЛЯ ГР-70

С. В. Савчук¹, С. В. Монтик², А. Н. Парфиевич³

¹ К. т. н., доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: sergeyskb@tut.by

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения и эксплуатации автомобилей
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: svmontik@mail.ru

³ К. т. н., заведующий кафедрой прикладной механики
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: mts7247021@yandex.by

Реферат

В статье рассмотрены особенности технологии глубокого рыхления почвы на примере плуга-глубокорыхлителя модели ГР-70 и его конструктивные особенности, обеспечивающие выполнение данной операции в соответствии с агротехническими требованиями.

Ключевые слова: глубокое рыхление, почва, особенности технологии, конструктивные особенности.

TECHNOLOGY OF DEEP LOOSENING ON THE EXAMPLE OF A DEEP-DIGGING PLOW MODEL GR-70

S. V. Savchuk, S. V. Montik, A. N. Parfievich

Abstract

The article discusses the features of the technology of deep loosening of the soil on the example of a deep-digging plow model GR-70 and its design features that ensure the performance of this operation in accordance with agrotechnical requirements.

Keywords: deep loosening, soil, technology features, design features.

Введение

В последние годы в агротехнологиях реализуются новые современные высокопроизводительные методы и приемы, позволяющие достичь высоких скоростей при подготовке почвы и максимально уменьшить время проведения посевных работ. Для достижения этих целей различными производителями активно разрабатываются и внедряются в производство энергонасыщенные тяговые средства, широкозахватные машины, комбинированные агрегаты, позволяющие за один проход машины выполнить несколько различных операций и достичь максимального эффекта при минимальных потерях времени. Однако созданные современные машины для достижения ими заявленных характеристик зачастую обладают более высокой массой. Таким образом, при работе современных машин имеющаяся масса воздействует на почву, способствуя ее уплотнению и приводя в конечном итоге к переуплотнению пахотного и подпахотного горизонта, причем глубина уплотнения подпахотного горизонта может в некоторых случаях достигать более 1 м. Данная проблема является наиболее актуальной для суглинистых, глинистых почв и черноземов.

Стоит заметить, что плужная подошва, которая образуется при неумеренном использовании классического отвального плуга, в итоге препятствует проникновению осадков в глубжележащие слои почвы, а также процессу испарения излишков влаги из нижележащих горизонтов. В начальный период после выпадения осадков земля слишком сильно увлажняется и долго не высыхает, что мешает началу проведения весенних полевых работ, из-за чего провести сев в оптимальные сроки уже не представляется возможным. После проведения посева имеющиеся остатки воды быстро впитываются растениями и испаряются. При этом возникает следующая проблема: корневая система высаженных растений не может прорасти через плотную плужную подошву и вынуждена располагаться в верхнем слое. Как результат – уже в июне растения испытывают нехватку влаги. Кроме этого, стоит отметить, что переуплотнение особенно опасно на склоновых землях. В условиях склоновых земель возникает водная эрозия, результатом которой является перенос верхнего, самого плодородного слоя почвы со склоновых участков, что ведет к снижению плодородия почвы. Если мы имеем дело с равнинными землями, то здесь могут проявиться так называемые «блюдца», в которых застаивается влага после выпадения обильных осадков. В итоге все это приводит к увеличению эрозионных процессов и общей деградации плодородного гумусного слоя почвы.

Постановка задачи

Одним из способов решения возникающей проблемы является разуплотнение почвы. Глубоким рыхлением называется обработка почвы без оборота пласта с сохранением на поверхности поля мульчи: частей корневой системы и растительных остатков. Такой вид обработки наиболее распространен при обработке для зон, имеющих риск ветровой или водной эрозии.

Операция глубокого рыхления способствует разбиванию плотных пластов подпахотного горизонта и делает землю более рыхлой. Как результат, влага проникает в более глубокие слои и сохраняется там, корневая система растений становится более разветвленной и погружается глубже к увлажненным местам, где в оптимальной мере напитывается водой, а это напрямую ведет к увеличению урожайности высеваемых культур.

В современных условиях развития науки и техники наиболее эффективным представляется разуплотнение почвы посредством рыхления рабочими органами на глубину 0,5–0,7 м с помощью глубокорыхлителей-щелевателей. Следует отметить, что рыхление без оборота пласта также является неотъемлемым элементом при минимальной обработке почвы.

В условиях Республики Беларусь операцию глубокого рыхления наиболее целесообразно проводить осенью. Вкупе с операцией снегозадержания в зимний период на поле скапливается большое количество снега, который весной растает и обильно пропитает разрыхленный подпахотный горизонт. Этот прием будет способствовать ускоренному сходу снега с поля и позволит начать весенние полевые работы в оптимальные агротехнические сроки, в итоге урожайность растений будет выше. Глубокорыхлители возможно применять при любой технологии возделывания культур – от традиционной отвальной системы земледелия до нулевой.

В весенний период использование технологии обработки почвы с помощью глубокорыхлителя также может быть оправдано, однако в этот период наиболее целесообразно использовать данное орудие в сочетании с опорным прикатывающим катком. Применение прикатывающего катка позволяет уменьшить гребнистость после выполнения операции глубокого рыхления, сформировать структуру поверхностного слоя, наиболее подходящую для скорой дальнейшей предпосевной обработки и посева в сжатые агротехнические сроки. Тип прикатывающего катка также имеет значение и может устанавливаться на изделие в зависимости от заданных агротехнических требований.

Прикатывающие катки могут быть трубчатыми, планчатыми, зубчатыми, вальцевыми и другими и выбираются для комплектации, исходя из типа почвы, ее структурного состава, заданных показателей плотности, комковатости, гребнистости и других агротехнических требований к параметрам почвы после операции почвообработки.

На фактор выбора глубокорыхлителя влияют многие факторы, основными из них являются:

- глубина расположения уплотнения в почве;
- тип почвы на возделываемом поле;
- тип возделываемой культуры;
- тип рабочего органа глубокорыхлителя.

Так, в зависимости от глубины расположения уплотненного горизонта и высеваемой культуры, необходимо определить глубину обработки. При этом стоит учитывать, что неоправданное увеличение глубины обработки ведет к повышенным материальным затратам, выражающихся в уменьшении производительности и увеличении расхода топлива, что в итоге влияет на конечную стоимость выращенной продукции. Например, для растений, имеющих неглубокое расположение корневой системы (пшеница, ячмень, рожь, овес, соя), операцию глубокого рыхления достаточно проводить на глубину до 35–50 см. Если предстоит проводить сев пропашных культур (подсолнечник, кукуруза, свекла), глубину предпосевной обработки можно увеличить до 70 см.

Не менее важным является правильное определение типа почвы. На средних по механическому составу почвах, не засоренных камнями, нагрузки на рабочие органы не будут иметь больших значений, и конструкция таких глубокорыхлителей будет иметь более низкую стоимость. При обработке тяжелых по своему составу почв, или при наличии в почве камней, необходима качественная защита используемого рабочего органа. Как правило, она реализуется двумя конструкторскими решениями:

1. Защита срезным болтом реализуется при возникновении нагрузки выше предельной, что приводит к его разрыву, который является предохранителем перед более серьезной и финансово затратной поломкой. В этом случае нужно прекратить рабочее движение, вернуть рабочий орган в первоначальное положение и повторно зафиксировать его аналогичным срезным болтом, после чего продолжить выполнение агротехнического процесса по появлению следующего препятствия и возникновения очередной поломки.
2. Рессорная защита срабатывает при наезде на препятствие. В этом случае стойка отклоняется назад и вверх, происходит преодоление препятствия, после чего рабочий процесс обработки почвы возобновляется, потери производительности труда за счет остановки машины не происходит. Конструкция глубокорыхлителя при этом несколько усложняется, но за счет очевидных преимуществ является оправданной. Выбор типа и формы рабочего органа является достаточно важным, агротехнически обоснованным решением, от которого зависит качество рыхления почвы, в зависимости от глубины обработки, а также тяговое сопротивление, напрямую влияющее на скорость технологической операции, мощность тягового средства и металлоемкость конструкции глубокорыхлителя (запас прочности рамных конструкций).

Основная часть

Качество технологического процесса, проводимого глубокорыхлителем, оценивают на основании выполнения следующих показателей:

- стабильность поддержания глубины при обработке;
 - подрезка корней сорняков;
 - сбережение стерни.
- Агротехнические требования при выполнении данной операции:
- отклонение от глубины не должно быть больше $\pm 3 - 4$ см;
 - высота гребней для обработки должна составлять не более 5 см;
 - заделка сорняков, остатков растений, удобрений должна быть не меньше 95%;
 - уровень сохранения стерни должен составлять 80–85 %;
 - недопустимо создавать заделанные разъемные борозды, необработанные полосы на поворотах, огрехи, необработанные свальные гребни.

При выборе конструктивного исполнения глубокорыхлителя основными критериями могут являться:

- класс тягового средства, с которым будет агрегатироваться глубокорыхлитель (мощность трактора);
- тип соединения с тяговым средством (прицепной, полуприцепной, навесной);
- рабочая ширина захвата машины;
- масса и габаритные размеры;
- количество рабочих органов;
- глубина обработки;
- рабочая скорость и производительность;
- стоимость машины;
- производитель.

Среди технических средств для глубокого рыхления на рынке широко представлены глубокорыхлители компаний John Deere, «Great Plains» Wil-Rich (США), «Kvemeland», «Horsch», «Amazon» (Германия), Hatzenbichler (Австрия), Gregoire Besson (Франция), Gaspardo (Италия), ОАО «Брестский электромеханический завод» и др.

Одним из представителей машин данного направления представляется конструкция плуга – глубокорыхлителя ГР-70 производства Брестского электромеханического завода (таблица 1) [1].

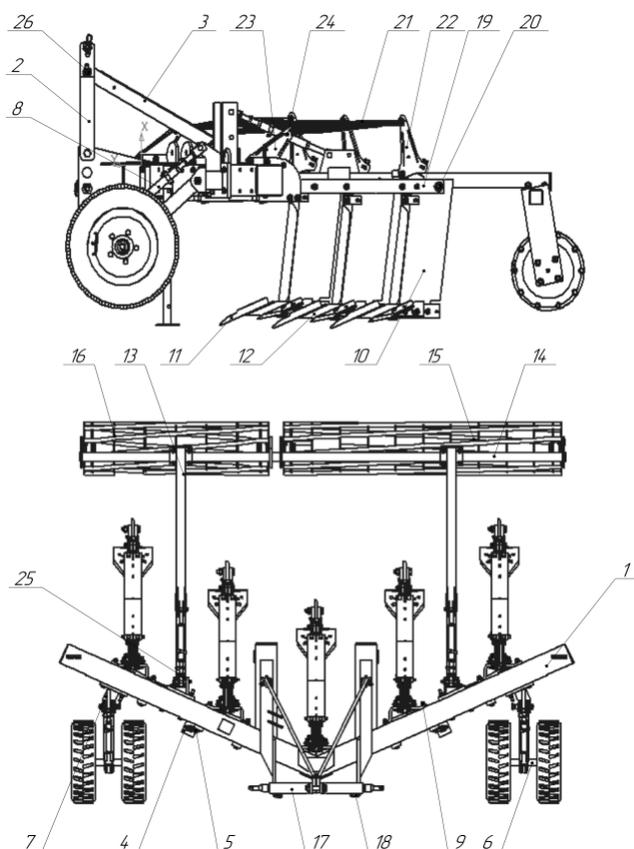
Таблица 1 – Основные технические параметры плуга-глубокорыхлителя [1]

Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя	
		без опорных колес	с опорными колесами
Тип		навесной	полунавесной
Характеристика рабочих органов		лапа стрельчатая	лапа стрельчатая
Производительность основного времени	га	3,4–5,2	3,4–5,2
Количество стрельчатых лап	шт.	5	5
Рабочая скорость	км/ч	8–12	8–12
Рабочая ширина захвата	м	4,3 ± 0,2	4,3 ± 0,2
Масса плуга, не более (без катков)	кг	1900	2100
Глубина обработки почвы	см	25–70	25–70
Расстояние между стойками, не более	см	82	82
Габаритные размеры, не более:			
– ширина	мм	3500	3700
– длина	мм	4500	4500
– высота	мм	1500	1500
Опорные колеса	шт	–	4
Удельный расход топлива за час сменного времени, не более	л/ч	12,0	12,0
Срок службы	лет	8	8

Данный плуг агрегируется с тракторами класса 5 «Беларус» (2522, 3022,3522), John Deere 8420, 8430 и другими тракторами, имеющими аналогичные тяговые характеристики и присоединительные размеры. Плуг предназначен для основной безотвальной обработки почвы, глубокого рыхления почвы, увеличения глубины пахотного слоя, разуплотнения и вентиляции нижних слоев почвы и может работать на всех типах дерново-подзолистых почв с уклоном поверхности до 8°, вид климатического исполнения У1 по ГОСТ 15150.

Плуг-глубокорыхлитель ГР-70 (рисунок 1) состоит из двух рам: V-образной рамы 1 и прицепной рамы 2, которая прикрепляется к V-образной раме двумя держателями 3 изготовленных в виде изогнутых толстостенных пластин, двух опор 4 с держателями 5, двух колесных опор 6 с кронштейнами 7 и тапрепами 8. На V-образную раму 1 устанавливаются кронштейны 9, на которых зафиксированы пластины 10 с ножами 11 и 12. Рама 14 крепится с помощью держателей 25, труб 13. На данной раме установлены прикатывающие катки 15 и 16. На прицепной раме 2 установлена ось 17 с прихватами 18 для подсоединения к трактору. С помощью держателей 19 и болтов 20 пластины 10 с кронштейнами 9 крепятся к V-образной раме 1.

Рессоры 21 с помощью осей 24 закреплены на держателях 22, 23, а держатели 22, 23 с помощью держателей 25 и болтов 26 прикрепляются к пластинам 10.



1 – V-образная рама; 2 – прицепная рама; 3 – держатель; 4 – опора; 5 – держатель; 6 – опора колесная; 7 – кронштейн; 8 – талреп; 9 – кронштейн; 10 – пластина; 11 – нож; 12 – нож; 13 – держатель; 14 – труба; 15 – каток; 16 – каток; 17 – ось; 18 – прихват; 19 – держатель; 20 – болт; 21 – рессора; 22 – держатель; 23 – держатель; 24 – ось; 25 – держатель; 26 – болт [1]

Рисунок 1 – Общий вид глубокорыхлителя

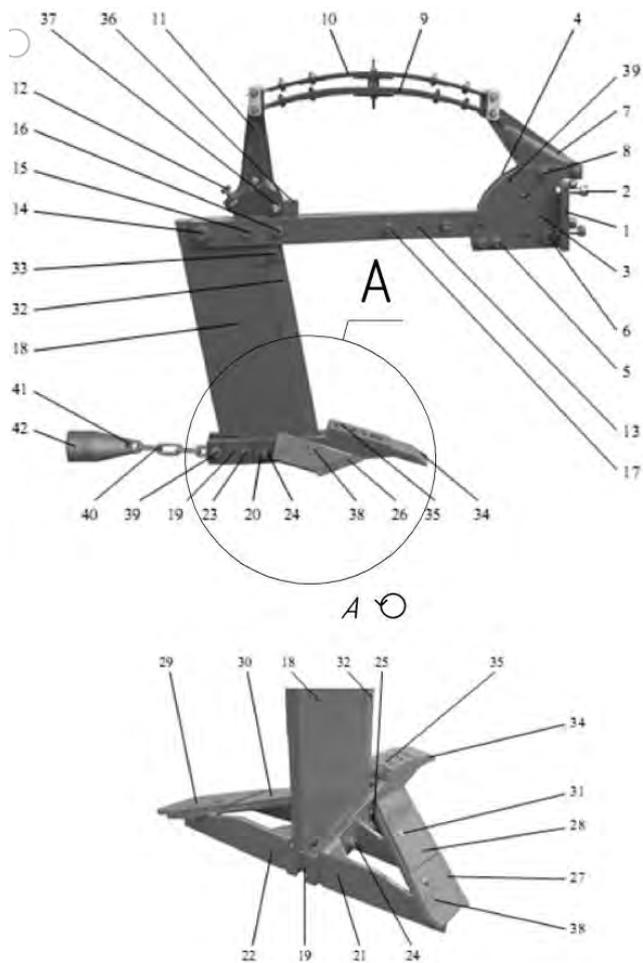
На рисунке 2 подробно показано устройство узла рыхлительного органа, состоящего из кронштейна 3, устанавливаемого с помощью базовой пластины 1 и болтов 2 на несущую раму глубокорыхлителя, далее на данный кронштейн монтируется держатели 13 (левый и правый), на которые устанавливается непосредственно узел рыхления, состоящий из пластины 18, спереди которой устанавливается продольный режущий нож 32 и держатель 19, кронштейн 20, служащие местом крепления центрального ножа 34 боковых ножей 26 или 27, 28 (в зависимости от предпочтений потребителя по ширине рыхления стойки). Также в качестве дополнительной опции может устанавливаться дренажный клин 42 для формирования системы водоотвода. Рабочее давление на рабочий орган достигается с помощью рессор 9 и 10, устанавливаемых на продольные пластины 13 с помощью держателей 7 и 11, выполненных из высокопрочной стали. Регулировка давления рессор осуществляется с помощью регулировочного борта 12, вращением которого устанавливается заданное агрономом давление для почвообработки.

Прицепная рама (рисунок 3) состоит из основной рамы 1, раскоса 2, осей 3 и 4, навески 6 с осью 5, оси 7, с помощью которой глубокорыхлитель монтируется на тяговое средство, фиксатор 8 предотвращает смещение оси 7 относительно изделия.

Колесные опоры (рисунок 4) состоят из колес 7, установленных на опорах 2, с помощью кронштейнов 1, соединяемых с основной рамой. Регулировка положения колес производится с помощью талрепов 4, зафиксированных в данном узле с помощью осей 3 и 5.

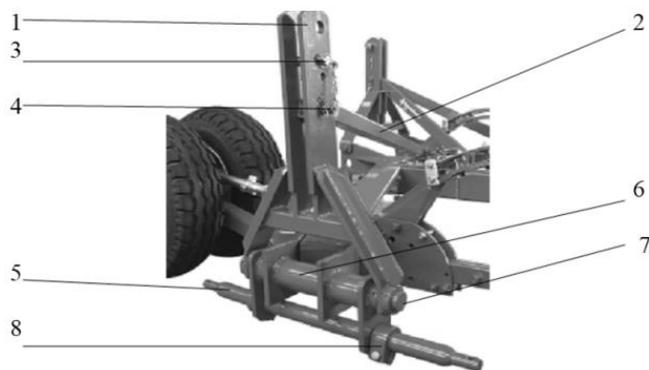
Прикатывающий каток (рисунок 5) монтируется на V-образную раму с помощью пластин 1, на которые механическим способом

с помощью болтов 3, 4, 5 устанавливаются держатели 2, далее к ним с помощью болтов 13, пластин 15 и гаек 13 закрепляется труба 10, на которой через пластину 12 фиксируется прикатывающий каток, вращающийся на подшипниковом узле 11.



1 – пластина; 2 – болт; 3 – кронштейн; 4 – боковая пластина; 5 – болт опорный; 6 – болт; 7 – кронштейн; 8 – болт; 9 – рессора основная; 10 – рессора дополнительная; 11 – кронштейн; 12 – болт регулировочный; 13 – держатель; 14, 15, 16, 17 – болт; 18 – пластина; 19 – держатель; 20 – кронштейн; 21 – пластина правая; 22 – пластина левая; 23, 24 – болт; 25 – болт; 26 – нож боковой (серийное исполнение); 27 – нож боковой дополнительный (по заказу); 28 – нож боковой дополнительный (по заказу); 29, 30, 31 – болт; 32 – нож; 33 – болт; 34 – нож основной; 35 – болт; 36 – пластина; 37, 38, 39 – болт; 40 – цепь; 41 – проушина; 42 – клин дренажный [2]

Рисунок 2 – Рабочий орган глубокорыхлителя



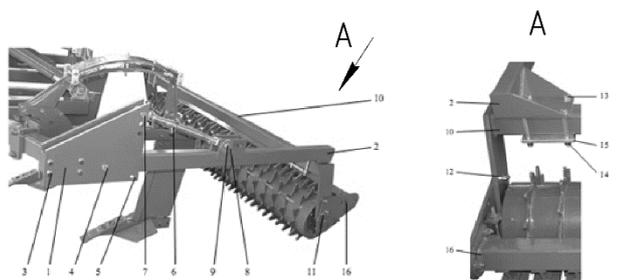
1 – рама; 2 – раскос; 3 – ось; 4 – ось; 5 – ось навески; 6 – навеска; 7 – ось; 8 – фиксатор [2]

Рисунок 3 – Общий вид прицепной рамы



1 – кронштейн; 2 – опора; 3 – ось;
4 – талреп; 5 – ось; 6 – болт; 7 – колесо [2]

Рисунок 4 – Общий вид колесных опор



1 – пластина; 2 – держатель; 3, 4, 5 – болт; 6 – талреп; 7, 8 – ось;
9 – шайба; 10 – труба; 11 – узел подшипниковый; 12 – пластина;
13 – болт; 14 – гайка; 15 – пластина; 16 – труба [2]

Рисунок 5 – Общий вид прикатывающего катка

Подготовка изделия к работе осуществляется следующим образом.

В первую очередь необходимо произвести регулировку глубины рыхления почвы стойками с ножами, для чего необходимо подсортировать плуг к трактору с помощью прицепной рамы 2, при этом прихваты 18 на оси 17 (рисунок 1) должны быть затянуты болтами от продольного перемещения по оси; расположить плуг на ровной площадке, опустив опоры 4 (рисунок 1) до упора; произвести регулировку колесных опор 6 (рисунок 1) с помощью талрепов 8, подняв колеса на расстояние от опоры (нижней поверхности ножей стоек 10), равное глубине рыхления почвы. Для вспаханных полей это расстояние рекомендуется увеличить примерно на 2–5 см; далее производится регулировка прикатывающих катков 15, 16, расположенных на раме 14 (рисунок 1) через талрепы 7 (рисунок 6) на расстояние, равное от нижней трубы катка до нижней поверхности шин колесных опор. Комплектация глубокорыхлителя передними опорными катками позволяет наиболее точно произвести регулировку заглужения рабочих органов. Фактически они являются опорной базой, относительно которой производится настройка рабочих параметров. Далее при осуществлении рабочего процесса, глубокорыхлитель опирается на передние опорные колеса. Данные колеса копируют рельеф поверхности, и рабочие органы производят рыхление подплужного горизонта на одинаково заданной глубине. При отсутствии передних опорных колес функция поддержания заданной глубины обработки переходит на заднюю навеску тягового средства. Как правило, в тяговом средстве используется задняя трехточечная навеска, соединяемая с прицепной рамой (рисунок 4). В этом случае поддержание глубокорыхлителя при осуществлении технологического процесса осуществляется через силовые гидроцилиндры, управляющие задней навеской. Данный способ имеет свои достоинства, так как при этом часть веса глубокорыхлителя переносится на заднюю навеску тягового средства и происходит догрузка задней оси трактора, увеличиваются его сцепные свойства.

После установки глубины обработки через опорные колеса необходимо установить требуемые характеристики давления рессорных пластин. В зависимости от плотности почвы, наличия камней, рабочей скорости давление рессорных пластин устанавливается с помощью упорных болтов, расположенных в кронштейнах 22, производится регулировка рессорных пластин 21 (рисунок 1).

Рабочий процесс разуплотнения почвы предполагает использование совместно с данным плугом трактора мощностью от 250 л. с.,

исходя из минимальной потребляемой мощности 50 л.с. на одну рыхлительную лапу.

Обкатка плуга производится в следующей последовательности:

1. Осуществляется поднятие опор 4 (см. рисунок 1) на расстояние, превышающее расстояние от опорных колес до нижней поверхности ножей стоек 10.
2. Производится пробная обкатка плуга. При выполнении технологического процесса далее производится регулировка давления стоек с ножами в почву. В зависимости от плотности почвы производится регулировка рессорных пластин 21 (см. рисунок 1) с помощью упорных болтов, расположенных в кронштейнах 22. С помощью гаечного ключа или специального приспособления оператор производит вращение упорного болта по часовой или против часовой стрелки, вследствие чего увеличивается или уменьшается межосевое расстояние, определяющее величину давления рессорных пластин на стойку рабочего органа, соответственно стойка рабочего органа с ножами заглужается на большую или меньшую величину по глубине.

После выполнения пробного прохода, исходя из проведенных настроек и имеющейся плотности почвы, следует произвести замер глубины обработки почвы и в случае необходимости еще раз провести указанные выше действия по настройке машины.

Особое внимание нужно уделить соблюдению заданной рабочей скорости. Она должна находиться в пределах от 8 до 12 км/ч. Это связано с тем, что при работе машина испытывает сопротивление почвы, которое увеличивается при повышении рабочей скорости, и при этом данная зависимость не носит линейный характер. Таким образом, при повышении значений рабочей скорости выше параметров, указанных в руководстве по эксплуатации, сопротивление почвы может превысить рассчитанные технические характеристики и диапазона регулировки рессорных пластин может быть недостаточно, из-за чего заданная глубина обработки изменится в меньшую сторону и качество выполнения технологического процесса глубокого рыхления ухудшится по причинам, связанным с нарушением условий эксплуатации, а в некоторых случаях может привести к поломке отдельных частей глубокорыхлителя.

Заключение

Обработка почвы регулирует многие условия жизни растений. Она оказывает преобладающее воздействие на воздушный и водный режимы, происходящие в почве, определяют её структурное состояние. Путем воздействия на воздушный, водный и тепловой режим, обработка почвы является могучим средством для регулирования жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, которые являются источником накопления в почве необходимых для растений элементов в доступной форме. Технология обработки почвы является одним из важнейших факторов, влияющих на рост, развитие урожаи сельскохозайственных культур.

Предложенная конструктивная схема плуга-глубокорыхлителя ГР-70 с возможностью комплектации опорными катками позволяет качественно производить процесс разуплотнения почвы и разрушения подплужной подошвы и адаптировать машину к различным типам почв и обеспечивает требуемые агротехнические показатели по крошению почвы и гребнистости после выполнения операции.

Список цитированных источников

1. Руководство по эксплуатации «Плуг-глубокорыхлитель ГР-70 и его модификации»: утв. 21.10.2007 г.: текст по состоянию на 01 сентября 2020 г. / ОАО «Брестский электромеханический завод»; сост.: В. Н. Жиян, А. М. Таперин, В. И. Воронин. – Брест, 2014. – С. 7–13.
2. Ersatzteilliste Spare Parts List Modell CLE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://agrotexnopark.ru/pdf/CLE190.pdf>. – Дата доступа: 02.02.2022.

References

1. Rukovodstvo po eksploatacii «Plug-glubokoryhlitel' GR-70 i ego modifikacii»: utv. 21.10.2007 g.: tekst po sostoyaniyu na 01 sentyabrya 2020 g. / OAO «Brestskij elektromekhanicheskij zavod»; sost.: V. N. Zhiyan, A. M. Taperin, V. I. Voronin. – Brest, 2014. – S. 7–13.
2. Ersatzteilliste Spare Parts List Modell CLE [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://agrotexnopark.ru/pdf/CLE190.pdf>. – Data dostupa: 02.02.2022.

Материал поступил в редакцию 17.03.2022

УДК 502.175

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

А. А. Волчек¹, А. В. Безручко²

¹Д. геогр. н., профессор, декан факультета инженерных систем и технологий Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

²Магистр биологических наук, заместитель начальника отдела контроля за обращением с отходами Брестского областного комитета природных ресурсов и охраны окружающей среды, Брест, Беларусь, e-mail: alena-bezruchko@yandex.by

Реферат

В работе рассмотрено экологическое состояние полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области, в том числе морфологический состав захораниваемых отходов, качество подземных вод вблизи данных объектов.

Оценка воздействия объектов на состояние подземных вод проводилась за 2015–2019 годы путем сравнения фактических концентраций загрязняющих веществ в наблюдательных и фоновых скважинах. Полученные данные позволили оценить динамику загрязнения подземных вод вблизи объектов захоронения, способность к миграции и разбавлению тех или иных химических элементов.

Вопрос усовершенствования строения полигонов в части изоляционных материалов, которые препятствуют проникновению фильтрационных вод в подземные воды, и контроль поступающих отходов на захоронение на сегодняшний день является актуальным.

Ключевые слова: полигон твердых коммунальных отходов, подземные воды, фильтрационные воды, локальный мониторинг, наблюдательные скважины.

ENVIRONMENTAL STATE OF SOLID WASTE POLYGONS IN BREST REGION

A. A. Volchak, A. V. Biazruchka

Abstract

The paper considers the ecological state of landfills of solid municipal waste in the Brest region, including the morphological composition of buried waste, the quality of groundwater near these objects.

The assessment of the impact of objects on the state of groundwater in 2015–2019 was carried out by comparing the actual concentrations of pollutants in observation and background wells. The data obtained made it possible to assess the dynamics of groundwater pollution near burial sites, the ability to migrate and dilute certain chemical elements.

The issue of improving the structure of landfills in terms of insulating materials that prevent the penetration of filtration waters into groundwater, and the control of incoming waste for disposal is relevant today.

Keywords: municipal solid waste landfill, groundwater, filtration water, local monitoring, observation wells.

Введение

В современном мире при стремительном развитии цивилизации обострилась проблема утилизации образующихся отходов [1]. Проблема захоронения отходов должным образом не решена ни в одной из стран мира. Как отмечал В. И. Вернадский, ни один биологический вид не может выжить в созданных им отходах [2].

Полигоны твердых коммунальных отходов (далее – ПТКО) являются объектами высокого экологического риска загрязнения окружающей среды. Важным фактором, определяющим негативное воздействие полигонов захоронения, является свалочный фильтрат. На протяжении всей эксплуатации объекта захоронения твердых коммунальных отходов фильтрат является постоянным источником загрязнения подземных вод.

В целях снижения вредного воздействия на компоненты окружающей среды полигоны оборудуются специальными инженерными сооружениями, согласно действующего природоохранного законодательства Республики Беларусь.

Проектирование, строительство ПТКО на территории области регламентируется Законом Республики Беларусь «Об обращении с отходами» и иными нормативно-правовыми актами, действующими на территории республики.

Цель работы – изучить полигоны твердых коммунальных отходов Брестской области и качество подземных вод вблизи данных объектов.

Методы исследования и исходные данные

Анализ результатов произведен на основании полученных данных лабораторией ГУ РЦАК Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и статистического отчета

захораниваемых отходов производства на полигонах Брестского областного комитета природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Оценка воздействия объектов на состояние подземных вод в соответствии с требованием проводилась в 2015–2019 годах путем сравнения фактических концентраций загрязняющих веществ в наблюдательных и фоновых скважинах (показатель $C_{набл.}/C_{фон}$).

Полигоны Брестской области и их анализ

В соответствии с Законом Республики Беларусь «Об обращении с отходами» отходы – вещества или предметы, образующиеся в процессе осуществления экономической деятельности, жизнедеятельности человека и не имеющие определенного предназначения по месту их образования либо утратившие полностью или частично свои потребительские свойства [3].

В странах ЕЭС полигоны для захоронения отходов делятся на полигоны для опасных отходов, полигоны для бытовых отходов и полигоны для инертных отходов [7].

В Республике Беларусь объекты захоронения отходов делятся на полигоны твердых коммунальных отходов (предназначенные для захоронения отходов потребления и некоторых видов отходов производства), промышленные полигоны (захоронение специфических производственных отходов) и мини-полигоны (объекты на которых захораниваются только отходы потребления).

Объекты захоронения делятся на мини-полигоны и полигоны. Данное разделение исходит из возможности ежегодно принять на захоронение отходов (тонн), а также из-за того, какие виды отходов могут быть приняты для захоронения на такие объекты. Данная классификация приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация объектов захоронения твердых коммунальных отходов

Наименование полигона по мощности	Среднее годовое количество отходов, тыс. м ³ /год	Возможность захоронения отходов
Мини-полигоны	до 5	Отходы потребления и отходы производства
Полигон малой мощности	5–30	
Полигоны средней мощности	более 30–150	
Полигоны большой мощности	более 150	

Примечание – показатели приведены из Концепции создания объектов по сортировке и использованию твердых коммунальных отходов и полигонов для их захоронения [5].

На территории Брестской области по состоянию на 01.01.2022 в эксплуатации находится 113 объектов захоронения, из которых 28 полигонов и 85 мини-полигонов.

Все объекты захоронения находятся на балансе службы жилищно-коммунального хозяйства, которые имеют специальное разрешение (лицензию) на право осуществления деятельности, связанной с использованием природных ресурсов и воздействием на окружающую среду, согласно которых осуществляется эксплуатация данных объектов.

Мини-полигоны относятся к объектам, на которых происходит ежегодное захоронение отходов до 5 тыс. м³/год. На 85 мини-полигонах области подлежат захоронению только отходы потребления, которые собраны с территории общего пользования. Детальный анализ будет проводиться 28 полигонов твердых коммунальных отходов.

На 28 полигонах подлежат захоронению отходы потребления и некоторые виды отходов производства. Все они относятся к сооружениям средней мощности. На территории области полигонов большой мощности нет. Все полигоны зарегистрированы как объекты захоронения в РУП «Бел НИЦ «Экология» [6].

На объектах захоронения отходов области предусмотрен комплекс мероприятий по предотвращению загрязнения окружающей среды отходами, продуктами их взаимодействия или разложения: ограждение по периметру с обводным каналом, противофильтрационный экран (инертным материалом), ограждение по периметру, контрольно-пропускной пункт с административным зданием, наличие наблюдательных скважин для контроля качества подземных вод вблизи полигона [8,9].

Типовая схема строения полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Типовая схема строения ПТКО Брестской области

Все 28 объекта захоронения отходов состоят из производственной и хозяйственной зоны.

Производственная зона является самым важным сооружением полигона, занимающим до 95 % его площади. Она состоит из карт, на которых происходит захоронение отходов. Участок захоронения отходов на полигонах разбит на карты с учетом рельефа местности, движения грунтовых вод. Число карт варьирует от 2 до 4.

Не все карты эксплуатируются одновременно. Сначала происходит захоронение отходов на первой карте, заполнение ее до определенного уровня отходов (высота 2–3 яруса, с высотой каждого яруса после уплотнения 2–2,5 м), потом изоляция отходов инертным материалом (грунт), отставание карты. После того как карта полностью себя исчерпает, переходят к эксплуатации второй и т. д. Анализ эксплуатации полигонов показывает, что в среднем каждая карта принимает отходы для захоронения в течение 3–5 лет.

В основании участков складирования отходов предусмотрено устройство котлована с целью получения запаса связного грунта для промежуточной и окончательной изоляции слоев отходов. Грунт из котлована размещается в кавальерах по периметру полигона или на неразработанной карте.

Для изоляции слоев отходов по согласованию с территориальными органами государственного санитарного надзора применяются неопасные отходы производства и некоторые виды IV класса опасности.

Так, начиная с 2019 года на 9 ПТКО из 28 имеющихся в качестве изоляционного материала используются дополнительно отходы от уборки территории общего пользования и смет от уборки территории промышленных предприятий и организаций. Это такие объекты, как полигон г. Барановичи, полигон г. Бреста, полигон д. Омелино Брестского района, полигон г. Иваново, полигон г. Кобрин, полигон г. Пинска, полигон г. Пружаны, полигон г. п. Ружаны, полигон г. Ивацевичи.

Дно карты для складирования отходов имеет горизонтальную поверхность, что обеспечивает равномерное распределение филтра по всей площади карты. Для сбора филтра делается дренажная система [9].

На объектах захоронения твердых коммунальных отходов ведется бесперебойная разгрузка автотранспорта, доставляющего отходы. Прибывающий на полигон автотранспорт разгружается у рабочей карты.

Все объекты захоронения по периметру имеют ограждение, препятствующее проникновению на территорию посторонних лиц и животных.

Некоторые объекты захоронения, кроме сетчатого ограждения, дополнительно оборудованы осушительными или водоотводными канавами (рвами), глубиной не менее 2 м, высотой не менее 3 м. Это такие объекты, как полигон г. Бреста, полигон г. Малорита.

На полигонах, на которых происходит ежегодное захоронение большого количества отходов, строятся временные дороги из железобетонных плит до места захоронения (полигон г. Барановичи, полигон г. Кобрин, полигон г. Пинска).

В ходе изучения имеющейся документации по каждому полигону, ориентируясь на визуальный осмотр каждого объекта захоронения, установлено, что 28 объектов делятся на две группы: имеющие противофильтрационный экран и не имеющие противофильтрационного экрана в основании полигона. Как показывает анализ, в области 14 полигонов, которые имеют противофильтрационный экран, и 14 полигонов, на которых он отсутствует.

Объекты захоронения ТКО, на которых отсутствует противофильтрационный экран (далее – полигоны группы 1): полигон г. Березы, полигон г. Белоозерска, полигон д. Медно Брестского района, полигон г. Ганцевичи, полигон д. Саки Жабинковского района, полигон г. Дрогичина, полигон г. п. Михновичи, полигон г. Косово, полигон д. Телеханы Ивацевичского района, полигон г. Высокое Каменецкий район, полигон г. Ляховичи, полигон г. Малориты, полигон г. п. Логишина Пинского района, полигон г. Давид-Городка Столинского района.

Под данные объекты были переданы отработанные внутрихозяйственные, промышленные карьеры, которые содержат природный противофильтрационный слой в виде глиняного замка.

Полигоны ТКО, на которых имеются противофильтрационный экран (далее – полигоны группы 2): полигон г. Барановичи, полигон г. Бреста, полигон д. Омелина Брестского района, полигон г. Жабинки, полигон г. Иваново, полигон г. Каменца, полигон г. Кобрин, полигон г. Лунинца, полигон г. п. Микашевичи, полигон г. Пинска, полигон г. Пружаны, полигон г. п. Ружаны Пружанского района, полигон г. Столина, полигон г. п. Ольшаны Столинского района.

Ежегодно на каждый объект поступают отходы производства, которые образуются в результате экономической деятельности и отходы потребления, образующие от населения.

Морфологический состав поступающих отходов зависит от климатических условий, сезона года, времени, прошедшего с момента

образования их, степени благоустройства жилищного фонда, наличия системы раздельного сбора отходов, уровня благосостояния населения.

Для определения морфологического состава отходов первоначально проведен анализ поступающих отходов производства и отдельно отходов, образующихся от населения. Анализ отходов производства сделан на основе выданных разрешений на хранение и захоронение отходов производства Брестским областным комитетом природных ресурсов и охраны окружающей среды, анализа статистических данных РУП «Бел НИЦ «Экология», а также полученной информации о количестве принятых отходов по видам от службы жилищно-коммунального хозяйства области.

Проанализировав полученные данные, установлено, что в целом за календарный год на полигоны поступает приблизительно 54957 тонн (14,24 %) производственных отходов от общего числа захораниваемых. Остальная часть (85,76 %) приходится на те, которые образуются от населения и с территорий общего пользования.

При этом из 54957 тонн отходов производства на полигонах захоранивается 10357 тонн (2,68 %) 3-го класса опасности, 10526 тонн (2,73 %) 4-го класса опасности и 34072 тонны (8,83 %) неопасных.

При этом стоит отметить, что большая нагрузка захораниваемых отходов производства приходится на полигоны г. Барановичи, г. Бреста, г. Береза, г. Пинска. Это связано с большим количеством предприятий, которые осуществляют экономическую деятельность в данных административных регионах. И в целом нагрузка из-за этого на данные полигоны ложится большая, чем на полигоны г. Малориты, г. Ляховичи, г. Жабинки и иные, в районах которых больше предприятий сельскохозяйственного направления, чем машиностроительной промышленности.

Так, было изучено более 35780 выданных разрешений на хранение и захоронение отходов производства, находящихся в Брестском областном комитете природных ресурсов и охраны окружающей среды, а также более 1500 разрешений, выданных территориальными инспекциями. Также проанализированы отчеты о количестве захороненных отходов в разрезе каждого объекта захоронения.

Полученные результаты о количестве захороненных отходов производства и потребления на полигонах, имеющих противодиффузионный экран (полигоны группы 2) и не имеющих противодиффузионного экрана в основании полигонов (полигоны группы 1).

Исходя из полученного анализа видно, что ежегодно на полигоны группы 2 отходов поступает больше, чем на полигоны группы 1. Также следует отметить, что на некоторых полигонах группы 2 количество захороненных опасных отходов значительного поступает больше, чем на иные объекты захоронения, особенно на полигоны группы 1.

Так, на полигоне г. Барановичи захоронено – 345296 тонн (из них 3-го класса опасности – 92533 тонн), на полигоне г. Бреста – 358918 тонн (из них 3-го класса опасности – 19502 тонн), на полигоне г. Кобрин – 500495 тонн (из них 3-го класса опасности – 642 тонн), на полигоне г. Лунино – 75640 тонн (из них 3-го класса опасности – 320 тонн), на полигоне г. п. Микашевичи Луниноцкого района – 66384 тонн (из них 3-го класса опасности – 431 тонна), на полигоне г. Пинска – 210774 тонн (из них 3-го класса опасности – 3507 тонн), на полигоне г. Столина – 82424 тонн (из них 3-го класса опасности – 1851 тонн). В связи с поступающим большим количеством отходов нагрузка на изоляционный слой на данных объектах больше, чем на иных.

Это связано с тем, что количество промышленных предприятий, от экономической деятельности которых образуются отходы 3-го класса опасности, в данных регионах области больше, чем в иных.

По сравнению с группой 2 в группе 1 сконцентрированы административные районы области, которые больше аграрные, чем промышленные. Согласно полученным данным за пять лет на объекты захоронения этой группы поступило 547306 тонн отходов, что составляет 29,4 % от общего количества захороненных отходов на полигонах группы 2 за аналогичный период.

Следует отметить, что исключением в полигонах группы 1 является Березовский, Ивацевичский (г.п. Телеханы), Ляховичский, Пинский районы, в которых сконцентрировано значительное количество промышленных предприятий из данной группы и захоронение отходов производства происходит наибольшее. На полигонах Березовского района захоронено – 21363 тонн отходов производства, г. п. Телеханы Ивацевичского района – 6960 тонн, г. Ляховичи – 9546 тонн, г. п. Логишина Пинского района – 22266 тонн.

Все ПТКО отходов обязаны проводить мониторинг подземных вод. Исключением из этого требования являются мини-полигоны, на которые поступают неопасные отходы потребления и на которых исключается миграция опасных компонентов из отходов в подземные воды.

Оценка подземных вод – это оценка физического, химического и биологического состояния подземных вод в связи с природными условиями и вмешательством человека [10].

Анализ проб воды может выполняться аккредитованной лабораторией или лабораторией РУП «Белгеология».

Пунктами наблюдений за качеством подземных вод вблизи объектов захоронения ТКО являются наблюдательные скважины и колодецы, расположенные выше источника вредного воздействия по течению естественного потока подземных вод (фоновая скважина, колодец) и ниже источника вредного воздействия по течению естественного потока подземных вод (наблюдательная скважина, колодец).

Количество наблюдательных скважин на каждом объекте захоронения области различно. В основном на полигонах ТКО Брестской области для контроля за качеством подземных вод построено три скважины, одна из которых является фоновой, две – наблюдательными.

В соответствии с действующим законодательством в республике состояние качества подземной воды оценивается по следующим показателям: уровень воды, температура воды, водородный показатель, концентрация сухого остатка, азота аммонийного, азота нитратного, азота нитритного, фосфора фосфатного, хлоридов, сульфатов, нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), ртути, кадмия, кобальта, цинка, хрома общего, меди, свинца, мышьяка, железа общего, фенолов [11].

В ходе эксплуатации объекта захоронения мониторинг проводится не менее одного раза в год. Период проведения наблюдений за состоянием подземных вод после рекультивации объекта захоронения ТКО определяется проектом на рекультивацию такого объекта с учетом его мощности и уровня оказываемого вредного воздействия на подземные воды. Практика показывает, что этот период составляет, как правило, не менее 5 лет, с целью получения полной и достоверной картины, такой объект не оказывает вредного воздействия на компоненты природы.

Время проведения стандартного локального мониторинга в течение календарного года утверждается предприятием на основании проектных данных, с учетом мощности объекта и уровня оказываемого вредного воздействия на подземные воды. В основном этим периодом является спад весеннего половодья.

Для получения качественной и количественной оценки загрязнения подземных вод вблизи полигонов следующим действием было проведение детального изучения расположения наблюдательных скважин вблизи объектов захоронения, изучение потока движения подземного русла воды и сам анализ подземной воды, отобранной из наблюдательных скважин по 20 показателям. Исследования состава подземных вод вблизи полигонов за пять лет проводились по следующим показателям: аммоний-ион, нитрат-ион, сульфат-ион, хлорид-ион, фосфат-ион, железо различных зарядов ионов, а также ионов марганца, меди, цинка, хрома, свинца, кадмия, ртути, кобальта, мышьяка, фенолы, сплавы нефтепродуктов, минерализация воды.

Полученные данные позволили оценить динамику загрязнения подземных вод вблизи объектов захоронения, способность к миграции и разбавлению тех или иных химических элементов, попавших в общий их поток в течение исследуемого периода (рисунок 2).

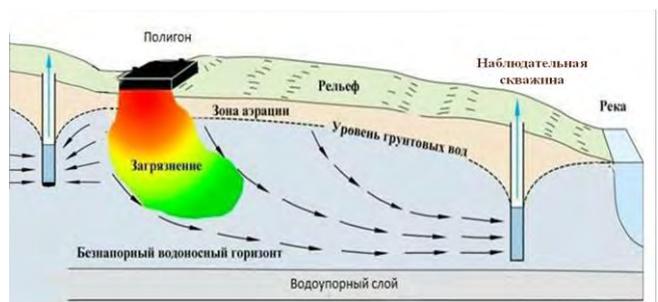


Рисунок 2 – Типовая схема загрязнения подземных вод вблизи полигонов ТКО

Анализируя каждый показатель по отдельной скважине, необходимо отметить, что общее загрязнение по всем показателям видно в скважинах, которые расположены вниз по подземному потоку воды от полигонов. Однако по показателям, таким как свинец, медь, кобальт видна тенденция загрязнения подземной воды, прослеживается в скважинах, которые расположены не по движению подземного потока.

Под пунктом наблюдения понимается фоновая скважина (колодец) и наблюдательные скважины полигонов. Периодичность наблюдений составляет не реже 1 раза в год на каждом объекте захоронения. Проанализировав количество поступающих отходов на объекты захоронения и полученные данные со 120 наблюдательных скважин локального мониторинга качества подземных вод вблизи объектов захоронения отходов, была получена картина загрязнения подземной воды по ряду химических элементов в двух исследуемых группах полигонов.

Результаты мониторинга

Превышения фоновых показателей по определенным химическим элементам представлены в таблице 2. Полученные данные свидетельствуют о неоднозначной динамике увеличения или снижения химических элементов в подземных водах вблизи определенной только группы полигонов. Динамика обнаружения в подземных водах того или иного химического элемента отлично видна в таблице 2 и рисунке 3.

Таблица 2 – Анализ качества подземных вод по отдельным показателям, вблизи объектов захоронения, сгруппированных по группам исследования, мг/дм³

Группа полигонов/химический показатель	Аммоний-ион	Нитрат-ион	Сульфат-ион	Хлорид-ион	Фосфат-ион	Железо общее	Марганец	Медь	Цинк	Хром	Минерализация воды	Нефтепродукты	Кобальт	Свинец	Кадмий	Ртуть	Фенолы
Группа 1	1,67	2,77	1,87	1,4	2,04	3,11	3,55	1,93	1,88	2,14	5,97	2,64	0,37	1,3	1,4	1,5	0,54
Группа 2	2,4	2,92	10,34	5,78	1,56	2,29	3,02	3,15	3,67	0,46	1,68	2,91	1,36	0,27	0,58	0,34	0,61

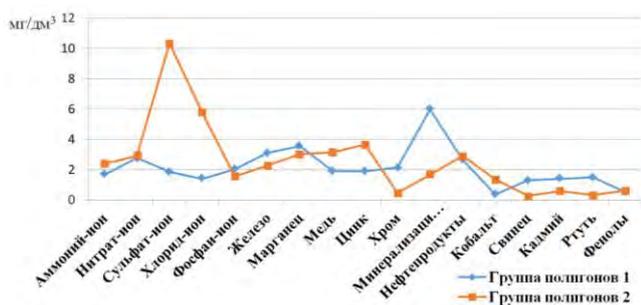


Рисунок 3 – Данные по каждому показателю в разрезе двух групп полигонов, полученные в результате локального мониторинга качества подземных вод по отношению к фоновым показателям, мг/дм³

Как видно из рисунка 3, что в подземных водах вблизи полигонов группы 1 превышений по сравнению с фоновыми показателями установлено по 7 веществам (железо, марганец, хром минерализация воды, свинец, кадмий, ртуть), а в группе 2 по 6 веществам (аммоний-ион, сульфат-ион, хлорид-ион, медь, цинк, нефтепродукты).

Полученные результаты показывают, что независимо от наличия противотрифильтрационного экрана или его отсутствия, эксплуатируемые полигоны меняют качество подземных вод.

В процессе эксплуатации полигонов образуется целый комплекс процессов, которые воздействуют на окружающую среду. Это такие процессы, как образование свалочного газа, влияние фильтрата, анаэробный и аэробный процессы, пыль, запах, шум [11].

Образующийся в процессе эксплуатации объектов захоронения отходов фильтрат является постоянным источником загрязнения подземных вод. Химический состав фильтрата, в зависимости от этапа биохимической деструкции твердых коммунальных отходов, характеризуется усредненными показателями: «молодой» фильтрат (0–5 лет) – БПК₅=10640,0 мг О₂/дм³, ХПК=26800,0 мг О₂/дм³; «старый фильтрат» (5–35 лет) – БПК₅=680,0 мг О₂/дм³, ХПК=2280,0 мг О₂/дм³ [12].

В фильтрате, который образуется на каждом полигоне, содержится ряд тяжелых металлов. В первую очередь это никель, хром, марганец, свинец, кадмий, кобальт, цинк.

Из твердой фазы отходов микроэлементы со временем переходят в фильтрат. Водная вытяжка ТКО по сравнению с океаническими водами заметно обогащена алюминием, фосфором, железом, никелем, медью, цинком, барием, а в сопоставлении с речными водами – также бором, натрием, магнием, калием, кальцием, стронцием. Концентрации ряда элементов (В, Zn, Cu, Ni, P) близки или превышают предельно допустимые концентрации (далее – ПДК) для природных вод. В фильтрационных водах содержание ионов марганца, цинка, свинца, кадмия, никеля, хрома достигает 128; 100; 16,7; 500; 11; 10,4 ПДК. И соответственно, в случае проникновения жидкой фазы (фильтрата) полигона в подземные воды произойдет их существенное загрязнение [12].

Механизм формирования техногенных гидрогеохимических аномалий подземных вод на ПТКО состоит из трех стадий. Первая соответствует инфильтрации загрязненных вод через зону аэрации и характеризуется метаморфизацией фильтрата вследствие процессов комплексобразования, растворения, выщелачивания, обменно-адсорбционных процессов, сопровождающих движение загрязненных вод через зону аэрации. На второй стадии происходит смешение метаморфизованного фильтрата с подземными водами. Третья стадия соответствует переносу загрязняющих веществ по водоносному горизонту, которая начинается практически одновременно со второй. Важнейшими факторами миграции загрязнений являются естественная скорость потока подземных вод и активная пористость водовмещающих пород. Во время третьей стадии происходит формирование области загрязнения в водоносном горизонте и распространение загрязнения по площади. Естественное самоочищение подземных вод в пределах ореола загрязнения растягивается на многие годы.

Одним из основных загрязнителей подземных вод являются металлы. Это химические элементы, которые имеют способность проникать из объекта захоронения и распространяться на большое расстояние от него. На втором плане идет загрязнение подземной воды сульфатами, хлоридами, фосфатами и нитратами. Изучая лабораторный опыт качества подземных вод в странах ЕС, известно, что, при прекращении поступления загрязнителей на полигонах (предотвращение захоронения опасных отходов) и выпадении атмосферных осадков, подземная вода имеет свойство очищаться [12].

Атмосферные осадки растворяют загрязненные вещества, фильтруются в подземные воды. В этом плане загрязнение подземных вод в зоне влияния полигона является в определенной мере интегрированным показателем загрязнения.

Анализ наблюдений

Самое большое количество и способность к накоплению в подземной воде можно распределить следующим образом: 1) сульфат-ион; 2) хлорид-ион; 3) нитрат-ион и аммоний-ион; 4) железо общее и марганец; 5) фосфат-ион; 6) минерализация воды; 7) фенолы и иные вещества.

Из полученных анализов видно, что в подземной воде полигонов второй группы зафиксировано превышение фоновых показателей по таким ионам, как сульфат-ион в 10,34 раза от показателей фоновой скважины; хлорид-ион в 5,78 раза, нитрат-ион в 2,92 раза, нефтепродуктов в 2,91 раза, аммоний-ион в 2,4 раза, фенолы общие в 0,61 раза.

В подземных водах вблизи полигонов группы 1 зафиксировано превышение показателей от фоновых по минерализации воды в 5,97 раза, марганец в 3,55 раза, железо в 3,11 раза, фосфор-ион

в 2,04 раза. Данный анализ подтверждает, что количество тонн отходов, морфологический состав их оказывают влияние на состав подземной воды.

Также анализ каждого объекта захоронения индивидуально показал значительное ухудшение качества подземных вод (значение показателя $C_{набл.}/C_{фон}$ мг/дм³ составляло 10 и более раз) по определенным показателям: в 2018 году по меди в 17,8 раза от фонового показателя на полигоне г. Ганцевичи; по аммоний-ион – 15,9 раза, нитрат-иону – 15,04 раза, хлорид-иону – 92,06 раза, железо общее – 11,25 раза на полигоне г. Иваново; в 2019 году по нитрат-иону в 12,22 раза, сульфат-иону – 17,25 раза и в 2015 году по хрому – 50,0 раза на полигоне г. п. Коссово Ивацевичского района; в 2017 году по нитрат-иону – 11,7 раза на полигоне г. Высокое Каменецкого района; в 2016 году по аммоний-ион в 833,3 раза на полигоне г. Луница; в 2018 году по марганцу в 39,2 раза на полигоне г. Ляховичи; в 2018 году по нефтепродуктам – 24,4 раза на полигоне г. Столина; в 2018 году по аммоний-ион – 61,8 раза на полигоне г. Давид-Городка Столинского района.

Исследование показало, что фильтрационные воды, образующиеся на полигонах, в первую очередь влияют на состояние подземной воды по аммоний-ион, хлорид-ион и тяжелым металлам.

Следует отметить, что проведенный анализ также, как и в предыдущих двух, показывает, что превышения по химическим элементам установлены в подземной воде вблизи полигонов двух групп (на 5 объектах группы 1 и 3 объектах группы 2).

Полученные результаты в ходе проведенного анализа свидетельствуют, что отсутствие или несовершенство противифльтрационного экрана на полигоне, недостаточность природоохранных сооружений (обваловка, кольцевой канал, водоотводная канава) приводят к попаданию фильтрата в подземные воды.

Многолетние наши наблюдения за эксплуатацией объектов захоронения также показывают, что захораниваемый состав отходов на полигонах оказывает влияние на состояние подземных вод, который зависит от морфологического состава отходов и от количества захораниваемых отходов на объекте.

Этот вывод сделан, исходя из анализа выданных разрешений на хранение и захоронение отходов производства предприятиям Барановичского района в течение пяти лет. Объект оснащен противифльтрационным экраном, анализ качества подземных вод брались из наблюдательных скважин, расположенных по движению водного потока и находящихся на одинаковом расстоянии от его движения.

Так, начиная с 2015 года по истекший период 2019 года на полигоне г. Барановичи территориальным органом Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь уменьшено количество захораниваемых на полигоне отходов производства. Согласно ежегодным данным по локальному мониторингу качества подземных вод, видна тенденция по улучшению качества подземных вод по аммоний-иону, хлорид-иону, а начиная с 2017 года отсутствие таких ионов, как кобальт, свинец, кадмий, мышьяк, фенолы (рисунку 4).

Это подтверждает вывод о том, что качество подземных вод вблизи объекта зависит от правильности эксплуатации объекта захоронения отходов.

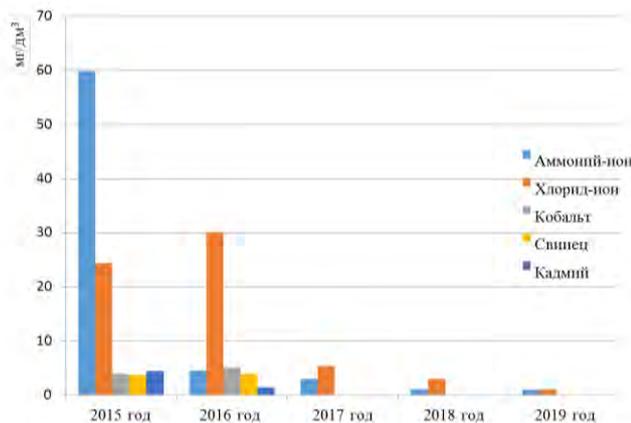


Рисунок 4 – Данные по содержанию некоторых ионов в составе подземных вод вблизи полигона г. Барановичи в период с 2015 по 2019 годы, мг/дм³

Выводы

Полученные результаты в ходе проведенной работы позволили установить, что функционирующие в настоящее время ПТКО в области с течением времени оказывают влияние на изменение качества подземных вод.

Изменение качества подземных вод вблизи объектов зависит от нескольких факторов: от обеспечения на ПТКО более надежного противифльтрационного слоя и от морфологического состава захораниваемых отходов.

Значительное ухудшение качества подземных вод (значение показателя $C_{набл.}/C_{фон}$ мг/дм³ составляло 10 и более раз) вблизи объекта захоронения наблюдалось в 2015 году по аммоний-ион – 299,9 раза от фонового показателя; по хлорид-иону – 24,37 раза; по цинку – 28,3 раза; минерализации воды – 10,6 раза. В 2016 году по хлорид-иону – 30,14 раза; по меди – 10,8 раза; по СПАВ – 13,76 раза. В 2019 году превышений по сравнению с фоном не установлено, но при этом в сравнении с пятилетними данными видна тенденция увеличения по фосфат-иону в 1,6 раза, хрому 1,9 раза.

Проведенный анализ по изучению морфологического состава захораниваемых отходов на полигоне показал, что отходы неопасного класса полностью подвержены разложению и практически не оказывают никакого влияния на объекты гидросферы по сравнению с отходами 3-го и 4-го класса опасности. Так, с 2017 года полигоне ТКО г. Барановичи видна тенденция по улучшению качества подземной воды в части отсутствия таких веществ, как кобальт, свинец, кадмий, мышьяк, фенолы.

Также анализ индивидуально каждого объекта захоронения показал значительное ухудшение качества подземных вод (значение показателя $C_{набл.}/C_{фон}$ мг/дм³ составляло 10 и более раз) по определенным показателям: в 2018 году по меди в 17,8 раза от фонового показателя на полигоне г. Ганцевичи; по аммоний-ион – 15,9 раза, нитрат-иону – 15,04 раза, хлорид-иону – 92,06 раза, железо общее – 11,25 раза на полигоне г. Иваново; в 2019 году по нитрат-иону в 12,22 раза, сульфат-иону – 17,25 раза и в 2015 году по хрому – 50,0 раза на полигоне г. п. Коссово Ивацевичского района; в 2017 году по нитрат-иону – 11,7 раза на полигоне г. Высокое Каменецкого района; в 2016 году по аммоний-ион в 833,3 раза на полигоне г. Луница; в 2018 году по марганцу в 39,2 раза на полигоне г. Ляховичи; в 2018 году по нефтепродуктам – 24,4 раза на полигоне г. Столина; в 2018 году по аммоний-ион – 61,8 раза на полигоне г. Давид-Городка Столинского района.

На основании вышеизложенного следует, что вопрос совершенствования строения ПТКО в части изоляционных материалов, которые будут препятствовать проникновению фильтрационных вод в компоненты окружающей среды, и контроль поступающих отходов на захоронение на сегодняшний день является актуальным.

Список цитированных источников

1. Шимова, О. С. Экология и экономика природопользования: курс лекций: в 2 ч. / О. С. Шимова. – 2-е стер. изд. – Минск : Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2005. – Ч. 2. – 183 с.
2. Экологические аспекты захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах: моногр. / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, РУП «Бел НИЦ «Экология»; Д. М. Ерошина [и др.]; под общ. ред. Д. М. Ерошиной. – Минск : Бел НИЦ «Экология», 2010. – 152 с.
3. Об обращении с отходами: Закон Республики Беларусь, 20 июл. 2007 г., № 271-3 // Нац. правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 23.07.2007, 2/1368.
4. Новиков, Ю. В. Экология, окружающая среда и человек: учеб. пособие для вузов, сред. шк., колледжей / Ю. В. Новиков. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Гранд: ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 560 с.
5. Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь: результаты наблюдений, 2016 год [Электронный ресурс] / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды; Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактив. загрязнения и мониторингу окружающей среды Респ. Беларусь. – Минск : Белгидромет, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2017 год / Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды; под общ. ред. Е. П. Богодяж. – Минск, 2018. – 450 с.

7. Новиков, Ю. В. Экология, окружающая среда и человек: учеб. пособие для вузов, сред. шк., колледжей / Ю. В. Новиков. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Гранд: ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 560 с.
8. О государственном реестре технологий по использованию отходов и государственном реестре объектов обезвреживания и размещения отходов: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 31 янв. 2002 г., № 123 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2002. – № 17. – 5/9879.
9. Концепция создания объектов по сортировке и использованию твердых коммунальных отходов и полигонов для их захоронения [Электронный ресурс]: утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 23 окт. 2019 г., № 715 // Национальный правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/guid=12551&p0=C21900715&p1=1>. – Дата доступа: 19.01.2022.
10. Guideline on: Groundwater monitoring for general reference purposes: report № GP 2008-1 / International Working Group I; ed. G. Jousma. – Utrecht: IGRAC, 2006 (revised 2008). – 165 p.
11. Об утверждении перечня коммунальных отходов: постановление М-ва жилищ.-коммун. хоз-ва Респ. Беларусь, 30 нояб. 2001 г., № 21 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2001. – № 119. – 8/7531.
12. Об утверждении положений о порядке проведения в составе Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь мониторинга поверхностных вод, подземных вод, атмосферного воздуха, локального мониторинга окружающей среды и использования данных этих мониторингов: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 апр. 2004 г., № 482 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2004. – № 70. – 5/14160.
4. Novikov, Yu. V. Ekologiya, okruzhayushchaya sreda i chelovek: ucheb. posobie dlya vuzov, sred. shk., kolledzhey / Yu. V. Novikov. – 2-e izd., ispr. i dop. – M. : Grand: FAIR-PRESS, 2002. – 560 s.
5. Nacional'naya sistema monitoringa okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus': rezul'taty nablyudenij, 2016 god [Elektronnyj resurs] / M-vo prirod. resursov i ohrany okruzhayushchej sredy; Resp. centr po gidrometeorologii, kontrolyu radioaktiv. zagryazneniya i monitoringu okruzhayushchej sredy Resp. Belarus'. – Minsk : Belgidromet, 2017. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
6. Nacional'naya sistema monitoringa okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudenij, 2017 god / Resp. centr po gidrometeorologii, kontrolyu radioaktivnogo zagryazneniya i monitoringu okruzhayushchej sredy; pod obshch. red. E. P. Bogodyazh. – Minsk, 2018. – 450 s.
7. Novikov, Yu. V. Ekologiya, okruzhayushchaya sreda i chelovek: ucheb. posobie dlya vuzov, sred. shk., kolledzhey / Yu. V. Novikov. – 2-e izd., ispr. i dop. – M. : Grand: FAIR-PRESS, 2002. – 560 s.
8. O gosudarstvennom reestre tekhnologij po ispol'zovaniyu othodov i gosudarstvennom reestre ob'ektov obezvezhivaniya i razmeshcheniya othodov: postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 31 yanv. 2002 g., № 123 // Nac. reestr pravovyh aktov Resp. Belarus'. – 2002. – № 17. – 5/9879.
9. Konceptiya sozdaniya ob'ektov po sortirovke i ispol'zovaniyu tverdyh kommunal'nyh othodov i poligonov dlya ih zahoroneniya [Elektronnyj resurs]: utv. postanovleniem Soveta Ministrov Resp. Belarus', 23 okt. 2019 g., № 715 // Nacional'nyj pravovoj internet-portal Resp. Belarus'. – Rezhim dostupa: <http://www.pravo.by/document/guid=12551&p0=C21900715&p1=1>. – Data dostupa: 19.01.2022.
10. Guideline on: Groundwater monitoring for general reference purposes: report № GP 2008-1 / International Working Group I; ed. G. Jousma. – Utrecht: IGRAC, 2006 (revised 2008). – 165 p.
11. Ob utverzhdenii perechnya kommunal'nyh othodov: postanovlenie M-va zhilishch.-kommun. hoz-va Resp. Belarus', 30 noyab. 2001 g., № 21 // Nac. reestr pravovyh aktov Resp. Belarus'. – 2001. – № 119. – 8/7531.
12. Ob utverzhdenii polozhenij o poryadke provedeniya v sostave Nacional'noj sistemy monitoringa okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus' monitoringa poverhnostnyh vod, podzemnyh vod, atmosfernogo vozduha, lokal'nogo monitoringa okruzhayushchej sredy i ispol'zovaniya dannyh etih monitoringov: postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 28 apr. 2004 g., № 482 // Nac. reestr pravovyh aktov Resp. Belarus'. – 2004. – № 70. – 5/14160.

References

1. Shimova, O. S. Ekologiya i ekonomika prirodopol'zovaniya: kurs lekciij: v 2 ch. / O. S. Shimova. – 2-e ster. izd. – Minsk : Akad. upr. pri Prezidente Resp. Belarus', 2005. – CH. 2. – 183 s.
2. Ekologicheskie aspekty zahoroneniya tverdyh kommunal'nyh othodov na poligonah: monogr. / M-vo prirod. resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus', RUP «Bel NIC «Ekologiya»; D. M. Eroshina [i dr.]; pod obshch. red. D. M. Eroshinoj. – Minsk : Bel NIC «Ekologiya», 2010. – 152 s.
3. Ob obrashchenii s othodami: Zakon Respubliki Belarus', 20 iyul. 2007 g., № 271-Z // Nac. pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus', 23.07.2007, 2/1368.

Материал поступил в редакцию 17.03.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ОСУШЕННЫХ ТОРФЯНО-БОЛОТНЫХ ПОЧВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

А. А. Волчек¹, В. В. Борушко²

¹ Д. геогр. н., профессор, декан факультета инженерных систем и экологии Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

² Магистр физ.-мат. наук, аспирант Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: vadim79@tut.by

Реферат

В статье приведены результаты моделирования прогнозных оценок распространения теплоресурсов в торфяно-болотных почвах при различных нормах осушения с учётом глобального потепления климата на период до 2035 года. Предложенная методика позволяет, используя математическое моделирование, получить температурный профиль почв, что положено в основу оценки изменения температурного и теплового режимов естественных и осушенных почв Белорусского Полесья в связи с изменением температуры воздуха. Полученные в работе результаты могут быть использованы при управлении водным режимом мелиорированных земель.

Ключевые слова: Белорусское Полесье, моделирование, торфяно-болотная почва, мелиорация, температура, теплоёмкость, количество теплоты.

MODELING OF THE THERMAL REGIME OF DRAINED PEAT-BOGS SOILS IN BELARUSIAN POLESIE

A. A. Volchak, V. V. Barushka

Abstract

The article presents the results of modeling predictive estimates of the distribution of heat resources in peat-bog soils at various rates of drainage, taking into account global climate warming for the period up to 2035. The proposed method makes it possible, using mathematical modeling, to obtain the temperature profile of soils, which is the basis for assessing changes in the temperature and thermal regimes of natural and drained soils of Belarussian Polissia due to changes in air temperature. The results obtained in the work can be used in the management of the water regime of reclaimed lands.

Keywords: Belarussian Woodland, modeling, peat-bog soil, land reclamation, temperature, heat capacity, amount of heat.

Введение

Обеспечение продовольственной безопасности страны связано с решением вопроса повышения валового сбора сельскохозяйственной продукции, что можно реализовать вовлечением в сельскохозяйственный оборот большего количества земель. Однако в ближайшее время для Республики Беларусь это не представляется возможным, поэтому одной из основных задач становится повышение урожайности сельскохозяйственных культур. Главным фактором её повышения, помимо качества семян и внесения удобрений, является поддержание оптимального водно-воздушного и теплового режимов почв сельскохозяйственных земель. В настоящее время данную задачу решают комплексные мелиорации земель Белорусского Полесья, проведенные в 60-х годах прошлого столетия.

Тепловой режим почв наряду с водно-воздушным определяют, главным образом, сельскохозяйственную продуктивность земель. Целенаправленное регулирование данного процесса способствует повышению урожайности и улучшению качества возделываемых сельскохозяйственных культур. Обычно для реализации этих задач решают вопросы о внесении необходимых удобрений, использовании новых сортов, борьбе с сорной растительностью и т. д. [1–3]. Микроклимату же осушенных территорий уделяется недостаточное внимание. Согласно учению В. Р. Вильямса, осушение должно снижать избыточную влажность почвы до таких размеров, которые обеспечивают необходимый водный, воздушный, тепловой, микробиологический и пищевой режимы почвы.

Изменение климата, происходящее на всей территории Беларуси, как и в Европе в целом, в последние десятилетия выражается в увеличении температуры воздуха во все месяцы года с наибольшими отклонениями в зимне-весенний и летний периоды, что влечет существенные изменения агроклиматических показателей. Заметнее всего эти изменения проявляются на территории Белорусского Полесья, которое в силу своего географического положения характеризуется самой высокой в Беларуси теплообеспеченностью и продолжительностью вегетационного периода.

Понимание закономерностей изменения микроклимата при мелиорации земель поможет создать оптимальные условия для произрастания сельскохозяйственных культур и, как следствие, получения большего урожая. Поэтому изучение закономерностей

формирования теплового режима почв в современных условиях и прогнозные его оценки является одной из важных задач земледелия.

Целью настоящего исследования является изучение закономерностей формирования теплового режима мелиорированных торфяно-болотных почв Белорусского Полесья в современных условиях и оценка его изменения на 2035 г. в связи с потеплением климата, что является одной из важных задач земледелия.

Методы исследования и исходные данные

Математическое моделирование природных процессов активно развивается во всех отраслях естествознания. Это связано с попытками осмысления и более глубокого познания природных процессов, возможностью их количественной характеристики, прогноза и управления природными процессами [4]. Математические модели помогают прогнозировать изменения, которые могут произойти в связи с изменением как температуры воздуха, так и структурой почвы.

Для описания закономерностей формирования температурного профиля почв использовано уравнение теплопроводности [5, 6, 7]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность, кг/м³;

C_p – теплоемкость, Дж/(моль⁰К);

k – теплопроводность, Вт/м⁰К;

T – температура, ⁰К;

∇ – гамильтониан.

Численное моделирование теплового режима почв [8] сводится к вычислениям профильного распределения их температур [9].

Для этого использован метод математического моделирования, который позволяет, используя начальные климатические условия, рассчитывать динамику температурного профиля почвы и вычислять количество аккумулированной теплоты.

Для количественной оценки изменения теплоемкости почв проведён численный эксперимент по следующей схеме: в качестве условного объема принята почва в 5 м³, изображённая на рисунке 1, с размерами 1 м – ширина, 1 м – длина и 5 м – глубина; выбранное

значение глубины с запасом соответствует уровню, на котором прекращаются колебания температуры, связанные со степенью прогревания воздуха солнечными лучами [10].

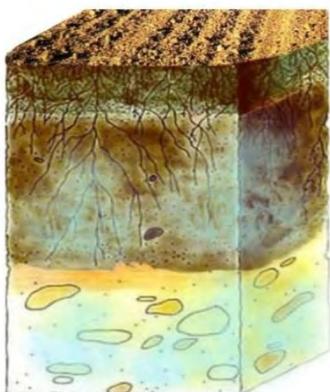


Рисунок 1 – Модель исследуемой почвы

В исследовании рассматривалась модель торфяно-болотной почвы, занимающая около 20 % всей территории Белорусского Полесья [11]. Структура почвы принята следующей: верхний слой торфа глубиной 2 м и нижний слой песка глубиной 3 м. Расчёты производились для различных уровней грунтовых вод (УГВ): 0 м, 0,4 м и 0,8 м.

На базе специализированного программного обеспечения создана модель переноса тепла в почве и исследована динамика её прогрева в естественных и антропогенных условиях [12]. Численное решение математической модели получено методом конечных элементов [13].

Исходными данными послужила метеорологическая информация по метеостанции Полесской, расположенной на территории Лунинецкого болотного массива и являющейся репрезентативной для данного региона [14]. Температура воздуха принималась равной среднему многолетнему значению для данного дня в 19:00, что соответствует среднему значению температуры в рассматриваемый день.

Из предложенных в настоящее время возможных сценариев развития климата в исследовании использован сценарий для Белорусского Полесья до 2035 г., изложенный [15]. Прогнозные значения роста средней температуры воздуха для теплых месяцев приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Прогнозный рост среднемесячной температуры воздуха, °С

Месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Разница температур	1,71	1,49	1,7	2,08	1,97	1,77	1,61

С использованием приведённой выше методики выполнен численный эксперимент по моделированию температурного профиля почв для следующих граничных условий:

- на поверхности модельной почвы задавался поток теплоты, равный среднемесячному потоку солнечного излучения, падающего на единицу площади горизонтальной поверхности;
- на нижней границе модульной почвы задавались условия термостабилизации при температуре 9,1 °С [16], равной среднегодовой температуре воздуха над поверхностью [17];
- на поверхности почвы задавалось условие конвективного теплообмена $-\nabla(-k\nabla T) = 0$ [18];
- на боковых границах выделенного объема применялись условия теплоизоляции;
- испарение с поверхности почвы определялось как изменение внутренней энергии воды при испарении по формуле [19]

$$Q = Lm - vRT, \tag{2}$$

где L – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

m – масса испарившейся воды, кг;

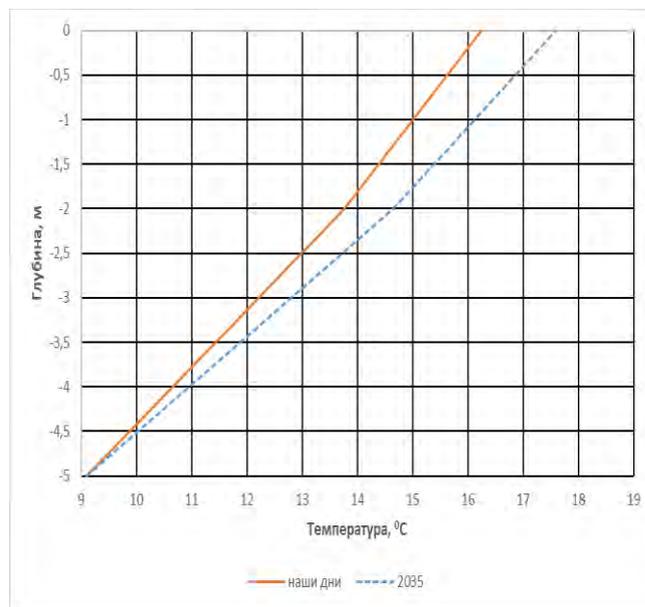
v – количество вещества испарившейся воды, моль;

T – температура воздуха, °К;

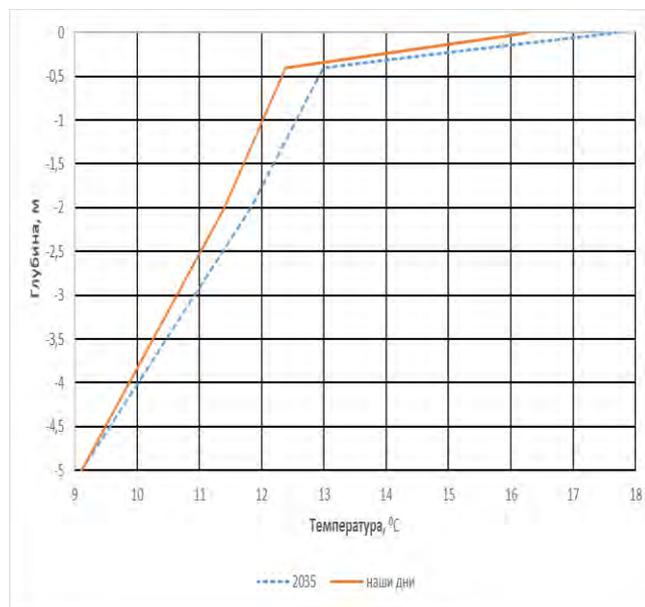
R – молярная газовая постоянная, Дж/моль°К.

Результаты и их обсуждение

В результате численного эксперимента получено распределение температуры почвы по всей толщине моделируемого профиля с интервалом осреднения за сутки с мая по октябрь месяцы, включительно по среднему многолетнему значению температуры воздуха и по прогнозной оценочной температуре до 2035 г. В качестве примера на рисунке 1 приведены графики зависимостей для даты 01.05 для торфяно-болотной почвы без осушения и при норме осушения – 0,4 м для современных климатических условий и с учётом прогнозного изменения температуры до 2035 года.



а)



б)

а) без осушения, б) при норме осушения – 0,4 м

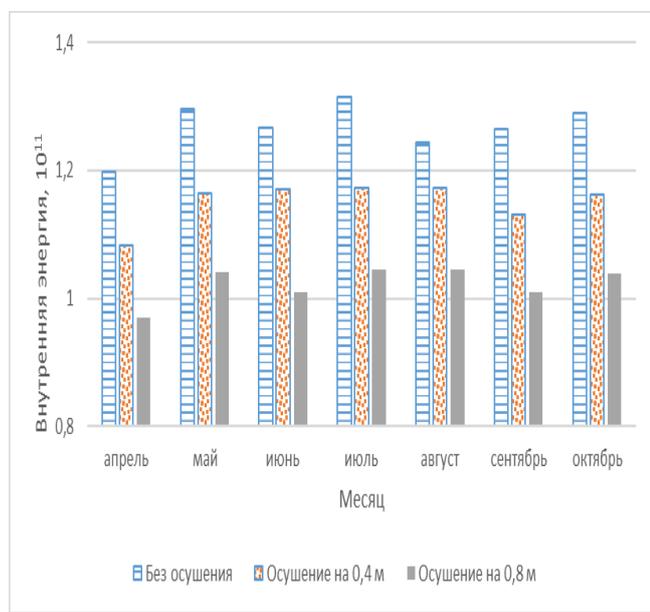
Рисунок 2 – Распределение температуры торфяно-болотной почвы по глубине для 01.05

Как показал проведенный численный эксперимент, динамика температуры почвы носит синхронный характер с аналогичными показателями воздуха, вызванные потеплением климата. Однако характер изменения теплового режима осушенных и неосушенных территорий имеет различную структуру и определяется как климатическими факторами, так и степенью мелиорированности [20, 21]. В зависимости от содержания влаги почвы обладают различными теплоёмкостями.

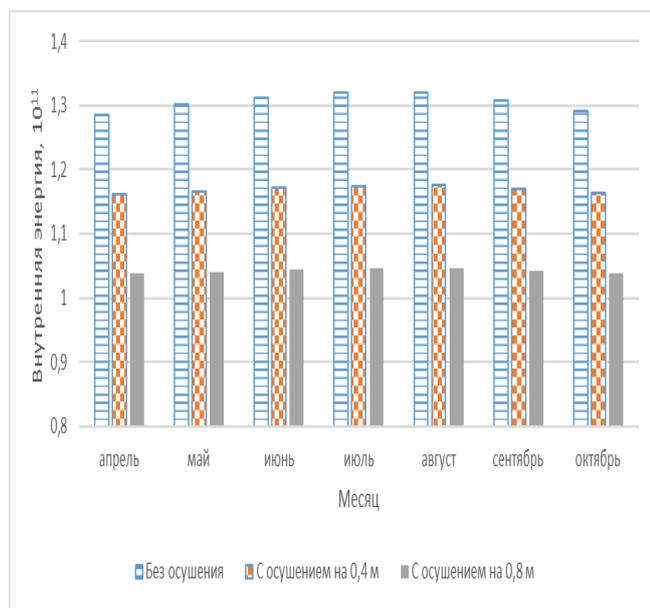
Теплоёмкости воды и воздуха, которые заполняют поры почвы, различаются в четыре раза ($C_{\text{возд}} = 1020 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{К)}$, $C_{\text{воды}} = 4200 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{К)}$) и приблизительно во столько же раз наличие воды в почве повышает её теплоёмкость. Аналогичная ситуация и с теплопроводностью влажной почвы, за счёт которой лучистая энергия солнца, поглощаемая поверхностью почвы, проникает к нижним горизонтам, обеспечивая прогревание корнеобитаемого слоя. Отличие теплоёмкости и теплопроводности приводит к тому, что влажная почва требует большего количества теплоты для нагревания, но и медленнее отдаёт тепло при остывании.

Из графиков, изображённых на рисунке 2, следует, что характер изменения температуры при приближении к поверхности почвы не меняется. Из-за увеличения температуры воздуха соответственно изменяется и температура почвы. Значительнее всего эти изменения проявляются, начиная с глубины 2 м, на неосушенных почвах. При сбросе воды в ходе осушения скорость изменения температуры скачкообразно изменяется на глубине расположения верхнего уровня грунтовых вод.

Из диаграмм, приведенных на рисунке 3, видно, что количество аккумулируемой энергии по месяцам возрастает с повышением температуры воздуха.



а)



б)

а) современное состояние, б) прогноз до 2035 г.

Рисунок 3 – Аккумулируемая энергия торфяно-болотными почвами

Из полученных результатов, приведенных в таблице 2, следует, что наиболее значительные изменения в аккумулируемой энергии происходят в почве без осушения, так как вода, находящаяся в почве, обладает большей, по сравнению с воздухом, заполняющим поры почвы, теплоемкостью. На осушенных почвах эти изменения не так заметны. Естественная почва аккумулирует большее количество тепловой энергии и более равномерно распределяет её по своему профилю. Вода, находящаяся в верхнем слое почвы, обладает большей инертностью к изменениям температуры атмосферного воздуха, что помогает растениям справляться с поздними заморозками весной и в целом повышает температуру корнеобитаемого слоя почвы, улучшает условия для произрастания сельскохозяйственных культур, характерных для более южных областей.

Как видно из таблицы 2, чем больше норма осушения почв, тем меньше изменения в аккумулируемой энергии почвы, следовательно, осушенные почвы в меньшей степени подвержены влиянию изменения климата.

Таблица 2 – Изменение аккумулируемой энергии почвой, 10^8 Дж

	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Без осушения	86,141	43,3098	45,653	50,5807	77,5095	44,1564	41,0736
Осушение на 0,4 м	78,5558	34,7229	37,4028	42,1441	59,4544	38,9218	34,4035
Осушение на 0,8 м	67,8192	27,3563	24,6425	31,2575	41,1987	24,3584	22,7997

В зависимости от теплоёмкости почва может поглотить только определённое количество теплоты. Так как процесс теплопередачи от верхних слоёв к нижним идёт довольно медленно, избыточная энергия будет дополнительно отражаться в окружающей среде. И как результат, приземный воздух нагревается сильнее, что приводит к его перемещению в области более низкого давления. Таким образом, эти воздушные массы уносят с собой тепловую энергию с осушенных территорий [22].

Заключение

По результатам моделирования теплового режима почв при изменении температуры до 2035 года вычислена энергия, аккумулируемая торфяно-болотной почвой. Наиболее заметно энергия возросла для заболоченной почвы. Изменение в аккумулируемой энергии оказалось наибольшим в апреле и составило величину порядка $86 \cdot 10^8 \text{ Дж}$, что соответствует росту на 7 % от исходного значения. Минимальный прирост энергии оказался в октябре и составил $41 \cdot 10^8 \text{ Дж}$, что соответствует росту на 3 %.

Мелиорация земель ускоряет процесс изменения подстилающей поверхности и теплофизических свойств почв, что оказывает влияние на тепловой режим торфяно-болотных почв Белорусского Полесья.

Потепление климата, и как следствие, повышение температуры почвы могут привести к возникновению благоприятных условий для произрастания сельскохозяйственных культур, характерных для более теплых регионов. Однако на мелиорированных торфяно-болотных почвах сохраняются более экстремальные условия для возделывания сельскохозяйственных культур, что выражается в значительном прогреве почвы в дневное время и охлаждению в ночные часы, в результате чего увеличивается количество заморозков и замедляется прогрев пахотного слоя весной, что может привести к частичной потере урожая.

Список цитированных источников

1. Журавлёв, М. З. Плодородие низинных болот подтаёжной зоны Иртыш-Ишимского междуречья и некоторые вопросы их сельскохозяйственного использования / М. З. Журавлёв // Науч. тр. ОмСХИ. – Омск, 1963. – Т. 1. – С. 61–70.
2. Моторин, А. С. Плодородие торфяных почв Западной Сибири / А. С. Моторин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2020. – № 1. – С. 16–22.
3. Курчевский, С. М. Сравнительная оценка пескования и глинования для повышения продуктивности торфяных почв / С. М. Курчевский, Э. И. Поднебесная // Агрехимический вестник. – 2013. – № 2. – С. 27–28.
4. Шеин, Е. В. Математическое моделирование в почвоведении : учебник / Е. В. Шеин, И. М. Рыжова. – М. : «ИП Маракушев А. Б.», 2016. – 377 с.

5. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов., А. А. Самарский. – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 799 с.
6. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р. А. Полуэктов [и др.]. – СПб. : Изд-во С-Петербур. ун-та, 2006. – 799 с.
7. Хворова, Л. А. Динамическое моделирование и прогнозирование в агрометеорологии / Л. А. Хворова, А. Г. Топаж – Барнаул : Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2010. – 262 с.
8. Шеин, Е. В. Курс физики почв / Е. В. Шеин. – М. : Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
9. Хворова, Л. А. Численное моделирование составляющих теплового режима почв Алтайского Приобья / Л. А. Хворова, А. В. Жариков // Журнал Известия АГУ. – 2013. – № 1. – Т. 1. – С. 126–130.
10. Волчек, А. А. Оценка влияния осушения на тепловой режим почв Полесья / А. А. Волчек, В. В. Борушко // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Научный и практический подходы к развитию и реализации технологий безопасности : сб. тезисов по материалам XVII Междун. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2021. – С. 57–58.
11. Природообустройство Полесья : монография : в 4 кн. / под общ. науч. ред. Ю. А. Мажайского [и др.]. – Рязань : Мещер. ф-л ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова», 2018. – Кн. 1 : Белорусское Полесье. – Т. 1 : Природно-ресурсный потенциал. – 408 с.
12. Борушко, В. В. К вопросу о влиянии осушения на тепловой режим мелиорированных земель Белорусского Полесья / В. В. Борушко, А. А. Волчек, В. И. Гладковский // Актуальные проблемы наук о земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды : сб. материалов междун. науч.-практ. конф., посвященной Году науки в Республике Беларусь, 25–27 сентября : в 2 ч. / БрГУ имени А. С. Пушкина. – Брест, 2017. – Ч. 2. – С. 6–9.
13. Дульнев, Г. Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М. : Высшая школа, 1990. – 208 с.
14. Борушко, В.В. Оценка влияния осушения на тепловой режим почв Полесья / В. В. Борушко, А. А. Волчек // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Научный и практический подходы к развитию и реализации технологий безопасности : сборник статей по материалам XVII Междун. науч.-практ. конф.. – Воронеж, 2021. – С. 368–374.
15. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учётом изменения климата / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 228 с.
16. WeatherOnline Ltd. - Meteorological Services [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Temperature - Brest - Climate Robot Belarus (weatheronline.co.uk). – Дата доступа: 10.12.2020.
17. Региональная физическая география. Климаты Земли: учеб.-метод. пособие : в 2 ч. / Е. М. Зубашенко [и др.]. – Воронеж : ВГПУ, 2007. – Ч. 1. – 183 с.
18. Гидрологические расчёты в мелиоративных целях: учебное пособие / В.С. Мезенцев [и др.]. – Омск : Омский СХИ, 1980. – Ч. 1. – 81 с.
19. Михайлюк, Ю. И. Ориентировочная основа действий при изучении химии элементов в курсе общей химии: учебное пособие / Ю. И. Михайлюк, А. К. Мазитова, Р. Р. Кудоярова. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2004. – 197 с.
20. Мажайский, Ю. А. Повышение продуктивности мелкозалежных торфяных почв при внесении минеральных добавок / Ю. А. Мажайский, С. М. Курчевский // Агротехнический вестник. – 2015. – № 1. – С. 15–17.
21. Игловиков, А. В. Физико-химические свойства и питательный режим нарушенных грунтов Крайнего Севера при биологической рекультивации / А. В. Игловиков, А. С. Моторин // Аграрный вестник Урала. – № 7 (99). – 2012. – С. 66–72.
22. Хабутдинов, Ю. Г. Учение об атмосфере: учебное пособие / Ю. Г. Хабутдинов, К. М. Шанталинский, А. А. Николаев. – Казань : КГУ, 2010. – 257 с.
2. Motorin, A. S. Plodorodie torfyanyh pochv Zapadnoj Sibiri / A. S. Motorin // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. – 2020. – № 1. – S 16–22.
3. Kurchevskij, S. M. Sravnitel'naya ocenka peskovaniya i glinovaniya dlya povysheniya produktivnosti torfyanyh pochv / S. M. Kurchevskij, E. I. Podnebesnaya // Agrohimicheskij vestnik. – 2013. – № 2. – S. 27–28.
4. Shein, E. V. Matematicheskoe modelirovanie v pochvovedenii : uchebnik / E. V. SHein, I. M. Ryzhova. – M. : «IP Marakushev A. B.», 2016. – 377 s.
5. Tihonov, A. N. Uravneniya matematicheskoy fiziki / A. N. Tihonov., A. A. Samarskij. – M. : Izd-vo MGU, 1999. – 799 s.
6. Modeli produkcionnogo processa sel'skohozyajstvennyh kul'tur / R. A. Poluektov [i dr.]. – SPb. : Izd-vo S-Peterb. un-ta, 2006. – 799 s.
7. Hvorova, L. A. Dinamicheskoe modelirovanie i prognozirovanie v agrometeorologii / L. A. Hvorova, A. G. Topazh – Barnaul : Izd-vo Altajskogo gos. un-ta, 2010. – 262 s.
8. Shein, E. V. Kurs fiziki pochv / E. V. SHein. – M. : Izd-vo MGU, 2005. – 432 s.
9. Hvorova, L. A. Chislennoe modelirovanie sostavlyayushchih teplovogo rezhima pochv Altajskogo Priob'ya / L. A. Hvorova, A. V. Zharikov // Zhurnal Izvestiya AGU. – 2013. – № 1. – Т. 1. – S. 126–130.
10. Volchek, A. A. Ocenka vliyaniya osusheniya na teplovoy rezhim pochv Poles'ya / A. A. Volchek, V. V. Borushko // Kompleksnye problemy tekhnosfernoj bezopasnosti. Nauchnyj i prakticheskij podhody k razvitiyu i realizacii tekhnologij bezopasnosti : sb. tezisov po materialam XVII Mezhdun. nauch.-prakt. konf. – Voronezh, 2021. – S. 57–58.
11. Prirodoobustrojstvo Poles'ya : monografiya : v 4 kn. / pod obshch. nauch. red. Yu. A. Mazhajskogo [i dr.]. – Ryazan' : Meshcher. f-l FGBNU «VNIIGiM im. A. N. Kostyakova», 2018. – Kn. 1 : Belorusskoe Poles'e. – Т. 1 : Prirodno-resursnyj potencial. – 408 s.
12. Borushko, V. V. K voprosu o vliyanii osusheniya na teplovoy rezhim meliorirovannyh zemel' Belorusskogo Poles'ya / V. V. Borushko, A. A. Volchek, V. I. Gladkovskij // Aktual'nye problemy nauk o zemle: ispol'zovanie prirodnyh resursov i sohranenie okruzhayushchej sredy : sb. materialov mezhdun. nauch.-prakt. konf., posvyashchyonnoj Godu nauki v Respublike Belarus', 25–27 sentyabrya : v 2 ch. / BrGU imeni A. S. Pushkina. – Brest, 2017. – CH. 2. – S. 6–9.
13. Dul'nev, G. N. Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploobmena / G. N. Dul'nev, V. G. Parfenov, A. V. Sigalov. – M. : Vysshaya shkola, 1990. – 208 s.
14. Borushko, V.V. Ocenka vliyaniya osusheniya na teplovoy rezhim pochv Poles'ya / V. V. Borushko, A. A. Volchek // Kompleksnye problemy tekhnosfernoj bezopasnosti. Nauchnyj i prakticheskij podhody k razvitiyu i realizacii tekhnologij bezopasnosti : sbornik statej po materialam XVII Mezhdun. nauch.-prakt. konf.. – Voronezh, 2021. – S. 368–374.
15. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchytom izmeneniya klimata / A. A. Volchek [i dr.]; pod obshch. red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva. – Brest : Aльтернатива, 2017. – 228 s.
16. WeatherOnline Ltd. - Meteorological Services [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: Temperature - Brest - Climate Robot Belarus (weatheronline.co.uk). – Data dostupa: 10.12.2020.
17. Regional'naya fizicheskaya geografiya. Klimaty Zemli: ucheb.-metod. Posobie : v 2 ch. / E. M. Zubashchenko [i dr.]. – Voronezh : VGPU, 2007. – CH. 1. – 183 s.
18. Hidrologicheskie raschyoty v meliorativnyh celyah: uchebnoe posobie / V.S. Mezencev [i dr.]. – Omsk : Omskij SKHI, 1980. – CH. 1. – 81 s.
19. Mihajlyuk, YU. I. Orientirovchnaya osnova dejstvij pri izuchenii himii elementov v kurse obshchej himii: uchebnoe posobie / Yu. I. Mihajlyuk, A. K. Mazitova, R. R. Kudoyarova. – Ufa : Izd-vo UGNTU, 2004. – 197 s.
20. Mazhajskij, YU. A. Povyshenie produktivnosti melkozaleznyh torfyanyh pochv pri vnesenii mineral'nyh dobavok / Yu. A. Mazhajskij, S. M. Kurchevskij // Agrohimicheskij vestnik. – 2015. – № 1. – S. 15–17.
21. Igl'ovikov, A. V. Fiziko-himicheskie svojstva i pitatel'nyj rezhim narushennyh gruntov Krajnego Severa pri biologicheskoy rekultivacii / A. V. Igl'ovikov, A. S. Motorin // Agrarnyj vestnik Urala. – № 7 (99). – 2012. – S. 66–72.
22. Habutdinov, Yu. G. Uchenie ob atmosfere: uchebnoe posobie / Yu. G. Habutdinov, K. M. Shantalinskij, A. A. Nikolaev. – Kazan' : KGU, 2010. – 257 s.

References

1. Zhuravlyov, M. Z. Plodorodie nizinyh bolot podtayochnoj zony Irtysh-Ishimskogo mezhdurech'ya i nekotorye voprosy ih sel'skohozyajstvennogo ispol'zovaniya / M. Z. Zhuravlyov // Nauch. tr. OmSKHI. – Omsk, 1963. – Т. 1. – С. 61–70.

Материал поступил в редакцию 01.06.2022

ОЦЕНКА ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОСБОРНЫХ БАССЕЙНОВ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕЛАРУСИ

А. А. Волчек¹, И. В. Окоронко²

¹ Д. геогр. н., профессор, декан факультета инженерных систем и экологии
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

² Старший преподаватель кафедры ботаники и экологии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина, Брест, Беларусь, e-mail: okoronko2007@ya.ru

Реферат

В статье представлена оценка гидроэкологического состояния элементарных водосборов бассейнов рек юго-западной части Беларуси (на примере рек Мухавец, Лесная, Пина и Ясельда) с использованием методики анализа посредством оценки различных показателей экологической защищенности, способствующих самовосстановлению территории элементарных водосборов и факторов антропогенной нагрузки. Научная новизна исследований заключается в использовании разработанной авторской методики оценки на основе матрицы атрибутивных показателей, позволяющей с учетом обобщенных балльных оценок выделить категории земель с различной гидроэкологической ситуацией, провести типизацию исследуемой территории по преобладающим видам антропогенных воздействий и степени экологической опасности.

Ключевые слова: гидроэкологическая оценка, гидрографическая сеть, речные бассейны, атрибутивные показатели, природные средообразующие факторы, факторы антропогенной нагрузки.

ASSESSMENT OF THE HYDROECOLOGICAL STATE OF THE DRAINAGE BASINS IN THE SOUTHWESTERN PART OF BELARUS

A. A. Volchak, I. V. Akoronka

Abstract

The article presents an assessment of the hydroecological state of the elementary watersheds in the river basins of the southwestern part of Belarus (using the Mukhavets, Lesnaya, Pina and Yaselda rivers as an example), using the analysis methodology by evaluating various indicators of environmental protection that contribute to the self-recovery of the territory of elementary watersheds and anthropogenic load factors. The scientific novelty of the research lies in the use of the assessment methodology developed by us on the basis of a matrix of attributive indicators, which allows, taking into account the generalized scoring, to identify categories of lands with different hydroecological situations, to typify the study area according to the prevailing types of anthropogenic impacts and the degree of environmental hazard.

Keywords: hydroecological assessment, hydrographic network, river basins, attributive indicators, natural environment-forming factors, factors of anthropogenic load.

Введение

В результате интенсивного освоения территории Белорусского Полесья происходит усиление антропогенной нагрузки на окружающую природную среду, что приводит в некоторых случаях к ухудшению качественного состояния поверхностных вод. Оценка природного потенциала водных ресурсов, факторов формирования их экологического состояния, поиск алгоритмов оптимизации рационального водопользования с применением современных методов ГИС-технологий обуславливает актуальность темы исследования. Главным условием нормального функционирования любой речной экосистемы является не только достаточность, но и надлежащее качество ее воды. Цель исследований заключается в оценке гидроэкологического состояния элементарных водосборов с использованием современных технологий. Объект исследования – речные бассейны юго-западной части Беларуси.

Река Мухавец – правый приток Западного Буга. Протекает преимущественно по Западному Полесью, берет начало от слияния ручья Муха и канала Вец в г. Пружаны, длина составляет 113 км. Основные притоки: Дахловка, Шевня, Жабинка, Яковчицкий канал (правые), Днепровско-Бугский канал, канал Ореховский, канал Бона, Тростяница, Осиповка и Рита (левые). Площадь водосборного бассейна – 5867 км². Ширина долины в среднем течении 400–600 м, в нижнем – 1,5–2 км. Пойма двусторонняя, низкая, местами заболочена. Русло канализовано. Берега низкие, высотой 0,5–2 м, обрывистые [1–4].

Река Лесная – правый приток Западного Буга. Длина реки составляет 85 км, образуется от слияния рек Правая Лесная и Левая Лесная. Исток расположен восточнее от д. Угляны Каменецкого района, устье на 0,5 км западнее от д. Теребунь Брестского района. Река Лесная протекает в Каменецком, Брестском и Пружанском районах, по Прибугской равнине и Брестскому Полесью, относится к бассейну Балтийского моря. Средняя ширина реки составляет 20–25 метров.

Река Ясельда – левый приток Припяти. Длина р. Ясельда составляет 250 км. Берёт исток из болота Дикое в 4 км к северу от д. Клепачи Пружанского района, вблизи восточной границы Национального парка «Беловежская пушча» и впадает в р. Припять в 3 км северо-западнее д. Качановичи Пинского р-на. Протекает по территории Пружанского, Березовского, Дрогичинского, Ивановского и Пинского районов Брестской обл. В верховье течёт по Прибугской равнине, далее по Припятскому Полесью, относится к бассейну Черного моря. Река имеет невыраженную долину шириной 2–4 км, максимальная ширина составляет 6–8 км. Пойма реки двусторонняя, в среднем течении имеет ширину 0,8–1,2 км, в нижнем – 1,5–6 км. Русло реки канализовано на протяжении 39 км от истока, а также 15 км на территории Березовского района. На неканализованных участках русло очень извилистое, имеет ширину 10–40 м, максимальная ширина – 80 м. Имеет правые (р. Кречет, р. Башта, р. Чернявка, р. Плёса, кан. Винец) и левые (р. Мацовка, р. Хотова, р. Федоска, р. Орля, р. Жигулянка, кан. Огинский) притоки.

Река Пина – левый приток Припяти. Длина реки составляет 40 км, ширина русла – 35–55 м, площадь водосборного бассейна чуть более 2 тыс. км². Исток реки находится южнее д. Переруб Ивановского района, однако некоторые исследователи считают, что исток реки расположен южнее д. Дубое Пинского района. Впадает р. Пина в р. Припять. В литературных источниках XIX – XX вв. указывается, что р. Пина является притоком р. Ясельды [35]. В 1960 году участок русла реки ниже по течению от г. Пинска был перекрыт дамбой и р. Пина стала левым притоком р. Припять. Река считается частью Днепровско-Бугского канала. Берега низкие, частично заболоченные. Русло реки претерпело значительные изменения во время строительства и реконструкции Днепровско-Бугского канала. Основными притоками являются канал Завищанский, реки Ленушка и Нивка (правые), реки Неслуха, Филиповка, Струга, Саморувка и Ляховичский канал (левые).

Методы исследования и исходные данные

Методика, использованная в данной работе, разработана и апробирована нами при оценке антропогенной нагрузки на элементарные водосборы рек Пина [5], Лесная [6], Ясельда [7] и Мухавец [8, 9]. Суть методики гидроэкологического анализа антропогенных воздействий на водосборы малых рек и водных объектов представляет собой определенную последовательность проведения следующих исследований [10-20].

1. Выбор операционной типологической единицы рассмотрения (элементарный водосбор, бассейн малой реки и др.). Посредством геоинформационного картирования было выделено 42 элементарных водосбора (рисунок 1).

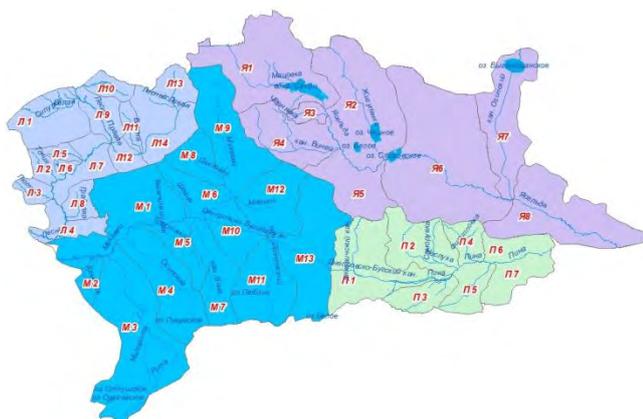


Рисунок 1 – Элементарные водосборы

2. Выявление основных природных средообразующих факторов, способствующих самовосстановлению территории элементарных водосборов и их количественная характеристика. Для каждого малого водосбора проводилась оценка природного фактора, способного в определенной мере компенсировать антропогенные воздействия. Таким образом проанализированы следующие показатели: заболоченность, лесистость, доля территорий под водными объектами, густота русловой сети, доля луговых территорий.

3. Выявление основных факторов антропогенной нагрузки и оценка их количественных характеристик. Оценка антропогенных факторов производилась по следующим показателям: антропогенное поступление азота и фосфора (кг/га), доля пахотных угодий и доля территорий населенных пунктов. Влияние сельского хозяйства оценивалось по животноводческой отрасли и растениеводству, оказывающих наибольшее негативное влияние на водные ресурсы и окружающую среду в целом. Антропогенная нагрузка от животноводства на выделенные водосборные территории оценивалась по объему твердых и жидких отходов и содержащемуся в них количеству действующего вещества.

Оценка поступления биогенных элементов (азот и фосфор) проводилась на основании анализа ряда экспериментальных работ [10-20] в соответствии с разработанной методикой на основании обработки полученной статистической информации по численности городского и сельского населения и показателям сельскохозяйственного производства (численность сельскохозяйственных животных, количество вносимых минеральных удобрений). В работе проведена количественная оценка поступления биогенов только от антропогенных источников, фоновые источники поступления азота и фосфора не учитывались.

По результатам экспериментальных работ было установлено, что распаханность территории в большей степени влияет на вынос органических веществ [19–20]. С пахотных угодий в 2–10 раз больше выносятся органических элементов, чем с лесных. Ландшафтная структура также влияет на вынос органических веществ, причем наибольшее количество выносятся с селитебных территорий, чем с естественных ландшафтов. Дерново-подзолистые почвы способны больше поглощать органических элементов, а с суглинистых почв азота и фосфора выносятся больше, чем с песчаных и супесчаных

почв. Именно сельскохозяйственные земли играют преобладающую роль в накоплении биогенных элементов на водосборах, следовательно, при разработке методики оценки БЭ на водные объекты, следует акцентировать именно на сельскохозяйственное производство и наибольшее негативное воздействие на окружающую среду оказывает система переработки и использования навоза и помета. Наряду с сельскохозяйственными и селитебными факторами, при оценке поступления БЭ следует учитывать и естественные природные факторы, поверхностный сток, эрозия, грунтовые воды, почвенные воды, дренажные воды, осадение из атмосферы. На основе анализа отечественных и зарубежных (ICECREAM, SOILN, FyrisNP) применяются преимущественно в Швеции и Финляндии [10, 12, 14, 20] методик определения выноса БЭ Институтом озероведения РАН – ИНОЗ РАН была разработана модель формирования биогенной нагрузки на водные объекты ILLM – Institute of Limnology Load Model [14, 18, 20].

Антропогенная нагрузка от животноводства на выделенные водосборные территории оценивалась по объему твердых и жидких отходов и содержащемуся в них количеству действующего вещества. Расчет биогенной нагрузки выполнялся исходя из численности проживающего населения. Для расчета эмиссии БЭ составлен полный перечень всех населенных пунктов и жителей (данные имеют географическую привязку), а также сведения о наличии либо отсутствии центральной канализации. В материалах HELCOM (исполнительный орган Конвенции по защите морской среды региона Балтийского моря от всех источников загрязнений и реализуется в рамках межправительственного сотрудничества Германии, Дании, Европейского союза, Латвии, Литвы, Польши, России, Финляндии, Швеции и Эстонии (Хельсинкская конвенция)) [20] расчет биогенной нагрузки $R_{общ}$ и $N_{общ}$ предлагается проводить при следующих значениях нагрузки от одного жителя: 0.9 кг P/год и 4.4 кг N/год.

При расчетах диффузного загрязнения принято, что при отсутствии центральной канализации нагрузка от населения поступает в подземный сток в пределах населенных пунктов и выносятся равномерно в течение года. При этом механическая очистка не сказывается на содержании биогенных элементов в сточных водах, а биологическая очистка сточных вод приводит к снижению концентрации $R_{общ}$ на 30 %, $N_{общ}$ на 50 %. Содержание $R_{общ}$ и $N_{общ}$ в отходах жизнедеятельности сельскохозяйственных животных, кг/год на 1 голову: КРС – 42,0, для свиней – 13,2, для птицы – 1,4, $N_{общ}$ для КРС – 82,1, для свиней – 31,2, для птицы – 1,5 [16, 18]. При определении количеств азота и фосфора, внесенных с минеральными удобрениями, использовалось соотношение NPK 22:11:11. В соответствии с требованиями HELCOM приняты ограничения по внесению не более 170 кг/га азота и не более 25 кг/га фосфора.

4. Картографирование выявленных природных и антропогенных факторов для выбранных типологических единиц рассмотрения. Для сбора данных и структурирования информации, а также выполнения визуализации и пространственного анализа данных была разработана геоинформационная система. Сравнительный анализ основных ГИС-пакетов (ArcGIS, MapInfo, ActiveMap GS, AutoCAD Map, ПроГео, Панорама и другие) показал, что наибольшими возможностями обладает пакет ArcGIS. Для реализации ГИС была выбрана полнофункциональная ГИС-платформа ArcGIS 10.3. Для обработки и анализа статистической информации были использованы приложения: MS Excel и SPSS Statistics. Основной целью создания геоинформационной системы является сбор, хранение, отображение, оценка и моделирование пространственных данных, характеризующих различные аспекты состояния водосборов для получения обобщенной координатно-привязанной информации. Необходимый материал был получен путем обработки картографических и справочных материалов. Все расчеты и картосхемы проводились с использованием приложения ArcGIS, позволяющего создавать различные электронные карты, проводить расчеты и моделирование. Картографическая база данных состоит из географического и оценочного блоков. Географический блок представлен набором векторных тематических слоев, отражающих гидроэкологическое состояние бассейнов, оценочный блок содержит синтетические и оценочные карты. Для создания картографической

базы использованы материалы различных исторических периодов, разновременные топографические карты, современные карты, космические снимки, данные некоммерческого веб-картографического проекта OpenStreetMap (OSM). Информация по различным показателям получена в результате дешифрирования и оцифровки карт OpenStreetMap высокого разрешения. При этом каждому идентифицированному участку соответствует атрибутивная таблица, содержащая информацию о количественных и качественных характеристиках по изучаемым показателям. Картографическая база данных охватывает географический блок, который включает тематические карты и оценочный блок, содержащий синтетические карты. Исходная статистическая база данных формировалась по справочным материалам землеустроительных служб, отчетам Брестского областного статистического комитета, сельских исполнительных комитетов, Проектного института Брестгипрозем, Брестского областного комитета природных ресурсов и охраны окружающей среды, Центрального научно-исследовательского института комплексного использования водных ресурсов, Брестской областной лаборатории аналитического контроля, Пинской межрайонной лаборатории аналитического контроля, а также комитета по сельскому хозяйству и продовольствию Брестского областного исполнительного комитета. Часть данных была получена с помощью созданной геоинформационной системы путём наложения различных тематических карт.

6. Составление матрицы характеристик природных факторов и антропогенной нагрузки в балльных показателях. Для оценки была использована трёхбалльная оценочная шкала с дополнительным баллом при отсутствии данного показателя в пределах водосбора. Для расчёта комплексных показателей положительной и отрицательной составляющих оценки использовался метод сложения соответствующих балльных значений показателей и последующего трёхуровневого равно-интервального ранжирования их суммы. На основании разработанной матрицы (рисунок 2) было выделено три типа элементарных водосборов по уровню современного гидроэкологического состояния: 1 – хорошее; 2 – удовлетворительное; 3 – неудовлетворительное.

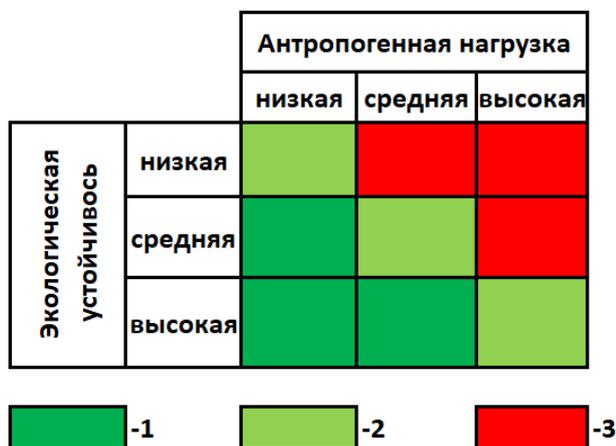
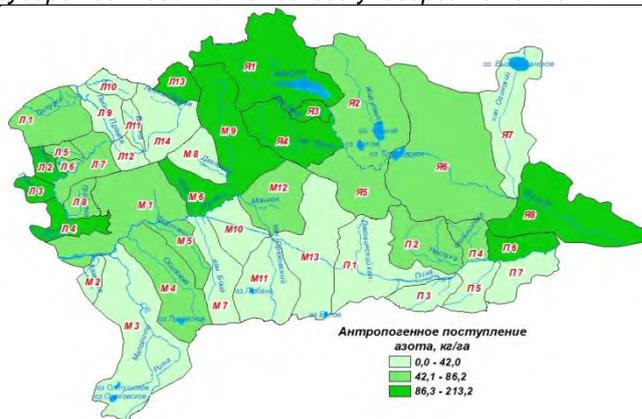


Рисунок 2 – Матрица (схема) типизации элементарных водосборов по гидроэкологическому состоянию

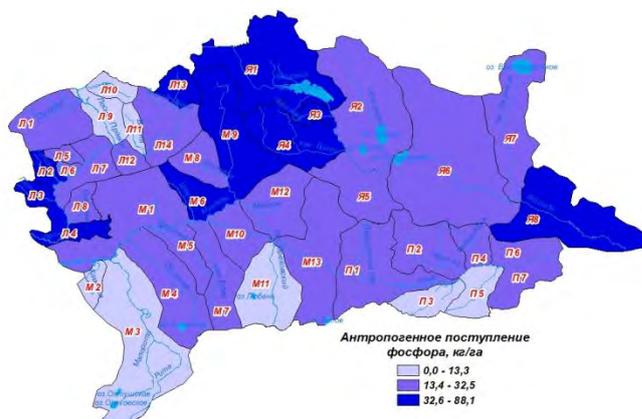
6. Гидроэкологическая типизация водосборных бассейнов по преобладающим видам антропогенных воздействий и степени экологической опасности.

Результаты и обсуждение

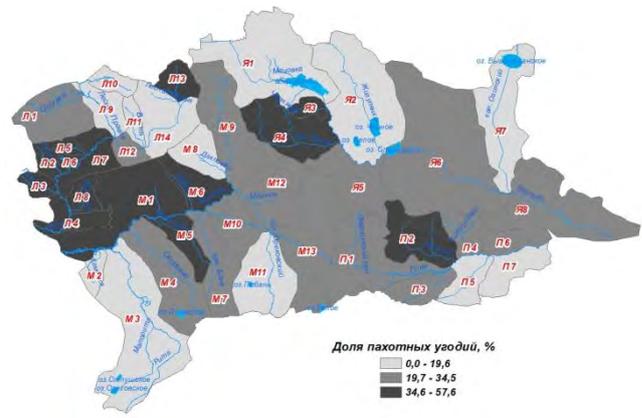
Результаты оценки величины антропогенной нагрузки представлены на рисунке 3.



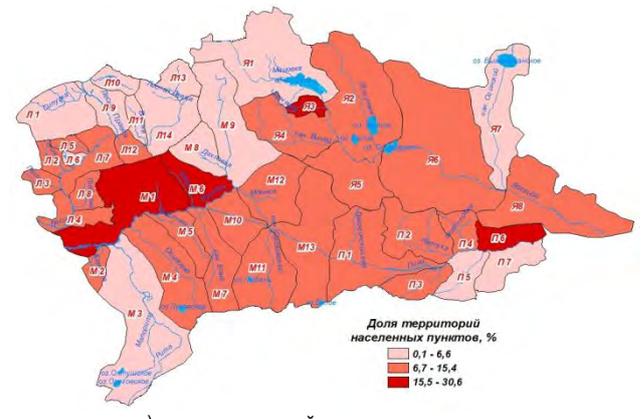
а) антропогенное поступление азота



б) антропогенное поступление фосфора



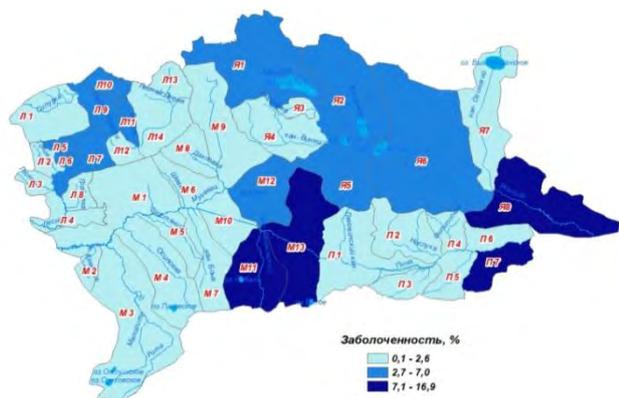
в) доля пахотных угодий



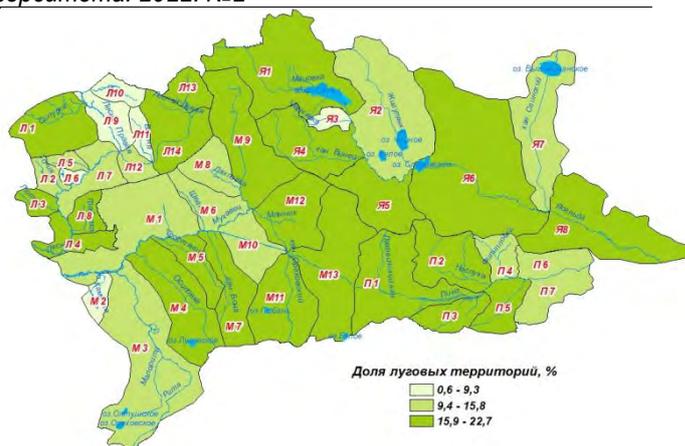
г) доля территорий населенных пунктов

Рисунок 3 – Факторы антропогенной нагрузки

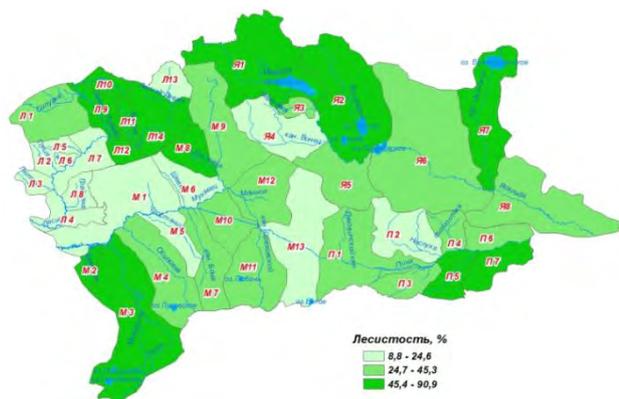
Результаты оценки факторов, способствующих самовосстановлению территории элементарных водосборов, представлены на рисунке 4.



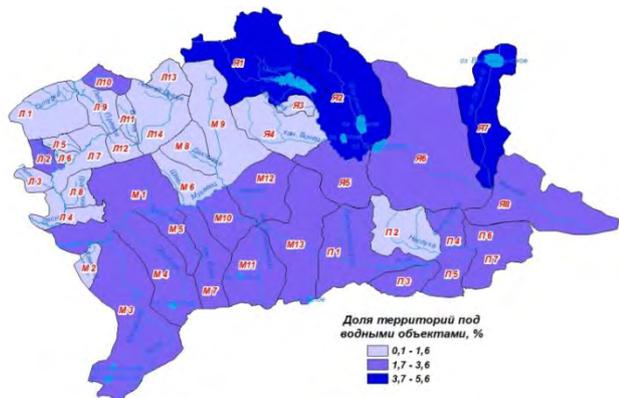
а) заболоченность



д) доля луговых территорий



б) лесистость



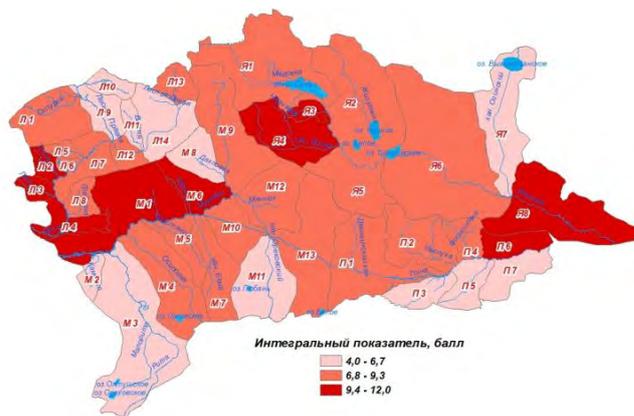
в) доля территорий под водными объектами



г) густота русловой сети

Рисунок 4 – Факторы, способствующие самовосстановлению территории элементарных водосборов

На основе трёхинтервального ранжирования антропогенных оценочных показателей и показателей способности территории к самовосстановлению были рассчитаны общие интегральные показатели, представленные на рисунке 5.



а) антропогенной нагрузки



б) способности территории к самоочищению

Рисунок 5 – Интегральные оценочные показатели

Результаты типизации элементарных водосборов по величине гидроэкологической напряженности представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Гидроэкологическая типизация водосборных бассейнов

Хорошая гидроэкологическая ситуация выявлена на 38,6 % исследуемой территории, удовлетворительная – на 36,8 %, а неудовлетворительная – 24,6 % территории речных бассейнов.

Неудовлетворительная гидроэкологическая ситуация приурочена в основном к элементарным водосборам, расположенным в северо-западной и юго-восточной частях исследуемой территории. Это преимущественно элементарные водосборы, для которых характерны высокие показатели антропогенной освоенности. На данных водосборах фиксируются наибольшие показатели плотности населения, доли городских территорий, высокий уровень урбанизации и в целом высокая численность населения. Наряду с этим данные регионы характеризуются высокими показателями сельскохозяйственной освоенности. Здесь высока доля пашни, наибольшая численность сельскохозяйственных животных, высокие дозы внесения органических и минеральных удобрений.

Для элементарных водосборов с неудовлетворительной гидроэкологической ситуацией рекомендовано изменить текущую систему природопользования. Необходимо пересмотреть существующую структуру земельных угодий, при этом сократить долю сельскохозяйственных земель, а соответственно увеличить долю природных биоценозов (лесных, луговых, болотных). Для урбанизированных водосборов рекомендуется развивать сельскую инфраструктуру и города-спутники. Например, г. Жабинка – город-спутник г. Бреста, расположен в 30 км от областного центра и в последние время характеризуется высоким показателем прироста населения. По материалам переписи населения на 1 января 2019 г. это единственный районный центр Беларуси, где население за один год увеличилось на 1,2 тыс. чел. и сегодня составляет 13,2 тыс. чел. Прогнозируется, что к 2025 году население города-спутника увеличится почти вдвое и составит 22 тыс. чел.

Для малых водосборов с неудовлетворительной гидроэкологической ситуацией рекомендовано:

- сокращение численности поголовья сельскохозяйственных животных;
- уменьшение доз внесения органических и минеральных удобрений;
- контроль сроков внесения органических и минеральных удобрений;
- контроль суммарных доз внесения органических и минеральных удобрений с учетом возделываемых культур и погодных условий;
- запрет на размещение крупных животноводческих комплексов вблизи водных объектов;
- контроль за отходами животноводства вблизи животноводческих комплексов;
- контроль за внесением и складированием отходов животноводства;
- сокращение доли пахотных угодий, с одновременным увеличением площадей природных экосистем (лесной и луговой растительности);
- обеспечение сельского населения центральной канализацией;
- контроль содержания нитратов в поверхностных и подземных водах.

Для малых водосборов с удовлетворительной гидроэкологической ситуацией рекомендована оптимизация антропогенной нагрузки и поддержание ее на текущем уровне с обязательным мониторингом и контролем состояния природных ресурсов.

Для малых водосборов с хорошей гидроэкологической ситуацией рекомендована разработка перспективного плана их рационального использования.

Заключение

Для исследуемой территории, с использованием бассейнового подхода, проведено гидрографическое районирование речных бассейнов юго-западной части Беларуси, выделены 42 элементарных водосборов, оцифрован картографический материал, собраны статистические данные, создана база данных по различным физико-географическим, социально-экономическим и эколого-гидрографическим показателям.

Предложена методика для типизации элементарных водосборов по величине гидроэкологической напряженности территории водосборных бассейнов юго-западной части Беларуси, основанная на индикаторном подходе. Методика включает математико-статистический расчёт индексов по двум оценочным блокам: величина антропогенной нагрузки и способность территории элементарных водосборов к самовосстановлению.

Наибольшие интегральные показатели антропогенной нагрузки выявлены на 9 элементарных водосборах. Для 8 элементарных водосборов присущи наибольшие показатели природных факторов, способствующих самовосстановлению территории.

Проанализировав выделенные оценочные индикаторы и проведя комплексную типизацию элементарных водосборов по остроте гидроэкологической ситуации, было установлено, что хорошая гидроэкологическая ситуация наблюдается на 38,6 % исследуемой территории, удовлетворительная – на 36,8 %, а неудовлетворительная – на 24,6 % территории речных бассейнов.

Согласно полученным результатам предложены направления и рекомендации по оптимизации природопользования в речных бассейнах юго-западной части Беларуси.

Список цитированных источников

1. Блакітная кніга Беларусі: Энцыклапедыя / рэдкал.: Н. А. Дзісько [і інш.]. – Мінск : БелЭн, 1994. – 415 с.
2. Волчек, А. А. Водные ресурсы Брестской области / А. А. Волчек, М. Ю. Калинин. – Минск : Изд. Центр БГУ, 2002. – 440 с.
3. Рэкі, азёры і вадасховішчы Беларусі / Энцыклапедычная бібліятэчка «Беларусь». – Мінск : БелЭн, 1979. – 216 с.
4. Блакітны скарб Беларусі: Рэкі, азёры, вадасховішчы / Маст. : Ю. А. Тарэў, У. І. Цярэнцёў. – Мінск : БелЭн, 2007. – 480 с.
5. Окоронко, И. В. Оценка антропогенной нагрузки на р. Пина с применением ГИС-технологий / И. В. Окоронко // Вестник Брестского государственного университета. Сер. 5. Химия. Биология. Науки об окружающей среде. – 2020. – № 1. – С. 112–122.
6. Волчек, А. А. Оценка антропогенной преобразованности водосборов малой реки (на примере реки Лесной) / А. А. Волчек, И. В. Окоронко // Земля Беларуси. – 2021. – № 1. – С. 51–59.
7. Волчек, А. А. Оценка гидроэкологической ситуации в пределах малых водосборов бассейна реки Ясельды / А. А. Волчек, И. В. Окоронко // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 49–61.
8. Волчек, А. А. Биогенные элементы на малых водосборах реки Мухавец / А. А. Волчек, И. В. Окоронко // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках : материалы междунар. науч.-практ. оч.-заоч. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, 60-летию каф. физ. географии и образоват. технологий, 100-летию со дня рождения проф. О. Ф. Якушко, Минск, 24–26 марта 2021 г. / Белорус. гос. ун-т ; под общ. ред. П. С. Лопуха; редкол.: П. С. Лопух (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2021. – С. 340–345.
9. Волчек, А. А. Оценка гидроэкологической ситуации малых водосборов бассейна реки Мухавец / А. А. Волчек, И. В. Окоронко // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: сб. тезисов докладов IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та

- и 50-летию ф-та инженерных систем и экологии, Брест, 7-8 октября 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: А. А. Волчек [и др.]; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест: БрГТУ, 2021. – С. 20–21.
10. Ясинский, С. В. Геоэкологический анализ антропогенных воздействий на водосборы малых рек / С. В. Ясинский // Известия АН. Сер. географическая. – 2000. – № 4. – С. 74–82.
 11. Мухина, Л. И. Принципы и методы технологической оценки природных комплексов / Л. И. Мухина. – М.: Наука, 1973. – 96 с.
 12. Методика определения биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства / А. Ю. Брюханов [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – № 89. – С. 175–183.
 13. Ясинский, С. В. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе / С. В. Ясинский, Е. В. Веницианов, И. А. Вишневская // Вод. ресурсы. – 2019. – Т. 46, № 2. – С. 232–244.
 14. Кондратьев, С. А. Структура поверхности водосбора как определяющий фактор биогенной нагрузки на водоем (по данным математического моделирования) / С. А. Кондратьев, А. Ю. Брюханов, А. В. Терехов // Вопр. географии. – 2018. – № 145. – С. 89–108.
 15. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты / С. А. Кондратьев [и др.] // Региональная экология. – 2011. – № 3–4. – С. 50–59.
 16. Антропогенная нагрузка на водосбор и ее учет при оценке выноса биогенных элементов в крупный водный объект (на примере Чебоксарского водохранилища) / С. В. Ясинский [и др.] // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. науч. тр. – М.: Студия Ф1, 2019. – С. 487–491.
 17. Методика определения биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства / А. Ю. Брюханов [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – № 89. – С. 175–183.
 18. Ясинский, С. В. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе / С. В. Ясинский, Е. В. Веницианов, И. А. Вишневская // Вод. ресурсы. – 2019. – Т. 46, № 2. – С. 232–244.
 19. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты / С. А. Кондратьев [и др.] // Региональная экология. – 2011. – № 3–4. – С. 50–59.
 20. HELCOM Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). – Helsinki: HELCOM, 2005. – 80 p.
 7. Volchek, A. A. Ocenka gidroekologicheskoj situacii v predelakh malyh vodosborov bassejna reki YAsel'dy / A. A. Volchek, I. V. Okoronko // Prirodopol'zovanie. – 2021. – № 1. – С. 49–61.
 8. Volchek, A. A. Biogennye elementy na malyh vodosborah reki Muhavec / A. A. Volchek, I. V. Okoronko // Razvitiye geograficheskikh issledovanij v Belarusi v XX–XXI vekah: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. och.-zaoch. konf., posvyashch. 100-letiyu Belarus. gos. un-ta, 60-letiyu kaf. fiz. geografii i obrazovat. tekhnologii, 100-letiyu so dnya rozhdeniya prof. O. F. YAkushko, Minsk, 24–26 marta 2021 g. / Belarus. gos. un-t; pod obshch. red. P. S. Lopuha; redkol.: P. S. Lopuh (gl. red.) [i dr.]. – Minsk: BGU, 2021. – С. 340–345.
 9. Volchek, A. A. Ocenka gidroekologicheskoj situacii malyh vodosborov bassejna reki Muhavec / A. A. Volchek, I. V. Okoronko // Aktual'nye nauchno-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya: sb. tezisov dokladov IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 55-letiyu Brest. gos. tekhn. un-ta i 50-letiyu f-ta inzhenernykh sistem i ekologii, Brest, 7-8 oktyabrya 2021 g. / Brest. gos. tekhn. un-t; redkol.: A. A. Volchek [i dr.]; nauch. red. A. A. Volchek, O. P. Meshik. – Brest: BrGTU, 2021. – С. 20–21.
 10. Yasinskij, S. V. Geoekologicheskij analiz antropogennykh vozdeystvij na vodosbory malyh rek / S. V. YAsinskij // Izvestiya AN. Ser. geograficheskaya. – 2000. – № 4. – С. 74–82.
 11. Muhina, L. I. Principy i metody tekhnologicheskoj ocenki prirodnykh kompleksov / L. I. Muhina. – M.: Nauka, 1973. – 96 s.
 12. Metodika opredeleniya biogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty ot sel'skohozyajstvennogo proizvodstva / A. YU. Bryuhanov [i dr.] // Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva. – 2016. – № 89. – С. 175–183.
 13. Yasinskij, S. V. Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov i ocenka vynosa biogennykh elementov pri razlichnykh scenariyah zemlepol'zovaniya na vodosbore / S. V. Yasinskij, E. V. Venicianov, I. A. Vishnevskaya // Vod. resursy. – 2019. – Т. 46, № 2. – С. 232–244.
 14. Kondrat'ev, S. A. Struktura poverhnosti vodosbora kak opredelyayushchij faktor biogennoj nagruzki na vodoem (po dannym matematicheskogo modelirovaniya) / S. A. Kondrat'ev, A. Yu. Bryuhanov, A. V. Terekhov // Voпр. geografii. – 2018. – № 145. – С. 89–108.
 15. Metod rascheta biogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty / S. A. Kondrat'ev [i dr.] // Regional'naya ekologiya. – 2011. – № 3–4. – С. 50–59.
 16. Antropogennaya nagruzka na vodosbor i ee uchet pri ocenke vynosa biogennykh elementov v krupnyj vodnyj ob'ekt (na primere CHEboksarskogo vodohranilishcha) / S. V. YAsinskij [i dr.] // Nauchnye problemy ozdorovleniya rossijskikh rek i puti ih resheniya: sb. nauch. tr. – M.: Studiya F1, 2019. – С. 487–491.
 17. Metodika opredeleniya biogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty ot sel'skohozyajstvennogo proizvodstva / A. YU. Bryuhanov [i dr.] // Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva. – 2016. – № 89. – С. 175–183.
 18. Yasinskij, S. V. Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov i ocenka vynosa biogennykh elementov pri razlichnykh scenariyah zemlepol'zovaniya na vodosbore / S. V. Yasinskij, E. V. Venicianov, I. A. Vishnevskaya // Vod. resursy. – 2019. – Т. 46, № 2. – С. 232–244.
 19. Metod rascheta biogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty / S. A. Kondrat'ev [i dr.] // Regional'naya ekologiya. – 2011. – № 3–4. – С. 50–59.
 20. HELCOM Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). – Helsinki: HELCOM, 2005. – 80 p.

References

1. Blakitnaya kniga Belarusi: Encyklopedyya / redkal.: N. A. Dzis'ko [i insh.]. – Minsk: BelEn, 1994. – 415 s.
2. Volchek, A. A. Vodnye resursy Brestskoj oblasti / A. A. Volchek, M. Yu. Kalinin. – Minsk: Izd. Centr BGU, 2002. – 440 s.
3. Reki, azyory i vadaskhovishchy Belarusi / Encyklopedychnaya bibliyatechka «Belarus'». – Minsk: BelEn, 1979. – 216 s.
4. Blakitny skarb Belarusi: Reki, azery, vadaskhovishchy / Mast.: Yu. A. Tarey, U. I. Syarenc'eŷ. – Minsk: BelEn, 2007. – 480 s.
5. Okoronko, I. V. Ocenka antropogennoj nagruzki na r. Pina s primeneniem GIS-tekhnologii / I. V. Okoronko // Vesnik Bresckaga ŷniversiteta. Ser. 5. Himiya. Biyalogiya. Navuki ab zyamli. – 2020. – № 1. – С. 112–122.
6. Volchek, A. A. Ocenka antropogennoj preobrazovannosti vodosborov maloj reki (na primere reki Lesnoj) / A. A. Volchek, I. V. Okoronko // Zemiya Belarusi. – 2021. – № 1. – С. 51–59.

Материал поступил в редакцию 14.05.2022

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЫБХОЗА «ЛАХВА» НА СТОК РЕКИ СМЕРДЬ*

А. А. Волчек¹, С. И. Парфомук², Н. Н. Шешко³,
Н. Н. Шпендик⁴, Д. Н. Дашкевич⁵, С. В. Сидак⁶, М. Ф. Кухаревич⁷

¹ Д. геогр. н., профессор, декан факультета инженерных систем и экологии

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь; e-mail: volchak@tut.by

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь; e-mail: parfom@mail.ru

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры природообустройства

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь; e-mail: optimum@tut.by

⁴ К. геогр. н., доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь; e-mail: shpendik@tut.by

⁵ Ст. преподаватель кафедры природообустройства

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь; e-mail: dionis1303@mail.ru

⁶ Магистр физ.-мат. н., ассистент кафедры информатики и прикладной математики

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь; e-mail: harchik-sveta@mail.ru

⁷ Магистр тех. н., аспирант кафедры природообустройства

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь; e-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

Реферат

Выполнена комплексная оценка воздействия рыбхоза «Ляхва» на гидрологический режим р. Смердь в расчетных участках. В работе использовались следующие методы: полевые исследования, камеральная обработка данных, географический анализ, статистический анализ, регрессионный анализ, водобалансовые расчеты. Проведенный анализ гидрологического режима расчетных участков реки, используемых для нужд рыбхоза, позволил определить минимальный среднемесячный расход воды 95 % вероятности превышения и экологический сток с учетом внутригодового распределения стока. Для центрального участка рыбхоза «Ляхва» определен допустимый объем изъятия водных ресурсов из р. Смердь.

Ключевые слова: рыбоводное хозяйство, рекогносцировочное обследование, экологический сток, расход воды, математическая модель, водность года.

ASSESSMENT OF THE LAHVA FISH FARM IMPACT ON THE SMERD RIVER RUNOFF

A. A. Volchak, S. I. Parfomuk, N. N. Sheshko, N. N. Shpendik, D. N. Dashkevich, S. V. Sidak, M. F. Kukharevich

Abstract

A comprehensive assessment of the fish farm "Lahva" impact on the hydrological regime of the Smerd River was carried out. The following methods were used in the work: field research, desk data processing, geographical analysis, statistical analysis, regression analysis, water balance calculations. The analysis of the hydrological regime of the calculated sections of the river used for the needs of the fish farm made it possible to determine the minimum average monthly water runoff of 95% probability of excess and ecological runoff taking into account the intra-annual runoff distribution. The permissible volume of the water resources withdrawal from the Smerd River for the central section of the fish farm "Lahva" has been determined.

Keywords: fish farming, reconnaissance survey, ecological runoff, water consumption, mathematical model, water content of the year.

Введение

Рыбоводная деятельность в Беларуси осуществляется по двум основным направлениям – рыбоводство (разведение и выращивание рыбы в искусственных водоемах) и ведение рыболовного хозяйства в рыболовных угодьях. Рыбоводство представлено следующими видами: прудовое рыбоводство, выращивание рыбы в садках, бассейнах и установках замкнутого водообеспечения. Площадь прудового фонда республики, пригодного для использования в рыбоводстве, составляет 22,46 тыс. га [1, 2]. Такая хозяйственная деятельность неизбежно оказывает воздействие на естественные водотоки, которые являются источником водных ресурсов рыбоводческих хозяйств. Нами выполнено исследование влияния хозяйственной деятельности центрального отделения рыбхоза «Ляхва» ОАО «Пинскводстрой» на водный режим р. Смердь.

Филиал «Опытный рыбхоз «Ляхва»» – это крупное полносистемное карповое хозяйство, которое обеспечивает производство полного цикла от получения личинки до выращивания товарной рыбы. Центральная усадьба рыбхоза расположена в д. Ляхва Лунинецкого района (рисунок 1). Хозяйство организовано в 1936 г. В начале деятельности рыбхоз располагал крайне ограниченными прудовыми площадями и бедными рыбопромысловыми угодьями. За последние годы хозяйство значительно укрупнилось. В состав его на правах отделений вошли бывший рыбхоз «Столин» (ныне отделение «Дуброва»), а также участки «Морщиновичи» и «Выгоны». Они находятся от центра рыбхоза на расстоянии от 20 до 150 км. В настоящее время рыбхоз «Ляхва» является многоотраслевым хозяйством.

Он, в отличие от других предприятий, занимается не только искусственным разведением товарной прудовой рыбы и посадочного материала, но также освоением естественных водоемов и выращиванием товарной утки. За период реализации подпрограммы 5 «Развитие рыбоводной деятельности» Государственной программы на 2016–2020 годы введен цех по переработке рыбы в филиале «Опытный рыбхоз «Ляхва» мощностью 93 тонны готовой продукции в год.

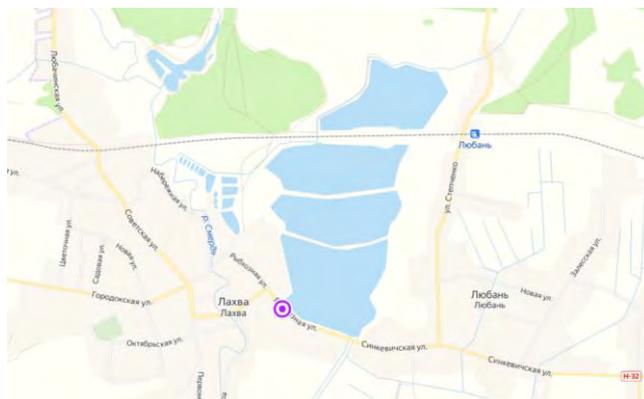


Рисунок 1 – Схема расположения прудов центрального участка филиала «Опытный рыбхоз «Ляхва»» ОАО «Пинскводстрой»

Смердь – река в Лунинецком районе Брестской области, левый приток р. Припять. Длина 37 км. Площадь водосбора 502 км². Среднегодовой расход воды в устье 2,00 м³/с. Средний уклон водной поверхности 0,3 ‰. Лесистость территории водосбора 36 % (леса смешанные с преобладанием хвойных пород). Начинается от слияния 2 каналов в 1,5 км к северо-западу от д. Мижлесье, устье в 4 км к юго-западу от д. Лаховка. Долина невыраженная, сливается с прилегающей местностью. Пойма высокая, местами заболоченная, ширина 200–300 м. Русло в верховьях канализировано, на остальном протяжении извилистое, ширина 5–10 м, в нижнем течении до 15 м. Берега крутые, местами очень крутые и обрывистые, высота до 1 м. На период весеннего половодья приходится 65 % объема годового стока. Река питает пруды рыбхоза «Лахва» [1, 3].

Методы исследования и исходные данные

Ввиду отсутствия регулярных гидрометрических наблюдений расчеты гидрологических характеристик осуществлялись для случая отсутствия данных наблюдений в соответствии с ТКП 45-3.04-168-2009 [3]. Методика расчета минимального и экологического стока детально изложена в нашей работе [4]. На основании экологического стока рассчитывается величина допустимого изъятия водных ресурсов для рыбохозяйственных прудов, которая используется при анализе и оценке уровня воздействия на водный режим реки. В качестве критерия уровня воздействия предложено использовать соотношение текущего объема изъятия воды рыбохозяйственным предприятием к доступному объему изъятия при различных условиях, на основании цветовой индикации (таблица 1).

Таблица 1 – Зоны уровня воздействия рыбохозяйственных предприятий на водный режим рек

Зона	Критерий отнесения
Зеленая зона	Объем изъятия воды не превышает доступный при расчетном экологическом стоке 95 % вероятности превышения
Желтая зона	Объем изъятия воды превышает доступный при расчетном экологическом стоке 95 % вероятности превышения, но меньше критического значения экологического стока, принимаемого как 0,75 от минимального месячного стока 95 % обеспеченности
Красная зона	Объем изъятия превышает максимально допустимый при расчетном критическом значении экологического стока

С целью более эффективного управления и анализа деятельности рыбохозяйственных предприятий зеленую зону можно разделить на 2 подзоны:

1. Зеленая зона, подзона 1 – объем изъятия воды не превышает доступный объем при расчетном экологическом стоке 75 % вероятности превышения;
2. Зеленая зона, подзона 2 – объем изъятия воды превышает доступный при расчетном экологическом стоке 75 % вероятности превышения, но меньше в случае экологического стока 95 % вероятности превышения.

Для каждой зоны и подзоны рекомендуются действия с целью обеспечения допустимого уровня воздействия на водные объекты хозяйственной деятельности рыбохозяйственных предприятий (таблица 2).

Таблица 2 – Допустимые уровни воздействия хозяйственной деятельности рыбохозяйственных предприятий на водные объекты по зонам

Зона	Уровень воздействия на водные объекты
Зеленая зона, подзона 1	Уровень воздействия на водные объекты значительно ниже допустимых его значений. Рекомендуется сохранить текущий уровень воздействия без его увеличения.

Продолжение таблицы 2

Зона	Уровень воздействия на водные объекты
Зеленая зона, подзона 2	Уровень воздействия на водные объекты значительно ниже допустимого, однако в отдельные маловодные и экстремально маловодные периоды может наблюдаться напряженная экологическая обстановка в акватории. Рекомендуется рыбохозяйственным предприятиям разрабатывать план действий для очень маловодных лет.
Желтая зона	Уровень воздействия на водные объекты превышает допустимый. Предприятиям необходимо пересматривать водохозяйственный баланс и, возможно, технологию по выращиванию рыбы.
Красная зона	Критический уровень воздействия хозяйственной деятельности на водный объект. Данный уровень воздействия незамедлительно должен быть снижен, а также должен быть проведен дополнительный анализ деятельности предприятия как в части обоснованности текущего уровня производства продукции, так и возможности вовлечения иных источников водных ресурсов. Данная зона является полностью неприемлемой с точки зрения сохранения водотоков и их экосистем.

Результаты исследования и их обсуждения

Для количественной оценки влияния рыбхоза «Лахва» на сток р. Смердь в июне 2021 года нами выполнены гидрометрические измерения расхода воды в створах, расположенных выше и ниже рыбхоза, по методике изложенной в [5, 6]. Верхний створ р. Смердь был установлен на северной окраине д. Лахва, которая в свою очередь находится на юго-востоке Лунинецкого района (Брестская область) (рисунок 2).

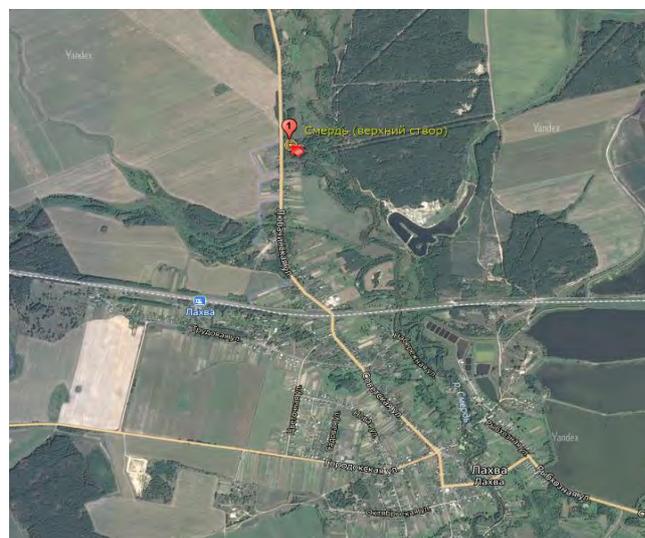


Рисунок 2 – Карта-схема расположения верхнего створа

Русло в пределах исследуемого створа врезано в рельеф на значительную глубину, в связи с этим левый берег имеет высоту около 3–5 м, обрывистое. Ширина русла в пределах створа составила 11–14 м. Форма реки в районе створа извилистая. Береговая линия песчаная и покрыта травяной, древесной и кустарниковой растительностью. Дно реки на участке створа илистое (рисунок 3).



Рисунок 3 – Участок исследования в верхнем створе

По результатам промеров глубин в верхнем створе построен поперечный профиль р. Смердь (рисунок 4) и определены основные характеристики на момент изысканий: расход воды $Q = 2,88 \text{ м}^3/\text{с}$; площадь поперечного сечения $F = 17,78 \text{ м}^2$; ширина реки по урезу воды $B = 12,0 \text{ м}$; средняя глубина потока $h_{\text{ср.}} = 1,48 \text{ м}$; средняя скорость течения воды $V_{\text{ср.}} = 0,16 \text{ м/с}$; максимальная скорость $V_{\text{max}} = 0,257 \text{ м/с}$; уклон водной поверхности $i_{\text{пов}} = 0,264 \text{ ‰}$.

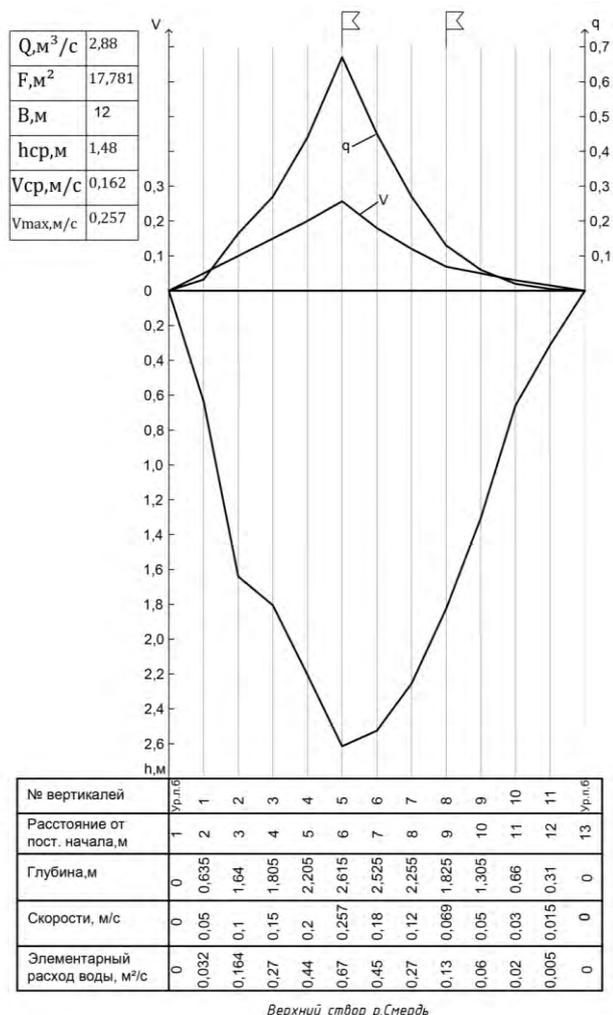


Рисунок 4 – Поперечный профиль р. Смердь в верхнем створе

Нижний створ реки Смердь расположен в 0,5 км на юг от д. Лахва Лунинецкого района (Брестская область) (рисунок 5).

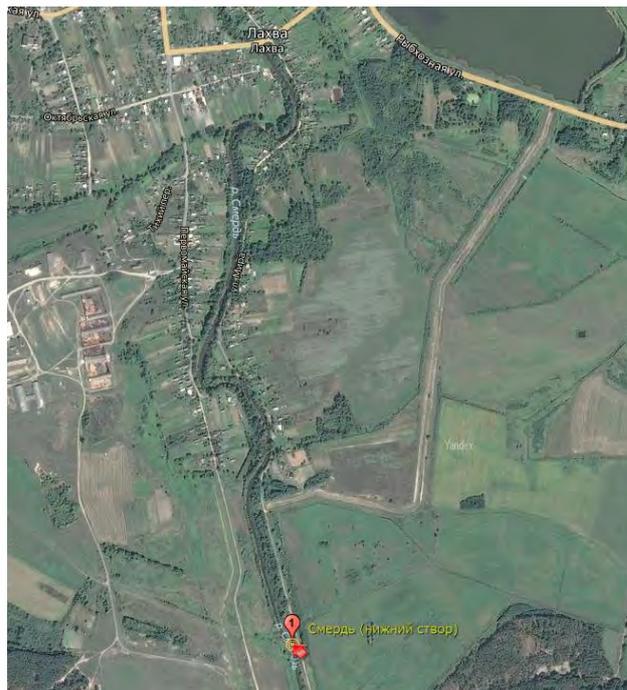


Рисунок 5 – Карта-схема нижнего створа р. Смердь

Русло реки на участке створа имеет достаточно сложную конфигурацию, на правом берегу присутствует значительное количество водной растительности шириной в несколько метров. Ширина всего русла составляет 35 м, без учёта заросшей зоны – 18 м. Правая часть русла полностью покрыта растительностью, имеет глубину в пределах 0,2 м, течение воды отсутствует. Левая береговая линия покрыта у самого края реки преимущественно густыми кустарниками. Также в большом количестве присутствует травяная растительность. Левый берег песчаный, тогда как правый торфянистый. Дно в створе илистое (рисунок 6).

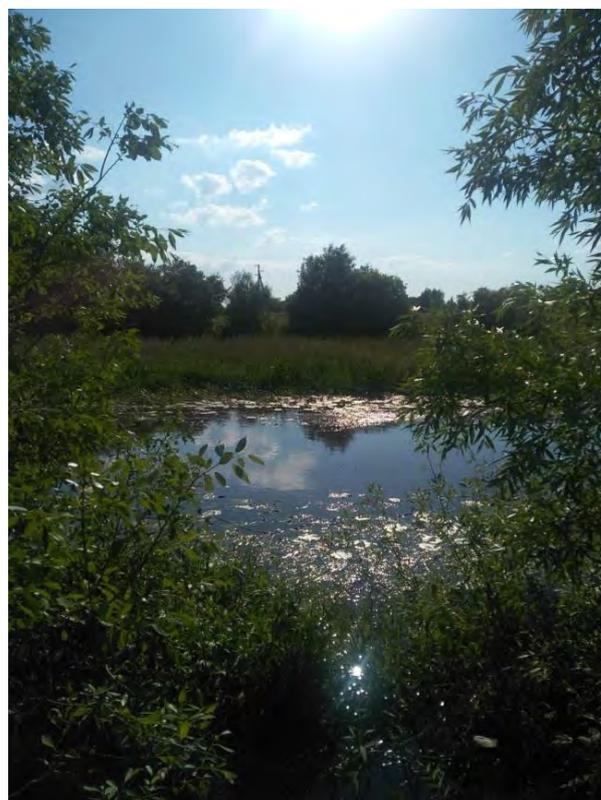


Рисунок 6 – Участок исследования в нижнем створе

По результатам промеров глубин в верхнем створе построен поперечный профиль р. Смердь (рисунок 7) и определены основные характеристики на момент изысканий: расход воды $Q = 3,35 \text{ м}^3/\text{с}$; площадь поперечного сечения $F = 14,03 \text{ м}^2$; ширина реки по урезу воды $B = 36,00 \text{ м}$; средняя глубина потока $h_{\text{ср.}} = 0,47 \text{ м}$; средняя скорость течения воды $V_{\text{ср.}} = 0,24 \text{ м/с}$; максимальная скорость $V_{\text{max}} = 0,334 \text{ м/с}$; уклон водной поверхности $i_{\text{пов}} = 0,264 \text{ }^0/_{00}$.

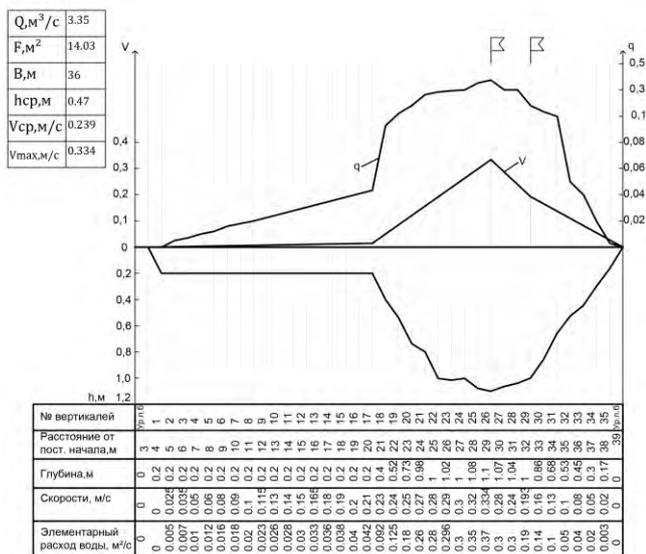


Рисунок 7 – Поперечный профиль р. Смердь в нижнем створе

Сравнительный анализ исследуемых створов показал существенное их различие. Так участок реки в нижнем створе требует чистки русла. Из количественных характеристик обращает на себя внимание увеличение расхода воды в нижнем створе $\Delta Q = 0,47 \text{ м}^3/\text{с}$. Это вызвано дополнительным сбросом воды с поверхности рыбководных прудов.

По результатам обработки данных гидрометрических измерений построены математические модели (расходы/уровни/скорости) и кривые связи скорости/расхода и уровня воды в створе, по методике, описанной в [7, 8, 9]. В качестве особенности следует отметить, что применение кривых связи допустимо только в пределах установленного диапазона. Применение экстраполяции допустимо, однако может приводить к значительным отклонениям и погрешностям.

Для верхнего створа:

$$V = -0,0168h_{\text{ср.}}^3 + 0,0421h_{\text{ср.}}^2 + 0,0825h_{\text{ср.}}$$

$$Q = 1,0154h_{\text{ср.}}^3 - 0,4067h_{\text{ср.}}^2 + 0,2453h_{\text{ср.}}$$

Для нижнего створа:

$$V = 0,0847h_{\text{ср.}}^3 - 0,1681h_{\text{ср.}}^2 + 0,4128h_{\text{ср.}}$$

$$Q = 0,0140h_{\text{ср.}}^3 - 4,1588h_{\text{ср.}}^2 + 309,4160h_{\text{ср.}}$$

Данные, полученные при расчете экологического стока рек, позволили определить величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ. Результаты расчетов, при условии обеспечения сохранения в рассматриваемых реках экологического стока с учетом внутригодового распределения для различных вероятностей превышения (обеспеченностей) приведены ниже.

Анализ гидрологических характеристик р. Смердь проведен на расчетном участке реки ниже рыбхоза «Лахва».

Количественные характеристики стока р. Смердь по месяцам и в годовом разрезе, полученные по методике, описанной в [10], представлены в таблице 3.

Анализ внутригодового распределения стока р. Смердь по месяцам показал, что на весенний период приходится 55 % от годового стока, соответственно, зимний сток составляет 20 % от годового стока, на летне-осенний сезон приходится 25 % от годового стока.

Минимальные среднемесячные расходов воды 95 % обеспеченности. Характеристики минимального стока являются расчетными при гидрологическом обосновании различных водохозяйственных и водоохранных проектов. В практике водохозяйственного проектирования основное применение находят величины минимального стока обеспеченностей в диапазоне 75–99 %, характеризующие годы с маловодной меженью сравнительно редкой повторяемости. При оценке наилучших условий для формирования качества воды обычно используется минимальный сток 95 %-й обеспеченности (средняя повторяемость 1 раз в 20 лет), что является достаточно произвольным условием, требующим дифференциации в зависимости от тяжести негативных экологических и санитарно-технических последствий.

В таблице 4 приведены результаты расчета минимальных среднемесячных расходов воды 95 % вероятности превышения (обеспеченности) с учетом внутригодового распределения стока.

Экологический сток реки в различные по водности годы.

Учитывая результаты проведенных натурных исследований и используя метод переноса обеспеченностей, нами проведены гидрологические расчеты по определению экологического стока р. Смердь с учетом внутригодового распределения стока для различных вероятностей превышения (обеспеченностей), результаты которых приведены в таблицах 5–6.

Для р. Смердь величины допустимого изъятия поверхностных вод с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилища в год составляют от 10,15 млн м³ для экологического стока 95 % вероятности превышения, до 34,09 млн. м³ для экологического стока 5 % вероятности превышения. Величина максимально допустимого изъятия поверхностных вод из реки с учетом сохранения наименьшего критического значения экологического стока не может превышать 24,45 млн м³. При этом наибольшее изъятие допустимо в весенние месяцы (март – май) – от 4,77 млн м³ (сток 95 % обеспеченности) до 15,83 млн м³ (сток 5 % обеспеченности), а наименьшее – летом (с июня по август) – от 1,33 до 4,77 млн м³ для экологического стока 95 % и 5 % вероятности превышения соответственно.

Сопоставляя существующие объемы изъятия и рассчитанные величины допустимого изъятия поверхностных вод из р. Смердь с учетом сохранения экологического стока, а также используя предложенное зонирование уровней воздействия рыбохозяйственных предприятий на водный режим рек, получено, что р.Смердь относится к 1 подзоне зеленой зоны. Уровень воздействия ОАО «Лахва» на водный режим р. Смердь значительно ниже допустимых его значений. Рекомендуется сохранить текущий уровень воздействия без его увеличения.

Оценки изменения гидрологического режима рек под влиянием природных и воздействием антропогенных факторов. Исследуемая р. Смердь относится к бассейну р. Припять. Для рек данного бассейна выполнены прогнозные оценки изменения речного стока на период до 2035 года. При этом использовались результаты оценки фактического изменения климата и речного стока за период с 1961 по 2015 гг. и уточненный прогноз изменения климата на период до 2035 года с учетом региональной изменчивости климата.

По результатам оценок изменения стока за период с 1961 по 2015 гг. можно сделать следующие обобщенные выводы:

- среднегодовой сток по бассейну реки Припять изменился незначительно – максимально уменьшился на 9 %;
- произошло значительное снижение стока весеннего половодья – на 42 % по бассейну Припяти с более ранним наступлением его пика;
- произошло увеличение стока в зимний период – на 20 % по бассейну Припяти;
- сток в летний период изменился не очень значительно за весь период с 1961 по 2015 гг., однако в последние годы (включая 2014, 2015 гг.) произошло значительное снижение стока, который был даже меньше минимального за весь указанный период.

Обобщение результатов расчетов прогнозного изменения стока в бассейнах реки Припять на период до 2035 года приведено в таблице 3.24 и на картахосхемах в [11].

Таблица 3 – Внутригодовое распределение стока р. Смердь в средний по водности год

Интервалы осреднения												
январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
Расход, м ³ /с												
1,72	3,36	4,47	7,41	5,64	2,49	1,16	0,70	0,75	1,05	1,72	1,24	2,64

Таблица 4 – Минимальные среднемесячные расходы воды 95 % обеспеченности с учетом внутригодового распределения стока р. Смердь, млн м³

Интервалы осреднения												
январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
2,63	3,18	5,88	8,28	3,37	2,41	1,58	1,46	2,17	2,21	2,52	2,24	37,93

Таблица 5 – Экологический сток с учетом внутригодового распределения, м³/с/ млн м³

Интервалы осреднения												
январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
95 % вероятности превышения (обеспеченности),												
<u>0,73</u> 1,91	<u>0,88</u> 2,30	<u>1,62</u> 4,26	<u>2,28</u> 6,00	<u>0,93</u> 2,44	<u>0,66</u> 1,75	<u>0,44</u> 1,15	<u>0,40</u> 1,06	<u>0,60</u> 1,57	<u>0,61</u> 1,60	<u>0,70</u> 1,83	<u>0,62</u> 1,62	<u>0,87</u> 27,48
75 % вероятности превышения (обеспеченности)												
<u>1,28</u> 3,36	<u>1,55</u> 4,07	<u>2,86</u> 7,51	<u>4,03</u> 10,58	<u>1,64</u> 4,31	<u>1,17</u> 3,08	<u>0,77</u> 2,02	<u>0,71</u> 1,87	<u>1,06</u> 2,77	<u>1,07</u> 2,82	<u>1,23</u> 3,23	<u>1,09</u> 2,86	<u>1,54</u> 48,49
50 % вероятности превышения (обеспеченности)												
<u>1,63</u> 4,28	<u>1,97</u> 5,17	<u>3,63</u> 9,55	<u>5,12</u> 13,45	<u>2,09</u> 5,48	<u>1,49</u> 3,92	<u>0,98</u> 2,57	<u>0,91</u> 2,38	<u>1,34</u> 3,53	<u>1,37</u> 3,59	<u>1,56</u> 4,10	<u>1,38</u> 3,63	<u>1,95</u> 61,65
5 % вероятности превышения (обеспеченности)												
<u>2,55</u> 6,69	<u>3,08</u> 8,09	<u>5,69</u> 14,95	<u>8,01</u> 21,05	<u>3,27</u> 8,58	<u>2,33</u> 6,13	<u>1,53</u> 4,02	<u>1,42</u> 3,73	<u>2,10</u> 5,52	<u>2,14</u> 5,61	<u>2,44</u> 6,42	<u>2,16</u> 5,69	<u>3,06</u> 96,48

Таблица 6 – Величины допустимого изъятия поверхностных вод из р. Смердь с учетом поддержания экологического стока, млн м³

Интервалы осреднения												
январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
95 % вероятности превышения (обеспеченности),												
0,72	0,87	1,62	2,26	0,89	0,61	0,38	0,35	0,56	0,59	0,69	0,61	10,15
75 % вероятности превышения (обеспеченности)												
1,15	1,39	2,57	3,60	1,43	1,00	0,63	0,59	0,91	0,95	1,10	0,98	16,28
50 % вероятности превышения (обеспеченности)												
1,29	1,56	2,89	4,05	1,61	1,13	0,72	0,67	1,03	1,07	1,23	1,10	18,34
5 % вероятности превышения (обеспеченности)												
2,38	2,88	5,33	7,49	3,01	2,13	1,37	1,27	1,93	1,98	2,28	2,03	34,09

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы о прогнозом изменении стока в бассейне реки Припять до 2035 года:

- снижение среднегодового стока, особенно в бассейне реки Припять;
- незначительное уменьшение стока в зимний период по большинству рек;
- в весенний период, за редким исключением, вероятно снижение стока;
- в летний период прогнозируется существенное и максимальное из всех периодов года уменьшение стока, особенно в бассейне Припяти;
- в осенний период (особенно в начале осени – до середины октября) также прогнозируется снижение стока.

Значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании развития ОАО «Ляхва» и водоохранных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речным бассейном.

Заключение

Проведена комплексная оценка воздействия рыбхоза «Ляхва», расположенного в бассейне р. Смердь, на гидрологический режим реки для повышения эффективности управления водными ресурсами с учетом обеспечения экологического функционирования водного объекта, в ходе которой решены следующие задачи:

- выполнен анализ гидрологического режима расчетного участка реки, используемого для нужд рыбхоза, состоящий из анализа имеющейся гидрологической информации, определены основные гидрологические характеристики, включающие средне-годовые значения стока;
- проведены натурные исследования участков реки, в ходе которых заложены створы выше и ниже участка забора воды для нужд рыбхоза. Построены поперечные профили, для которых рассчитаны гидрологические характеристики, включающие в себя распределение в поперечных сечениях водотоков местных продольных осредненных скоростей течения воды и расходов воды. Это позволило определить расходы воды на исследуемых участках выше и ниже рыбхоза в период исследований;

- выполнены гидрологические расчеты по определению минимальных среднемесячных расходов воды 95 % вероятности превышения (обеспеченности) и экологического стока с учетом внутригодового распределения стока различной обеспеченности;
 - разработаны математические модели для участков, расположенных ниже и выше рыбхоза в виде математических моделей, позволяющих в зависимости от средней глубины воды в створе определить скорости течения и расходы воды;
 - оперативные гидравлические расчеты с целью оценки воздействия заборов воды рыбхозом на изменение гидрологического режима водного объекта (глубин воды, скоростей течения и расходов воды) осуществляются на основе разработанных математических моделей как разницы расчетных параметров для заложённых створов ниже и выше рыбхоза;
 - определены математические зависимости для глубины, скорости течения и расходы воды в исследуемых створах ниже рыбхоза, соответствующих экологическому стоку, с использованием результатов гидрологических расчетов и математических моделей водного объекта;
 - определены величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки, используемых для нужд рыбхоза, с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из прудов, при обеспечении условия сохранения в реке экологического стока, что позволит определить наиболее эффективный режим наполнения рыбоводческих прудов.
- Полученные результаты актуальны на ближнюю перспективу (10 лет), однако, возможно, требуют некоторых корректировок в будущем в связи с прогнозируемыми изменениями климата [12].

* Работа выполнена при поддержке Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь в рамках научно-исследовательской работы «Оценка воздействия рыбхозов, расположенных в бассейне реки Припять, на гидрологический режим водных объектов» № госрегистрации 20212617.

Список цитированных источников

1. Энциклопедия: в 3 томах / редкол.: Т. В. Белова [и др.]. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2010. – 504 с.
2. Оценка влияния рыбхоза «Селец» на сток реки Ясельда / А. А. Волчек [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 1 (127). – С. 86–96.
3. Волчек, А. А. Водные ресурсы Брестской области / А. А. Волчек, М. Ю. Калинин. – Минск : Изд. Центр БГУ, 2002. – 440 с.
4. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения: ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). – Введ. 2010-07-01. – Минск : Стройтехнорм, 2010. – 55 с. – (Технический кодекс установившейся практики).
5. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учебное пособие / А. А. Волчек. – Москва : КНОРУС, 2021. – 418 с.
6. Гидравлика, гидрология, гидрометрия : учебное пособие / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека. – Москва : КНОРУС, 2021. – 520 с. – (Бакалавриат и магистратура).
7. Учебная гидрометрическая практика : учебное пособие / А. А. Волчек [и др.] ; под ред. А. А. Волчека. – Минск : РИВШ, 2020. – 260 с.
8. Статистические методы в природопользовании : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Валуев [и др.]. – Брест : Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
9. Логинов, В. Ф. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Брест : БрГТУ, 2004. – 301 с.
10. Математические методы обработки данных в экологии : учебное пособие / А. А. Волчек [и др.]. – Минск : РИВШ, 2018. – 212 с.
11. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учебное пособие / А. А. Волчек. – Москва : КНОРУС, 2021. – 418 с.
12. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 225 с.

References

1. Encyklopediya: v 3 tomah / redkol.: T. V. Belova [i dr.]. – Minsk : Belaruskaya En-cyklopedyya imya P. Brouki, 2010. – 504 s.
2. Ocenka vliyaniya rybhoza «Selec» na stok reki Yasel'da / A. A. Volchek [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 1 (127). – S. 86–96.
3. Volchek, A. A. Vodnye resursy Brestskoy oblasti / A. A. Volchek, M. Yu. Kalinin. – Minsk : Izd. Centr BGU, 2002. – 440 s.
4. Raschetnye gidrologicheskie karakteristiki. Poryadok opredeleniya: TKP 45-3.04-168-2009 (02250). – Vved. 2010-07-01. – Minsk : Strojtekhnorm, 2010. – 55 s. – (Tekhnicheskij kodeks ustanovivshejsya praktiki).
5. Volchek, A. A. Gidrologicheskie raschety : uchebnoe posobie / A. A. Volchek. – Moskva : KNORUS, 2021. – 418 s.
6. Gidravlika, gidrologiya, gidrometriya : uchebnoe posobie / A. A. Volchek [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka. – Moskva : KNORUS, 2021. – 520 s. – (Bakalavriat i magistra-tura).
7. Uchebnaya gidrometricheskaya praktika : uchebnoe posobie / A. A. Volchek [i dr.] ; pod red. A. A. Volcheka. – Minsk : RIVSH, 2020. – 260 s.
8. Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii : uchebnoe posobie dlya studentov vys-shih uchebnyh zavedenij / V. E. Valuev [i dr.]. – Brest : Izd-vo Brestskogo politekhnicheskogo instituta, 1999. – 252 s.
9. Loginov, V. F. Praktika primeneniya statisticheskikh metodov pri analize i prognoze prirodnykh processov / V. F. Loginov, A. A. Volchek, P. V. Shvedovskij. – Brest : BrGTU, 2004. – 301 s.
10. Matematicheskie metody obrabotki dannyh v ekologii : uchebnoe posobie / A. A. Volchek [i dr.]. – Minsk : RIVSH, 2018. – 212 s.
11. Volchek, A. A. Gidrologicheskie raschety : uchebnoe posobie / A. A. Volchek. – Moskva : KNORUS, 2021. – 418 s.
12. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchedom izmeneniya klimata / A. A. Volchek [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka, V. N. Komeeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 225 s.

Материал поступил в редакцию 14.05.2022

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РЕЖИМА СНЕЖНОГО ПОКРОВА

О. П. Мешик¹, В. А. Морозова², М. В. Борушко³¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой природообустройства

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: omeshyk@gmail.com

² Магистр технических наук, аспирант кафедры природообустройства, старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: vmorozova-brest@mail.ru³ Магистр технических наук, аспирант кафедры природообустройства, старший преподаватель кафедры иностранных языков Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: borushko.marina@mail.ru**Реферат**

В статье анализируются методы расчета снеготаяния, режима снежного покрова в Брестской области. Отмечается большое количество фазовых переходов воды, влияющих на исходное снегонакопление. Оценку запасов воды в снеге и его характеристик предлагается проводить с использованием метода водного баланса. Даются расчетные воднобалансовые схемы.

Ключевые слова: снежный покров, режим, фазовые переходы, снеготаяние, снегонакопление, методы, водный баланс, сублимация.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ESTIMATING A REGIME OF SNOW COVER

A. P. Meshyk, V. A. Marozava, M. V. Barushka

Abstract

This paper gives an analysis of some methods for calculating the amount of melt snow and the regime of snow cover in Brest Region. It is noted that there are many phase transitions of water that influence the initial snow accumulation. Snow water equivalent and its features is proposed to estimate with the use of water balance method. Some design water-balance schemes are provided.

Keywords: snow cover, regime, phase transitions, snow melt, snow accumulation, methods, water balance, sublimation.

Введение

Снег представляет собой мощный климатообразующий фактор, а также является важным гидрологическим ресурсом. Он играет значительную роль при взаимодействии климатических, гидрологических и гляциологических процессов. Большое значение снег имеет для земледелия, так как температура почвы, ее влажность, химический состав, структура, насыщенность микроорганизмами в немалой степени зависят от мощности снежного покрова и его свойств. Особенно большую роль снежный покров играет в засушливых областях, где он нередко оказывается основным и единственным источником почвенной влаги. Для территории Беларуси, относящейся к зоне неустойчивого естественного увлажнения, снегонакопление является значимым, так как еще в марте на полях имеет место избыток почвенных влагозапасов, но уже к середине апреля по ряду районов уже требуется дополнительное увлажнение. Для сельского хозяйства снежный покров – это запас воды, необходимой для растений, защита от вымерзания озимых и многолетних культур, корневая система которых является достаточно уязвимой [1].

Однако, помимо благоприятных факторов, снежный покров может нести и негативные влияния. Так, на территории Республики Беларусь снежный покров является источником питания рек в весенний период, тем самым формируя весеннее половодье, обусловленное таянием снега, накопленного за зиму. Сток весеннего половодья составляет 40–60 % объема годового стока, в период половодья подвергаются затоплению населенные пункты и сельскохозяйственные земли [2, 3, 4]. Другим неблагоприятным фактором является возможное разрушение конструкций зданий и сооружений в результате сверхнормативных снеговых нагрузок. В первом случае, определяющем величину весеннего половодья и наводнений, является снеготаяние и его интенсивность. Во втором – снегонакопление.

Неустойчивость естественного увлажнения территории Беларуси по годам, ее температурный режим приводят к чередованию циклов снегонакопления и снеготаяния, многочисленным фазовым переходам воды в течение зимнего периода.

Расчеты снегонакопления и снеготаяния лежат в основе практически всех моделей формирования стока весеннего половодья. В настоящее время используются различные модели и методы, включающие разного рода метеорологические характеристики, но одна из важнейших характеристик – это запас воды в снеге [5–9 и др.]. Результаты моделирования во многом определяются выбранным методом расчета снеготаяния и наличием необходимой гидрометеорологической информации. Запас воды в снеге также является определяющим при оценке веса снегового покрова и его воздействии на строительные конструкции.

Материалы и методы

Объектом исследования являются характеристики снежного покрова. В работе использованы официальные данные климатического мониторинга по 9 метеостанциям (Брест, Барановичи, Высокое, Ганцевичи, Дрогичин, Ивацевичи, Пинск, Полесская, Пружаны) Брестской области Республики Беларусь. Данные характеризуют: температуру воздуха (максимальную, минимальную, среднюю), °С; максимальную скорость ветра, м/с; сумму атмосферных осадков, мм; относительную влажность, %; высоту снежного покрова, см; плотность снега, г/см³; запасы воды в снеге, мм [10].

Предметом исследования являются методы оценки процессов снегонакопления и таяния снежного покрова на исследуемой территории.

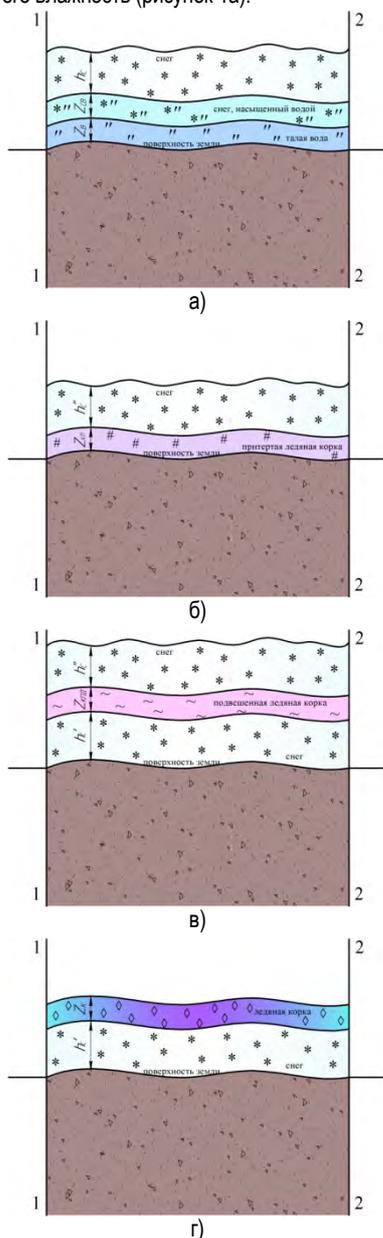
Основная часть

Сложные процессы снегонакопления и снеготаяния обусловлены рядом факторов, которые достаточно сложно смоделировать, особенно в малоизученных районах. Температура воздуха служит главным фактором образования и разрушения снежного покрова. Образование твердых осадков зависит не только от прямого снижения температуры, но и от продолжительности холодного периода, когда температура приземных слоев воздуха ниже 0 °С. В процессе накопления снежного покрова в результате изменения метеорологических условий его свойства и структура меняются послойно. Рыхлая структура обычно свойственна свежеснеговому снегу. Его уплотнение обычно связано с давлением собственного веса и наличием оттепелей. Частные случаи снегонакопления приведены на рисунке 1.

Еще одним не менее важным фактором являются характеристики почвы: влажность и температура. Если под снегом находится мерзлый грунт с низкими температурами, то при оттаивании часто наблюдается уплотнение и образование притертой ледяной корки в нижнем слое у поверхности (рисунок 1б). Вид и количество жидких осадков в период установившегося снежного покрова также вносят свой вклад в изменение его структуры. Когда идет небольшой дождь, на поверхности снежного покрова может образовываться ледяная корка (рисунок 1г). Более крупные капли проникают в толщу снежного покрова и способствуют его уплотнению за счет промерзания. На образованной ледяной корке также впоследствии может накапливаться снежный покров (рисунок 1в). Наличие в снегу механических примесей и пыли приводит к значительному ускорению процесса снеготаяния за счет снижения альбедо.

Основными источниками тепла при снеготаянии являются солнечная радиация, теплообмен с воздушными массами, жидкие осадки, поток тепла от почвы и собственная скрытая теплота плавления при

конденсации водяного пара из воздуха на поверхность снега. Интенсивность снеготаяния зависит от скорости уменьшения запасов воды в снеге при таянии. Первые запасы воды используются для насыщения снега. Наполняемость снега водой зависит от его структуры. Плотный слежавшийся зернистый снег практически не задерживает талую воду. Когда она достигает поверхности земли, образуются небольшие потоки, которые создают поверхностный сток (рисунок 1а). В то же время в процессе поступления на поверхность почвы избыточной (не удерживаемой снегом) талой или дождевой воды (процесс водоотдачи) наблюдается уменьшение общего запаса воды в снежном покрове. При этом часть талой воды остается в толще снежного покрова и определяет его влажность (рисунок 1а).



а) свежеснеживший снег – снег, насыщенный водой, – талая вода; б) снег – притертая ледяная корка; в) снег – подвешенная ледяная корка; г) ледяная корка на поверхности – снег (h_C – средняя высота снежного покрова без ледяной корки; Z_{CB} и Z_B – средние толщины слоя снега, насыщенного водой, и слоя талой воды, по измерениям и в точках определения плотности снежного покрова; h'_C и h''_C – средняя высота снежного покрова под и над ледяной коркой; Z_K , $Z_{КП}$ и $Z_{КГД}$ – средние толщины ледяной корки, подвешенной и притертой ледяной корки)

Рисунок 1 – Частные случаи снегонакопления на земной поверхности

Характер растительности определяет интенсивность снеготаяния. В лесу процесс таяния снега идет медленнее, чем в поле. Поток талых

вод во многом определяется промерзанием грунтов. Если осенью снег выпадает на талую почву и в морозный период скапливается толстым рыхлым слоем, препятствуя промерзанию почвы, то часть весенних талых вод расходуется на фильтрацию и пополнение грунтовых вод.

В итоге можно сказать, что снежный покров на земной поверхности может формировать многослойную и сложную систему (рисунок 1), а основные факторы, влияющие на процесс снеготаяния, это: количество твердых осадков, структура снежного покрова, степень промерзания грунта, изменение температуры воздуха, вид и количество жидких осадков.

К основным методам расчета снеготаяния относятся:

- 1) метод температурных коэффициентов [11], отражающих физико-географические условия бассейнов рек; основан на предположении о линейной связи между количеством стаявшей воды и приземной температурой воздуха;
- 2) метод теплового баланса, основанный на расчете суммарного притока тепла к водосбору в период снеготаяния за счет солнечной радиации, теплообмена с атмосферой и землей, процессов испарения и конденсации [12];
- 3) метод водного баланса, заключается в расчете слоя воды, которая образовалась за период между снегосъемками [13];
- 4) метод Е. Г. Попова [14], который основан на использовании интегральных показателей интенсивности снеготаяния (температура воздуха и скорость ветра).

Выбор метода для расчета снеготаяния определяется имеющимися исходными данными, изученностью водосбора, плотностью и репрезентативностью сети наблюдений.

Расчет снеготаяния по тепловому балансу обеспечивает в большинстве случаев наиболее высокую точность, поэтому многие авторы в моделях снеготаяния и используют данный метод [11, 15–16 и др.]. Также во многих моделях применяется метод температурных коэффициентов, так как в нем используются материалы сетевых наблюдений [17–20 и др.].

Недостатки метода водного баланса исходят из его трудоемкости и невозможности применения к небольшим промежуткам времени. Метод Е. Г. Попова применяется для характерных весенних условий (температура воздуха выше 0 °С, пасмурная погода, отсутствие прямой солнечной радиации) и не подходит для расчетов на малых водосборах.

Таяние снега можно рассматривать как энергетический процесс, протекающий в полном соответствии с поступлением и затратой определенного количества тепла и являющийся следствием теплообмена снежного покрова с окружающей средой.

В то же время мы считаем, что воднобалансовая модель способна описать возможные составляющие режима снежного покрова и фактически включает в себя элементы вышеуказанных методов. На рисунке 2 приведена схема расчета запасов воды в снеге с использованием метода водного баланса. На схеме представлены приходные и расходные воднобалансовые составляющие.

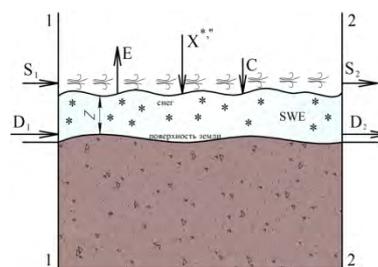


Рисунок 2 – Схема к расчету водного баланса

Уравнение водного баланса за расчетный интервал времени, решаемое относительно запасов воды в снеге, записывается как

$$SWE = X^{**} + C - E + S_1 - S_2 + D_1 - D_2, \quad (1)$$

- где SWE – суммарный запас воды в снеге, мм;
 X^{**} – сумма атмосферных осадков (* – твердых, ** – жидких или смешанных), мм;
 C – конденсация (сублимация) водяных паров из атмосферного воздуха, мм;
 E – испарение (сублимация) с поверхности снега, мм;
 S_1 и S_2 – метелевый снеготранспорт, мм;
 D_1 и D_2 – поверхностный приток и отток растаявшего снега, мм.

В процессе проведения снегосъемок запасы воды в снеге определяются опытным путем с использованием официальной методики [21] и расчетных схем, представленных на рисунке 1.

Запас воды в слое снега определяется по формуле

$$Q_c = 10 g (hc - (Z_{cs} + Z_e)), \text{ мм}, \quad (2)$$

где g – средняя плотность снега;

10 – коэффициент для перевода высоты слоя воды в миллиметры.

Запас воды в слое снега, насыщенного водой, рассчитывается как

$$Q_{cs} = 10 g_{cs} Z_{cs} = 8 Z_{cs}, \text{ мм}, \quad (3)$$

где g_{cs} – плотность снега, насыщенного водой, равная $0,8 \text{ г/см}^3$.

Запас воды в слое талой воды вычисляется по формуле

$$Q_e = 10 g_e Z_e = 10 Z_e, \text{ мм}, \quad (4)$$

где g_e – плотность талой воды, равная $1,0 \text{ г/см}^3$.

Запас воды в притертой ледяной корке определяется зависимостью

$$Q_k = g_k Z_k = 0,8 Z_k, \text{ мм}, \quad (5)$$

где g_k – плотность ледяной корки, равная $0,8 \text{ г/см}^3$.

Общий запас воды в снежном покрове вычисляется суммированием составляющих

$$SWE = Q_c + Q_{cs} + Q_e + Q_k, \text{ мм}. \quad (6)$$

Реализация воднобалансового подхода связана с определенными трудностями. Так, в течение зимы могут иметь различные частные случаи снегонакопления и снеготаяния. Атмосферные осадки выпадают как в твердом, так и жидком виде. Наблюдаются частые оттепели, особенно в юго-западной части Беларуси. В качестве примера в таблице 1 приведена характеристика режима снежного покрова зимы 2018–2019 гг. по 9 метеостанциям Брестской области. Эта зима характеризовалась достаточно большими снеготаяниями. Появление снежного покрова в этом году было 18.11.2018 на большинстве метеостанций, кроме Пинска – 16.11.2018 и Полесской – 15.11.2018. Последний снег был в диапазоне дат 26.03–16.04.2019. Общее число дней со снежным покровом (дни, когда отмечен снег, независимо от его последующего залегания) распределялось по направлению юго-запад – северо-восток и составило от 50 дней в Бресте до 68 в Барановичах. Устойчивый снежный покров практически на всех метеостанциях образовался 03.01.2019, кроме Бреста – 02.01.2019 и Барановичей – 14.12.2018. Число дней с устойчивым снежным покровом составило от 32 до 53. Устойчивым принято считать снежный покров, который лежит в течение холодного периода года не менее одного месяца с перерывами в общей сложности не более трех дней подряд в месяце. Устойчивый снежный покров образуется через 45–55 дней после первых снегопадов, в течение этого периода наблюдается неустойчивая погода с многократным числом фазовых переходов [22].

Значительные изменения снежного покрова происходят также из-за процессов таяния и испарения, под воздействием жидких осадков и других метеорологических факторов (температура, ветер, влажность и др.) (рисунок 1).

При формировании снежного покрова в нем могут возникать ледяные корки, слои уплотненного ветром снега, слои глубинной изморози и слои с различной структурой снега. В течение времени залегания снежного покрова различия в характеристиках соседних слоев могут нарастать или, наоборот, исчезать в зависимости от конкретных термодинамических условий их существования, что и показывает количество фазовых переходов от 23 до 26 (таблица 1), рассчитанное за период, когда имел место снег, а среднесуточная температура была в диапазоне от отрицательных значений до положительных.

Поэтому снежный покров и не является стабильным. Все параметры, характеризующие мощность, строение, плотность и физико-механические свойства снежного покрова, непрерывно изменяются.

Таблица 1 – Характеристика режима снежного покрова зимы 2018–2019 гг. на территории Брестской области

Метеостанция	Количество фазовых переходов	Число дней со снежным покровом с последующим залеганием	Общее число дней со снежным покровом	Первый снег	Последний снег	Устойчивый снежный покров		
						Дата образования	Дата разрушения	Число дней
Брест	23	48	52	18.11	11.04	02.01	04.02	34
Барановичи	23	58	68	18.11	11.04	14.12	04.02	53
Высокое	23	49	50	18.11	16.04	03.01	04.02	33
Ганцевичи	24	59	59	18.11	26.03	03.01	04.02	33
Дрогичин	26	57	57	18.11	16.04	03.01	04.02	32
Ивацевичи	23	55	59	18.11	11.04	03.01	04.02	33
Пинск	23	54	57	16.11	28.03	03.01	04.02	33
Полесская	26	61	65	15.11	28.03	03.01	03.02	32
Пружаны	23	47	52	18.11	16.04	03.01	04.02	33

При температуре выше 0°C происходит таяние снега. Однако под воздействием солнца снег может таять и при отрицательных температурах. При этом происходит испарение ледяных кристаллов без превращения в воду.

Испарение зависит от скорости ветра, т. к. ветер и связанная с ним турбулентность относят водяной пар от испаряющей поверхности и создают дефицит насыщения. В реальных атмосферных условиях вместе с испарением происходит обратный процесс – превращение водяного пара в капли воды (конденсация), а при низких температурах – в кристаллы льда (сублимация – переход водяного пара из газообразного состояния в лед, минуя жидкую фазу).

Метелевое испарение снега (испарение частиц, летящих в потоке ветра) характеризуется большей интенсивностью, чем испарение со снежной поверхности. Испарение с поверхности снега возможно в условиях, когда воздух не насыщен водяным паром и требует значительного количества тепловой энергии. Теплообмен определяется тепловыми свойствами снега и льда. Так как теплопроводность льда выше, чем у снега, и приток тепла больше, то, как следствие, интенсивность испарения со льда выше, чем со снега, при прочих равных условиях. Испарение с поверхности снега сравнительно невелико по сравнению с испарением с поверхности воды и в холодное время года составляет 25–30 мм водяного слоя [23].

При снеготаянии на первых порах снег лишь насыщается талой водой. Водоотдача из него начинается только после того, как растает 15–20 % снеготаяния. При таянии меняется и плотность снега – он становится плотнее. Когда плотность снега достигнет $0,32\text{--}0,34 \text{ г/см}^3$, разница между интенсивностью снеготаяния и водоотдачи становится небольшой. Когда плотность снега достигает $0,99 \text{ г/см}^3$, он превращается в воду. Обычно основная масса снега стает при среднесуточной температуре воздуха $3\text{--}5^\circ\text{C}$ [24].

Интенсивность снеготаяния для каждого конкретного дня зависит от типа погоды (солнечная или пасмурная, ветреная или безветренная), от структуры снега (мелко- или крупнозернистый) и пр. Особенно сильное влияние оказывают на него дожди. В дождливые дни интенсивность снеготаяния возрастает в 1,2–1,4 раза. Определенную роль играет и ветер, который не дает застаиваться холодному воздуху в низинах, а главное, в лесах.

Величина потока тепла на поверхности снежного покрова определяется элементами радиационного баланса, турбулентным теплообменом, испарением или конденсацией и выпадением жидких осадков. Интенсивность потока непостоянна и может сильно меняться даже в течение суток, возможно также изменение направления потока. Большое количество энергии поступает к поверхности снега в виде прямой и рассеянной солнечной радиации, но лишь небольшая ее часть поглощается снегом, а остальная часть отражается от снежной поверхности. Альbedo снежного покрова изменяется в зависимости от структуры снега, влажности и его загрязнения. Для свежевыпавшего снега альbedo колеблется от 0,95 до 0,80. Альbedo поверхности сухого переметенного снега составляет от 0,80 до 0,65. Альbedo уменьшается по мере увлажнения снега, особенно в период снеготаяния. Альbedo для средне- и крупнозернистого таяющего снега составляет около 0,60–0,40, а для загрязненного снега может снижаться до 0,20 [22, 25].

Снежный покров теряет много тепла в виде длинноволновой радиации. Определенную роль играют и элементы радиационного баланса,

учитывающие возвратную радиацию от облаков и атмосферы. Сочетание поступления тепла от поглощенной радиации и потерь от длинноволновой радиации приводит к тому, что радиационный баланс ночью обычно имеет отрицательное значение, и поэтому поток тепла направлен из снежного покрова в атмосферу, а днем наоборот [26].

Турбулентный теплообмен может сопровождаться выносом водяных паров из снежной массы, возгонкой снега и испарением водных пленок. При определенных условиях на поверхности снега происходит сублимация водяных паров, содержащихся в воздухе в виде инея. Наиболее благоприятные условия для его образования возникают в ясные и холодные ночи, без сильных ветров, при поступлении влажных воздушных масс [27].

Все вышеизложенное доказывает проведенный в данной работе анализ метеорологических данных (температура воздуха, скорость ветра, сумма атмосферных осадков и др.) по метеостанциям Брестской области. В качестве примера приведена динамика снежного покрова зимой 2018–2019 гг. в г. Бресте (рисунок 3 а–д, 4–6). На рисунке 3 а–д представлен внутригодовой ход исследуемых характеристик с 16.12.2018 по 04.02.2019.

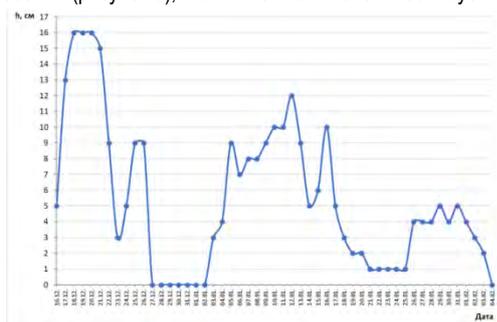
Рисунок 3а показывает, что за зиму имело место чередование периодов снегонакопления и снеготаяния вплоть до полного схода снежного покрова с 27.12.2018 по 02.01.2019. Основными факторами снегонакопления являются наличие твердых атмосферных осадков (рисунок 3г) и отрицательная температура воздуха (рисунок 3б). Анализ рисунков 3а, 3б, 3г показывает четкую связь между ними.

Детализация по фазовому состоянию атмосферных осадков приведена на рисунке 4. Сход снега высотой 9 см, фактически произошёл за сутки 26.12.2018 при положительной температуре воздуха +3,0 °С и жидких атмосферных осадках. Жидкие атмосферные осадки быстро разрушают снежный покров даже при отрицательных температурах воздуха.

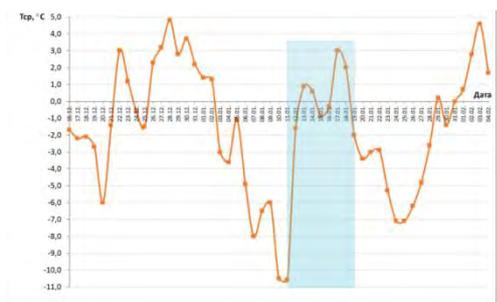
Сход снега осуществляется в течение зимы постоянно после образования снежного покрова в результате двух процессов – таяния и испарения (сублимации). Величину стока весеннего половодья определяет преимущественно интенсивность снеготаяния. По нашим оценкам максимальное расчетное снеготаяние может достигать до 26 мм, в среднем 5–6 мм в сутки [2, 5].

Испарение с поверхности снега расчетно составляет 0,3–0,6 мм в сутки, зависит от температуры воздуха (рисунок 3б), скорости ветра (рисунок 3в) и относительной влажности воздуха (рисунок 3д).

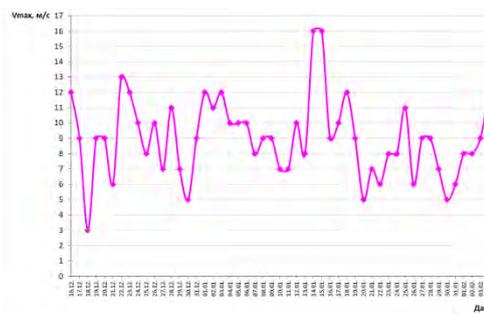
Сход снега в течение суток может как интенсифицироваться, так и приостанавливаться. В течение суток могут иметь место фазовые переходы воды, в том числе многократные, о чем свидетельствует суточная детализация температур воздуха (рисунок 5). Относительная влажность воздуха также имеет достаточно выраженные внутрисуточные колебания (рисунок 6), что влияет на интенсивность сублимации.



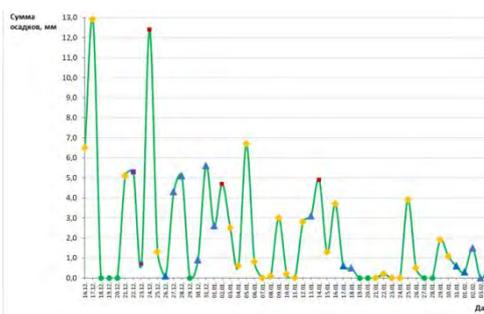
а)



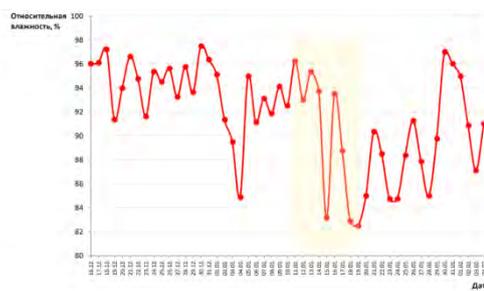
б)



в)



г)



д)

а) высоты снежного покрова; б) средней температуры; в) максимальной скорости ветра; г) суммы атмосферных осадков; д) относительной влажности воздуха по метеостанции Брест за период 16.12.2018 – 04.02.2019

Рисунок 3 – График суточного хода

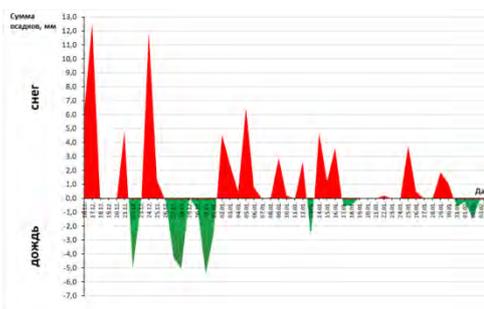


Рисунок 4 – Фазовое состояние атмосферных осадков по метеостанции Брест за период 16.12.2018 – 04.02.2019

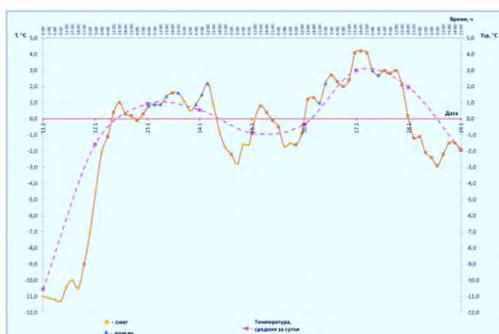


Рисунок 5 – Суточная детализация температуры по метеостанции Брест за период 11.01.2019 – 19.01.2019

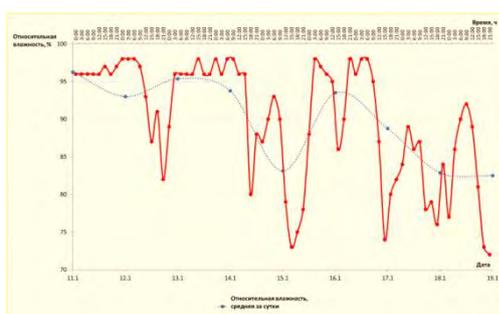


Рисунок 6 – Суточная детализация относительной влажности по метеостанции Брест за период 11.01.2019 – 19.01.2019

Заключение

В итоге можно сделать вывод о том, что с использованием гидрометеорологических данных, с определенной точностью можно оценивать режим снежного покрова, включающий снегонакопление и сход снега. В качестве метода оценки предлагается использовать воднобалансовый, как наиболее полно учитывающий физические процессы, происходящие в снежном покрове. Интенсивность снеготаяния и схода снега зависят от радиационного, ветрового режимов и режима влажности исследуемой территории. Производной составляющей радиационного режима является температура воздуха, которая определяет также частоту фазовых переходов воды как в течение холодного периода, так и в течение суток. Запасы воды в снеге являются определяющими при прогнозировании весеннего половодья и снеговых нагрузок на конструкции зданий и сооружений.

Список цитированных источников

1. Морозова, В. А. Роль снежных мелиораций в сельском хозяйстве / В. А. Морозова // Мелиорация и сельское строительство. Поиск молодежи : сборник научных трудов по материалам II Республиканской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и соискателей / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия ; редкол.: Р. А. Другомилов, Ю. Н. Дуброва. – Горки : РПЦ "Печатник", 2019. – С. 116–118.
2. Мешик, О. П. Роль снежного покрова в формировании весеннего половодья на реках Беларуси / О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко // Мелиорация. – 2020. – № 4(94). – С. 35–40.
3. Мешик, О. П. Запасы воды в снеге, формирующие весеннее половодье на реках Белорусского Полесья / О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко // Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель : материалы Международной научно-практической конференции, Горки, 11–12 марта 2021 г. / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Главное управление образования, науки и кадровой политики, Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия ; редкол.: В. В. Великанов (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2022. – С. 149–153.
4. Истомина, М. Н. Наводнения: генезис, социально-экономические и экологические последствия наводнений / М. Н. Истомина,

- А. Г. Кочарян, И. П. Лебедева // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32, № 4. – С. 389–398.
5. Meshyk, A. Snow as a contributor to spring flooding in Belarus // A. Meshyk, M. Barushka, V. Marozava // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – Vol. 28, № 15. – 18826–18836.
6. Мешик, О. П. Особенности оценки запасов воды в снеге и их пространственно-временной изменчивости на территории Беларуси / О. П. Мешик, В. А. Морозова // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов : сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, приуроченной к 1000-летию г. Бреста, 12–14 сентября 2019 г. : в 2 ч. / под ред. А. К. Карабанова [и др.]. – Брест : БрГУ, 2019. – Ч. 2 – С. 34–37.
7. Волчек, А. А. Оценка водного эквивалента снега по данным пассивного микроволнового сканирования земной поверхности с использованием искусственных нейронных сетей для территории Российской Федерации / А. А. Волчек, Д. А. Костюк, Д. О. Петров // Лёд и Снег. – 2016. – № 56(1). – С. 43–51.
8. Петров, Д. О. Опыт прогнозирования весенних наводнений с использованием спутниковой информации о снеговых запасах на речном водосборе / Д. О. Петров, А. А. Волчек, Д. А. Костюк // Водные ресурсы и климат : сборник материалов докладов V Международного водного форума / Белорусский государственный технологический университет. – Минск : БГТУ, 2017. – С. 197–201.
9. Пьянков, С. В. Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды / С. В. Пьянков, А. Н. Шихов, П. Г. Михайлюков // Лёд и Снег. – 2019. – № 59(4). – С. 494–508.
10. Климатический кадастр Республики Беларусь. Метеорологический ежемесячник. – Минск : Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 1979–2020 гг.
11. Комаров, В. Д. Гидрологический анализ и прогноз весеннего половодья равнинных рек / В. Д. Комаров. – Л. : Гидрометеоиздат, 1955. – 304 с.
12. Кузьмин, П. П. Процесс таяния снежного покрова / П. П. Кузьмин. – Л. : Гидрометеоиздат, 1961. – 348 с.
13. Соколовский, Д. Л. Речной сток. / Д. Л. Соколовский. – Л. : Гидрометеоиздат, 1968. – 539 с.
14. Попов, Е. Г. Основы гидрологических прогнозов / Е. Г. Попов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1968. – 294 с.
15. Шихов, А. Н. Моделирование процесса снеготаяния на основе метода теплового баланса (на примере водосбора Воткинского водохранилища) / А. Н. Шихов, Р. К. Абдуллин, С. Е. Максимова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.
16. Турков, Д. В. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплового обмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области / Д. В. Турков, В. С. Сократов // Лёд и Снег. – 2016. – № 56(3). – С. 369–380.
17. Калинин, В. Г. Моделирование пространственного распределения снежного покрова в период весеннего снеготаяния / В. Г. Калинин, К. И. Суманеева, В. С. Русаков // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 2. – С. 74–85.
18. Шайдулина, А. А. Пространственно-временные закономерности снеготаяния на речных водосборах верхней Камы / А. А. Шайдулина, В. Г. Калинин, М. А. Фасахов // Географический вестник. – 2022. – № 1(60). – С. 100–112.
19. Гельфан, А. Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России / А. Н. Гельфан, В. М. Морейдо // Лёд и Снег. – 2014. – № 54(2). – С. 44–52.
20. Georgievsky, M. Development of a distributed snow model coupled with a new method of degree-day factors estimation / M. Georgievsky, H. Ishidaira, K. Takeuchi // Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 2006. – P. 49–54.
21. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила проведения приземных метеорологических наблюдений и работ на станциях : ТКП 17.10-42-2009 (02120). – Минск : Минприроды, 2009.

22. Мешик, О. П. Особенности залегания снежного покрова на территории Республики Беларусь / О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 2 (125). – С. 93–99.
23. Волчек, А. А. Метеорология и климатология: пособие для студентов высших учебных заведений по специальности «Природоохранная деятельность» / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая, И. Н. Шпока. – Брест : Из-во БрГТУ, 2014 – 184 с.
24. Гляциологический словарь / под ред. В. М. Котлякова. – Л. : Гидрометеоздат, 1984. – 527 с.
25. Китаев, Л. М. Изменчивость альbedo снежного покрова – анализ спутниковых данных / Л. М. Китаев, Т. Б. Титкова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 2. – С. 47–54.
26. Красс, М. С. Радиационная теплофизика снега и льда / М. С. Красс, В. Г. Мерзликин. – Л. : Гидрометеоздат, 1990. – 264 с.
27. Особенности турбулентного теплообмена вблизи восторощенных участков морского льда / Б. В. Иванов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2020. – № 66(3). – С. 364–380.
10. Klimaticheskij kadastr Respubliki Belarus'. Meteorologicheskij ezhemesyachnik. – Minsk : Respublikanskij centr po gidrometeorologii, kontrolyu radioaktivnogo zagryazneniya i monitoringu okruzhayushchej sredy, 1979–2020 gg.
11. Komarov, V. D. Gidrologicheskij analiz i prognoz vesennego polovod'ya ravninnyh rek / V. D. Komarov. – L. : Gidrometeoizdat, 1955. – 304 s.
12. Kuz'min, P. P. Process tayaniya snezhnogo pokrova / P. P. Kuz'min. – L. : Gidrometeoizdat, 1961. – 348 s.
13. Sokolovskij, D. L. Rechnoj stok. / D. L. Sokolovskij. – L. : Gidrometeoizdat, 1968. – 539 s.
14. Popov, E. G. Osnovy gidrologicheskijh prognozov / E. G. Popov. – L. : Gidrometeoizdat, 1968. – 294 s.
15. Shihov, A. N. Modelirovanie processa snegotayaniya na osnove metoda teplovogo balansa (na primere vodosbora Votkinskogo vodohranilishcha) / A. N. SHihov, R. K. Abdullin, S. E. Maksimova // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 6.
16. Turkov, D. V. Raschyot karakteristik snezhnogo pokrova ravninnyh territorij s ispol'zovaniem modeli lokal'nogo teplovlagoobmena SPONSOR i dannyh reanaliza na primere Moskovskoj oblasti / D. V. Turkov, V. S. Sokratov // Lyod i Sneg. – 2016. – № 56(3). – S. 369–380.
17. Kalinin, V. G. Modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya snezhnogo pokrova v period vesennego snegotayaniya / V. G. Kalinin, K. I. Sumaneeva, V. S. Rusakov // Meteorologiya i gidrologiya. – 2019. – № 2. – S. 74–85.
18. Shajdulina, A. A. Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti snegotayaniya na rechnyh vodosborah verhnjej Kamy / A. A. SHajdulina, V. G. Kalinin, M. A. Fasahov // Geograficheskij vestnik. – 2022. – № 1(60). – S. 100–112.
19. Gelfan, A. N. Dinamiko-stohasticheskoe modelirovanie formirovaniya snezhnogo pokrova na Evropejskoj territorii Rossii / A. N. Gelfan, V. M. Morejdo // Lyod i Sneg. – 2014. – № 54(2). – S. 44–52.
20. Georgievsky, M. Development of a distributed snow model coupled with a new method of degree-day factors estimation / M. Georgievsky, H. Ishidaira, K. Takeuchi // Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 2006. – P. 49–54.
21. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrometeorologiya. Pravila provedeniya prizemnyh meteorologicheskijh nablyudenij i rabot na stancijah : TKP 17.10-42-2009 (02120). – Minsk : Minprirody, 2009.
22. Meshik, O. P. Osobennosti zaleganiya snezhnogo pokrova na territorii Respubliki Belarus' / O. P. Meshik, V. A. Morozova, M. V. Borushko // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 2 (125). – S. 93–99.
23. Volchek, A. A. Meteorologiya i klimatologiya: posobie dlya studentov vysshijh uchebnyh zavedenij po special'nosti «Prirodohrannaya deyatel'nost'» / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya, I. N. SHpoka. – Brest : Iz-vo BrGTU, 2014 – 184 s.
24. Glyaciologicheskij slovar' / pod red. V. M. Kotlyakova. – L. : Gidrometeoizdat, 1984. – 527 s.
25. Kitaev, L. M. Izmenchivost' al'bedo snezhnogo pokrova – analiz spustnikovyx dannyh / L. M. Kitaev, T. B. Titkova // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2011. – T. 8, № 2. – S. 47–54.
26. Krass, M. S. Radiacionnaya teplofizika snega i l'da / M. S. Krass, V. G. Merzlikin. – L. : Gidrometeoizdat, 1990. – 264 s.
27. Osobennosti turbulentnogo teploobmena vblizi vstoroshennyh uchastkov morskogo l'da / B. V. Ivanov [i dr.] // Problemy Arktiki i Antarktiki. – 2020. – № 66(3). – S. 364–380.

Материал поступил в редакцию 08.06.2022

УДК 338.23

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАНОВЛЕНИЯ СЕТЕЙ И КЛАСТЕРОВ В КОНТЕКСТЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ¹

Е. А. Бидзюра

*Аспирант, старший преподаватель кафедры экономики и права Белорусского национального технического университета,
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: bidziura@bntu.by*

Реферат

В данной статье установлена взаимосвязь между понятиями «сети» и «кластер», являющимися родовым и видовым соответственно. Предложена авторская интерпретация понятия «кластер»: совокупность горизонтальных и вертикальных связей между субъектами с целью создания единого и устойчивого комплекса, в пределах которого будет осуществляться производство, распределение и социально-значимое потребление материальных средств и благ, с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики в целом и субъектов, входящих в кластер. По своей природе кластер является идеальной системой, в которой возможно осуществление технологического цикла – от возникновения идеи нового продукта и ее апробации, до производства этого продукта и выпуска на рынок, что в особенности актуально в условиях пандемии, при нарушении цепи поставок, а также торговых и санкционных войн.

Ключевые слова: сеть, кластер, сетевая экономика, кластерное развитие, безопасность, экономическая безопасность.

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR THE FORMATION OF NETWORKS AND CLUSTERS IN THE CONTEXT OF ENSURING ECONOMIC SECURITY

E. A. Bidziura

Abstract

This article establishes the relationship between the concepts of "network" and "cluster", which are generic and specific, respectively. The author's interpretation of the concept of "cluster" is proposed: a set of horizontal and vertical links between economic entities in order to create a single and sustainable complex within which the production, distribution and socially significant consumption of material resources and benefits will be carried out, in order to increase the competitiveness of the national economy as a whole and businesses in particular. By its nature, the cluster is an ideal system in which it is possible to carry out the technological cycle – from the emergence of the idea of a new product and its testing, to the production of this product and release to the market, which is especially important in a pandemic, when the supply chain is disrupted, as well as trade and sanctions wars.

Keywords: network, cluster, network economy, cluster development, security, economic security.

Введение

В связи с нарастающим в мире напряжением, обусловленным экономическим кризисом и пандемией, в сфере обеспечения экономической безопасности Республики Беларусь актуализируется необходимость повышения конкурентоспособности национального промышленного комплекса на международном и отечественном рынках. Указанное обстоятельство побуждает искать новые инструменты обеспечения конкурентоспособности отечественных производителей, одним из которых может стать создание кластера, поскольку «это достаточно перспективная форма взаимосвязанных предприятий по производству конечных изделий (комплектующих), позволяющая широко привлекать малые и средние предприятия на основе механизма государственно-частного партнерства» [1, с. 59]. Функциональным предназначением кластера выступает обеспечение национальной, технической, экономической, продовольственной, биологической и экологической безопасности.

Результаты и их обсуждение

В истоках познания сетевых и кластерных феноменов лежит теория сравнительных преимуществ, разработанная в начале XIX в. Д. Рикардо, которая и по сегодняшний день не теряет своей актуальности и развивается в работах ученых. Понятие «сеть» является родовым по отношению к кластеру и, по нашему мнению, для его описания предпочтительнее использовать трактовку, представленную Дж. Подольным [Joel M. Podolny] и К. Пейджем [Karen L. Page]. По мнению названных авторов, под сетью следует понимать «любую совокупность субъектов, которые поддерживают повторяющиеся устойчивые отношения обмена друг с другом и в то же время не имеют законных организационных полномочий для арбитража и разрешения споров, которые могут возникнуть во время обмена» [2, с. 59]. Методологически данная трактовка не противоречит классическому пониманию структуры вообще и в экономической системе общества в частности. Под последней Н. В. Герасимов понимал: «... единый,

устойчивый, организационно оформленный, относительно самостоятельный, материально-общественный комплекс, в пределах которого осуществляется внутренне взаимосвязанное производство, присвоение и социально-значимое потребление материальных средств и благ для обеспечения физической жизни общества, а также для создания материальной базы, необходимой во всех остальных сферах общественной жизни» [3, с. 25–26]. Исходя из этого, можно прийти к выводу, что сети образуют связи, способные обеспечить эффективное функционирование экономики, при этом характер этих связей будет оказывать влияние на скорость и качество информации, перемещаемой по образованным потокам.

Рассматривая принципы сетевого сотрудничества, среди которых выделяется консолидация общих целей и доверие между партнерами, Г. А. Яшева и Ю. Г. Вайлунова пришли к выводу о том, что «сетевое сотрудничество представляет собой процесс установления длительных устойчивых формальных и неформальных отношений между субъектами делового сообщества, объединенными вертикальными и горизонтальными связями, основанных на добровольности, доверии и общих для делового сообщества целях, нормах, традициях, правилах, обычаях» [4, с. 98]. К формам сетевого сотрудничества названные авторы относят картели, синдикаты, консорциумы, стратегические альянсы и кластеры.

В свою очередь, понятие «кластер» является видовым по отношению к понятию «сети». Впервые его ввел в научный оборот М. Портер, считающийся разработчиком теории конкуренции, и, по его мнению, «кластер – это группа географически соседствующих, взаимосвязанных компаний (поставщики, производители и др.) и связанных с ними организаций (образовательные заведения, органы государственного управления, инфраструктурные компании), действующих в определенных сферах и взаимодополняющих друг друга» [5, с. 389].

¹ Работа выполнена при поддержке БРФФИ (договор с БРФФИ №Г21М-012 от 01.07.2021 г.).

Анализируя приведенное определение, можно прийти к выводу о том, что предприятия, входящие в состав кластера, географически локализованы, благодаря чему представляется возможным совместное использование факторов производства, сконцентрированных на данной территории (экономический фактор, капитал, рабочая сила). Доверительные отношения, сформировавшиеся при взаимодействии участников кластера, будут способствовать обмену информацией, технологиями и знаниями. Сотрудничество в области обмена высококвалифицированными кадрами позволит совершенствовать профессиональные компетенции сотрудников, что, помимо непосредственно роста, будет способствовать накоплению социального капитала. В то же время, обмен рабочей силой позволит избежать простоев и достигнуть максимальной производительности. Как нами отмечалось ранее, «прочность связей, устанавливающих доверительные отношения, делает возможным совершение сделок с минимальными транзакционными издержками, что, в свою очередь, экономит не только денежные средства, но и такой важный ресурс как время» [6, с. 54]. При указанных обстоятельствах достижение желаемого результата одним предприятием будет способствовать экономическому и социальному развитию другого предприятия, входящего в состав кластера, а с учетом цепной реакции повышается эффективность деятельности как отдельного предприятия, так и кластера в целом.

Как отмечает Ю. В. Мелешко в своем исследовании, «М. Портер установил взаимосвязь между сильным соперничеством на внутреннем рынке и созданием и поддержанием высокой конкурентоспособности в отрасли. В стране, достигшей ведущих мировых позиций в определенной отрасли, часто имеется ряд сильных местных конкурентов. Конкуренция принуждает фирму совершенствовать производственные процессы и внедрять новшества. Наличие местных конкурентов сводит на нет те преимущества, которые имеются уже потому, что данная фирма действует на своем родном рынке. При этом процесс конкуренции на внутреннем рынке создает преимущество для национальной отрасли в целом, а не только для отдельных фирм» [7, с. 338]. Приведенное заключение говорит о том, что конкуренция между участниками кластера представляется одним из ключевых факторов его становления, так как является источником эффективного функционирования и постоянного совершенствования во избежание проявления застоя, который, в свою очередь, приводит к деградации системы.

В рамках кластера предприятия стремятся к достижению синергии, работая над совместными проектами, при выполнении которых совпадают экономические интересы, но в то же время конкурируют друг с другом при реализации других проектов. При выстраивании стратегии совместной работы через реализацию экономических интересов следует убедиться, что они не противоречат национальным интересам и способы их достижения не являются противоправными. Согласно Концепции национальной безопасности Республики Беларусь, к национальным интересам относится «совокупность потребностей государства по реализации сбалансированных интересов личности, общества и государства, позволяющих обеспечить конституционные права, свободы, высокое качество жизни граждан, независимость, территориальную целостность, суверенитет и устойчивое развитие Республики Беларусь»². В данном случае стоит учитывать, что потребности динамичны и изменчивы, они меняются в зависимости от поведения субъекта – носителя активности. То есть изменения, происходящие в системе, направленные на реализацию потребностей, влияют на трансформацию условий функционирования самого субъекта, что в свою очередь способствует формированию у него новых потребностей, соответствующих главной цели – упрочению жизнеспособности в изменившихся условиях. Жизненность любой системы «можно определить, – пишет Н. В. Герасимов, – как ее атрибутивное свойство, состоящее во внутренней направленности на самосоуществование, способности к нему и осуществлении его во всех возможных отношениях» [3, с. 294]. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о взаимосвязи упрочения жизнеспособности субъекта и обеспечения экономической безопасности предприятия, поскольку при обеспечении экономической безопасности создаются условия, позволяющие предприятию, входящему в состав кластера, функционировать при потенциальных и актуализированных угрозах таким образом, чтобы обеспечить конкурентоспособность производимой продукции и оказываемых услуг не только

на внутреннем, но и на внешнем рынке; а также удовлетворить социально-экономические потребности общества, зачастую пересекающиеся с национальными интересами. В предыдущих исследованиях нами была предложена следующая интерпретация понятия экономической безопасности, используя методологию Н. В. Герасимова при определении экономической системы общества: «Экономическая безопасность – это поддержание нормы функционирования субъекта, обеспечивающееся путем создания единого, устойчивого, организационно оформленного, относительно самостоятельного комплекса механизмов, ориентированного на реализацию социально-экономических интересов и намеченных стратегических целей в условиях актуализированных и потенциальных угроз» [8, 129]. Таким образом, экономическую безопасность представляется возможным охарактеризовать как способность экономической системы функционировать при потенциальных и реально существующих угрозах таким образом, чтобы обеспечить конкурентоспособность производимой продукции и оказываемых услуг не только на внутреннем рынке, но и на внешнем; а также удовлетворить потребности общества и государства.

При разработке механизмов формирования кластерной политики в повышении конкурентоспособности национальной экономики и исследовании конкурентных преимуществ кластера в контексте сетевого сотрудничества, Г. А. Яшева определяет кластер следующим образом: «... сетевая организация комплементарных территориально взаимосвязанных отношений сотрудничества предприятий и организаций (включая специализированных поставщиков, в том числе услуг, а также производителей и покупателей), объединенных вокруг научно-образовательного центра, которая связана отношениями партнерства с местными учреждениями и органами государственного и регионального управления с целью повышения конкурентоспособности предприятий, регионов и национальной экономики» [9, с. 1]. В приведенной трактовке прослеживается тройная спираль, заключающаяся в сотрудничестве государства, предприятия и научно-образовательного учреждения, считается, что данный симбиоз позволит достичь наилучших результатов в повышении конкурентоспособности субъектов, входящих в кластер.

При попытке осмысления и дальнейшего определения какого-либо феномена ученые в своих исследованиях выделяют признаки, соответствующие исследуемому феномену. Так, например, С. Ю. Солодовников и Т. В. Сергиевич выделяют такие признаки кластерной структуры, как «внутриотраслевая кооперация, активное присутствие государства, наличие тесных связей с научно-исследовательскими и образовательными организациями» [10, с. 63]. Названные авторы отмечают, что государственные и местные органы управления играют важную роль в создании и развитии кластеров, также в качестве обязательного условия не указывается географическая близость субъектов хозяйствования, входящих в кластер. Касаемо критерия географической близости следует отметить, что в зависимости от вида экономической деятельности он будет различаться. Так, если рассматривать металлургическую промышленность, то указанный критерий может простирается на несколько сотен километров, в то время как, например, молочная промышленность не сможет выдержать таких условий ввиду нецелесообразности поставок сырья на дальние расстояния.

В условиях сверттехнологичности, «воплощающейся в формировании в реальном секторе экономики 5–6-го технологических укладов» [11, с. 6], для достижения максимального эффекта формировать кластер необходимо в тех сферах, в которых ожидается научно-технологический прорыв, позволяющий занять новую рыночную нишу или расширить существующую. Если абстрагироваться от условия территориальной близости, современное понимание кластера заключается в «рассмотрении его (кластера – прим. авт.) как системы различных видов экономической активности, передовых технологий, коммерческого опыта, рабочей силы, в которой происходит концентрация и увеличение потоков знаний за счет интенсивного взаимодействия участников кластера на условиях одновременно конкуренции и сотрудничества» [12, с. 194]. Эффективное функционирование данной системы способствует развитию научных исследований, в результате чего отдельные регионы получают уникальные конкурентные преимущества и привлекают новые потоки инвестиций.

² Концепция национальной безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P31000575>. – Дата доступа: 13.10.2021.

На основании вышеизложенного нами предлагается следующая интерпретация понятия «кластер»: совокупность горизонтальных и вертикальных связей между субъектами с целью создания единого и устойчивого комплекса, в пределах которого будет осуществляться производство, распределение и социально-значимое потребление материальных средств и благ, с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики в целом и субъектов, входящих в кластер. Для предприятий, входящих в состав кластера, предусматривается снижение затрат на логистику, маркетинг, подготовку кадров, а также снижение транзакционных издержек при производстве и реализации продукции. Помимо предприятий, образующих кластер, положительный эффект будет проявляться на социально-экономическом развитии региона, поскольку обеспечит приток инвестиций, повысит его конкурентоспособность, что, в свою очередь, будет способствовать приращению экономического потенциала и повышению уровня экономической безопасности.

Заключение

Установлена взаимосвязь между понятиями «сети» и «кластер», являющимися родовым и видовым соответственно. Предложена авторская интерпретация понятия «кластер»: совокупность горизонтальных и вертикальных связей между субъектами с целью создания единого и устойчивого комплекса, в пределах которого будет осуществляться производство, распределение и социально-значимое потребление материальных средств и благ, с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики в целом и субъектов, входящих в кластер. По своей природе кластер является идеальной системой, в которой возможно осуществление технологического цикла – от возникновения идеи нового продукта и ее апробации до производства этого продукта и выпуска на рынок, что в особенности актуально в условиях пандемии, при нарушении цепи поставок, а также торговых и санкционных войн.

Список цитированных источников

1. Зельднер, А. Г. Развитие двойных технологий и диффузия инноваций военных отраслей экономики в гражданские: потенциал госкорпораций и условия его реализации / А. Г. Зельднер, В. С. Осипов, С. Н. Сильвестров // Российский экономический журнал. – 2021. – № 4. – С. 52–61.
2. Podolny, J. M. Network Forms of Organization / J. M. Podolny, K. L. Page // Annual Rev. of Sociology. – 1998. – № 24. – P. 57–76.
3. Герасимов, Н. В. Экономическая система: генезис, структура, развитие / Н. В. Герасимов. – Минск : Наука і техника, 1991. – 350 с.
4. Вайлунова, Ю. Г. Формирование сетевых структур как источник конкурентоспособности организаций в Республике Беларусь / Ю. Г. Вайлунова, Г. А. Яшева // Управленец. – 2017. – №4(68). – С. 96–105.
5. Портер, М. Е. Конкуренция / М. Е. Портер – М. : Вильямс, 2010. – 592 с.
6. Бидзюра, Е. А. Социальный капитал как инструмент экономической безопасности на примере Республики Беларусь / Е. А. Бидзюра // Вестник Коми республиканской академии государственной службы и управления. Теория и практика управления. – 2021. – № 2(32). – С. 53–56.
7. Мелешко, Ю. В. Проблемы и перспективы становления в Республике Беларусь логистического кластера / Ю. В. Мелешко // Экономическая наука сегодня. – Минск: БНТУ, 2014. – Вып. 2. – С. 331–341.
8. Бидзюра, Е. А. Теоретические аспекты определения экономической безопасности как экономической категории / Е. А. Бидзюра // Экономическая наука сегодня : сб. науч. ст. / БНТУ. – Минск, 2021. – Вып. 14. – С. 123–132.
9. Яшева, Г. А. Кластерная политика в повышении конкурентоспособности национальной экономики: методика формирования / Г. А. Яшева // Государственное управление. Электронный вестник. – 2007. – № 11. – С. 1–9.
10. Солодовников, С. Ю. Проблемы и перспективы развития черной металлургии Республики Беларусь / С. Ю. Солодовников, Т. В. Сергиевич // Черные металлы. – 2020. – № 11 (1067). – С. 62–68.

11. Солодовников, С. Ю. Тенденции и перспективы развития занятости и создания социально-научного сообщества в условиях модернизации транзитивной экономики: на примере Республики Беларусь / С. Ю. Солодовников // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Д. Экон. и юрид. науки. – 2015. – № 6. – С. 2–9.
12. Бахматова, Е. И. Актуальные аспекты становления и развития теории кластеров в экономике / Е. И. Бахматова // Экономическая наука сегодня. – 2015. – № 3. – С. 190–198.

References

1. Zel'dner, A. G. Razvitiye dvoynnykh tekhnologiy i diffuziya innovatsiy voennykh otraslej ekonomiki v grazhdanskije: potencial goskorporacij i usloviya ego realizacii / A. G. Zel'dner, V. S. Osipov, S. N. Sil'vestrov // Rossijskij ekonomicheskij zhurnal. – 2021. – № 4. – S. 52–61.
2. Podolny, J. M. Network Forms of Organization / J. M. Podolny, K. L. Page // Annual Rev. of Sociology. – 1998. – № 24. – P. 57–76.
3. Gerasimov, N. V. Ekonomicheskaya sistema: genezis, struktura, razvitiye / N. V. Gerasimov. – Minsk : Navuka i tekhnika, 1991. – 350 s.
4. Vajlunova, Yu. G. Formirovanie setevykh struktur kak istochnik konkurentosopobnosti organizacij v Respublike Belarus' / Yu. G. Vajlunova, G. A. YAsheva // Upravlenec. – 2017. – №4(68). – S. 96–105.
5. Porter, M. E. Konkurenciya / M. E. Porter. – M. : Vil'yams, 2010. – 592 s.
6. Bidziura, E. A. Social'nyj kapital kak instrument ekonomicheskoy bezopasnosti na primere Respubliki Belarus' / E. A. Bidziura // Vestnik Komi respublikanskoy akademii gosudarstvennoj sluzhby i upravleniya. Teoriya i praktika upravleniya. – 2021. – № 2(32). – S. 53–56.
7. Meleshko, Yu. V. Problemy i perspektivy stanovleniya v Respublike Belarus' logisticheskogo klastera / Yu. V. Meleshko // Ekonomicheskaya nauka segodnya. – Minsk : BNTU, 2014. – Vyp. 2. – S. 331–341.
8. Bidziura, E. A. Teoreticheskie aspekty opredeleniya ekonomicheskoy bezopasnosti kak ekonomicheskoy kategorii / E. A. Bidziura // Ekonomicheskaya nauka segodnya : sb. nauch. st. / BNTU. – Minsk, 2021. – Vyp. 14. – S. 123–132.
9. Yasheva, G. A. Klaster'naya politika v povyshenii konkurentosopobnosti nacional'noj ekonomiki: metodika formirovaniya / G. A. Yasheva // Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik. – 2007. – № 11. – S. 1–9.
10. Solodovnikov, S. YU. Problemy i perspektivy razvitiya chernoy metallurgii Respubliki Belarus' / S. YU. Solodovnikov, T. V. Sergievich // CHernye metally. – 2020. – № 11 (1067). – S. 62–68.
11. Solodovnikov, S. Yu. Tendencii i perspektivy razvitiya zanyatosti i sozdaniya social'no-nauchnogo soobshchestva v usloviyah modernizacii tranzitivnoj ekonomiki: na primere Respubliki Belarus' / S. Yu. Solodovnikov // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. D. Ekon. i jurid. nauki. – 2015. – № 6. – S. 2–9.
12. Bahmatova, E. I. Aktual'nye aspekty stanovleniya i razvitiya teorii klasterov v ekonomike / E. I. Bahmatova // Ekonomicheskaya nauka segodnya. – 2015. – № 3. – S. 190–198.

Материал поступил в редакцию 17.03.2022

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ И ПРИЗНАКИ ПСИХОГРАФИЧЕСКОГО СЕГМЕНТИРОВАНИЯ В ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ МАРКЕТИНГЕ

Е. С. Викторovich

Аспирант государственного учреждения образования «Республиканский институт высшей школы»,
Минск, Республика Беларусь, e-mail: sovetsnik@brest-region.gov.by

Реферат

Статья посвящена рассмотрению взаимодействия управления территориями и сегментирования потребителей. Инструменты и методы сегментирования целевой аудитории при создании бренда территории или при информационном воздействии на политический рынок. Модели VALS и VALS 2, которые рассматриваются в статье, актуальны, в том числе и для создания, поддержания или изменения отношения общественности к конкретным политическим деятелям, партиям или движениям. Статья позволяет расширить знания об эффективных методах выделения потребительского сегмента для разработки максимально адаптивной маркетинговой стратегии продвижения и наиболее оптимального пути продвижения политического товара с наименьшим количеством затрат. Материалы статьи также могут быть полезны и для изучения различных типов потребительского поведения с психологической точки зрения.

Ключевые слова: территориальный маркетинг, сегментирование, инструменты маркетинга, критерии сегментации, потребительские группы.

MAIN FACTORS AND SIGNS OF PSYCHOGRAPHIC SEGMENTATION IN TERRITIOIAL MARKETING

E. S. Viktorovich

Abstract

The article is devoted to the consideration of the interaction between the management of territories and segmentation of consumers. Tools and methods for segmenting the target audience when creating a brand of a territory or when influencing the political market with information. The VALS and VALS 2 models discussed in the article are relevant, including for creating, maintaining or changing public attitudes towards specific political figures, parties or movements. The article allows you to expand knowledge about effective methods for highlighting the consumer segment to develop the most adaptive marketing promotion strategy and the most optimal way to promote a political product, with the least amount of costs. The materials of the article can also be useful for studying various types of consumer behavior from a psychological point of view.

Keywords: territorial marketing, segmentation, marketing tools, segmentation criteria, consumer groups.

Введение

Территориальный маркетинг – это современная философия управления территорией, в основе которой лежит новое понимание роли и функций территориальных органов власти. Исполнительная власть призвана эффективно управлять ресурсами своей территории и оказывать населению общественные услуги, то есть выполнять ряд функций в пределах своей компетенции, что может повысить привлекательность территории для проживания и ведения деятельности. Конкретная территория начинает рассматриваться физическими и юридическими лицами как один из вариантов применения своих умений и навыков, финансовых, материальных и иных ресурсов. Постоянное сравнение комфортности, безопасности проживания, стабильности и предсказуемости ведения бизнеса на конкретных территориях обуславливают в рыночной экономике миграцию лиц и движение капиталов.

К числу основных субъектов маркетинга территории относятся:

- производители того или иного продукта (товаров, услуг и др.);
 - потребители территориального продукта (покупатели, пользователи);
 - финансовые посредники;
 - информационные посредники;
 - государственные структуры: муниципальные и федеральные;
 - общественные структуры и др.
- Объектами региональных экономических интересов являются:
- ресурсы;
 - результаты хозяйственной деятельности предприятий;
 - социально-экономическая ситуация в регионе;
 - уровень жизни населения;
 - социальная сфера;
 - уровень занятости населения;
 - деловая активность населения и пр.

Реализация плана маркетинга может способствовать достижению ряда количественных результатов, таких как увеличение объемов добываемых, перерабатываемых природных ресурсов; создание

новых предприятий; расширение деятельности существующих предприятий; увеличение количества предприятий-резидентов территории; увеличение объемов внешних инвестиций в целом и по приоритетным отраслям; увеличение миграционного потока в целом, в том числе лиц трудоспособного возраста; сокращение оттока населения с территории в целом, в том числе молодежи и т. д.

Выделение признаков сегментирования потребительского рынка

К инструментам маркетинга территорий относят:

1. Территориальный продукт – ресурсы территории.
 2. Цена продукта территории – затраты потребителя, связанные с приобретением территориального продукта, проживания на территории региона либо ведения какого-либо вида деятельности (хозяйственная, творческая деятельность и т. п.).
 3. Месторасположение – особенности геополитической локализации территориальной единицы.
 4. Продвижение территориальной единицы – осуществление действий по формированию имиджа и привлекательности территории у потребителей территориального продукта, применение инструментов брендинга к развитию региона.
- Территориальный продукт можно рассматривать как сложную структуру, состоящую из 3-х элементов:
1. Это конкретные характеристики территории (природные ресурсы территории, климат, месторасположение, развитие транспортного сообщения, виды деятельности на территории, уровень экологической безопасности, статусная нация и другие характеристики). В этом случае человек воспринимает территорию как объект своего месторасположения в пространстве, т. е. превагирует «географическая» оценка территории со всеми вытекающими из этого последствиями.
 2. Территория воспринимается человеком как конкретное место, где, проживая и/или осуществляя деятельность, он будет получать доходы и их тратить. Поэтому для человека значимыми являются наличие работы, уровень заработной платы, величина

прожиточного минимума, возраст выхода на пенсию и размер пенсии, совокупность товаров и услуг, которые производятся или оказываются на данной территории и могут представлять интерес для личного потребления и развития делового сотрудничества, и другие характеристики. В этом случае человек воспринимает территорию как объект своих экономических и социальных интересов в момент времени «сейчас» и/или в момент времени «завтра».

3. Это система организации и качество менеджмента данной территории, который осуществляют органы представительной и исполнительной власти. Частное лицо воспринимает этот элемент территориального продукта как общественно организованную силу, которая будет направленно и активно влиять на его жизнь и деловую активность на данной территории. Например, на территории разработана и действует программа обеспечения жильем молодых специалистов, работающих в сельской местности, или существуют финансовые доплаты за счет средств местного бюджета учителям, или действует программа поддержки инвесторов.

Для применения маркетинговых технологий необходимо найти рыночные ниши (сегменты), для чего проводятся маркетинговые исследования.

Стратегия сегментации – работа на нескольких сегментах, рассматривая каждый сегмент с учетом его потребностей – позволяет сосредоточить внимание на потребностях покупателей. Сегментирование – это разделение целевого рынка на четко выраженные группы покупателей, каждая из которых может приобрести определенные товары и/или услуги [1]. Непосредственно сегментирование рынка – это процесс деления потребителей на группы в соответствии с рядом устойчивых признаков, называемых маркетинговыми «признаками сегментирования».

Главными доводами в пользу проведения сегментации являются следующие:

1. Обеспечивается лучшее понимание не только нужд потребителей, но и того, что они из себя представляют (их личностные характеристики, характер поведения на рынке и т. п.)
2. Обеспечивается лучшее понимание природы конкурентной борьбы на конкретных рынках. Исходя из знания данных обстоятельств легче выбирать рыночные сегменты для их освоения и определять, какими характеристиками должны обладать продукты для завоевания преимуществ в конкурентной борьбе.
3. Представляется возможность концентрировать ограниченные ресурсы на наиболее выгодных направлениях их использования.
4. При разработке планов маркетинговой деятельности учитываются особенности отдельных рыночных сегментов, в результате чего достигается высокая степень ориентации инструментов маркетинговой деятельности на требования конкретных рыночных сегментов.
5. Критерии сегментации.

Первым шагом при проведении сегментации является выбор критериев сегментации. При этом надо проводить различие между критериями сегментации рынков потребительских товаров, продукции производственного назначения, услуг и др. Так, при сегментации рынка потребительских товаров используются такие критерии, как географические, демографические, социально-экономические, психографические, поведенческие и др. (рисунок 1).



Рисунок 1 – Типы и признаки сегментации потребительского рынка

Географическая сегментация – деление рынка на различные географические единицы: страны, регионы, области, города и т. д.

Демографическая сегментация – деление рынка на группы в зависимости от таких характеристик потребителей, как возраст, пол, семейное положение, жизненный цикл семьи, религия, национальность и раса.

Социально-экономическая сегментация предполагает деление потребителей по уровню доходов, роду занятия, уровню образования.

Психографическая сегментация – деление рынка на различные группы в зависимости от социального класса, жизненного стиля или личностных характеристик потребителей.

Поведенческая сегментация предполагает деление рынка на группы в зависимости от таких характеристик потребителей, как уровень знаний, отношения характер использования продукта или реакции на него на него.

В соответствии с отношением выделяют сегментацию: по обстоятельствам применения, на основе выгод, на основе статуса пользователя, на основе интенсивности потребления, на основе степени лояльности, на основе стадии готовности покупателя к совершению покупки.

Сегментация по обстоятельствам применения – деление рынка на группы в соответствии с обстоятельствами, поводами возникновения идеи, совершения покупки или использования продукта.

Сегментация на основе выгод – деление рынка на группы в зависимости от выгод, пользы, которые ищет потребитель в продукте.

Статус пользователя характеризует степень регулярности использования какого-то продукта его пользователями, которые делятся на не использующих продукт, бывших пользователей, потенциальных пользователей, на пользователей-новичков и на регулярных пользователей.

Интенсивность потребления – показатель, на основе которого рынки сегментируются на группы слабых, умеренных и активных потребителей определенных продуктов. Очевидно, что выгоднее обслуживать один рыночный сегмент, состоящий из значительного числа активных потребителей, чем несколько небольших сегментов слабых потребителей.

Степень лояльности характеризует степень лояльности, приверженности потребителя определенной марке продукта, обычно измеряется числом повторных покупок продукта данной марки.

Стадия готовности покупателя – характеристика, в соответствии с которой покупателей классифицируют на неосведомленных и осведомленных о продукте, на заинтересованных в нем, на желающих его купить и на намеренных его купить.

При сегментации рынка продукции производственно-технического назначения в первую очередь используются следующие критерии: географическое местоположение; тип организации, приобретающей товар; размер закупок; направления использования купленных товаров.

В теории и практике наибольшее применение находят две группы признаков сегментации – социо-экономические и психологические. Последние ориентированы на отношения, поведение субъектов системы маркетинга. Первая группа признаков сегментации включает объективные признаки и является базовой для второй группы. Поэтому сегментацию рынка на основе первой группы переменных называют классической или демографической, а с использованием второй группы признаков – «совершенной» или психографической. Психография – описание личности; общий подход, основанный на изучении личностных характеристик потребителей, их мотивации к покупке, поведения, жизненных ценностей и верований.

Одним из первых психографических инструментов стала модель AIO, описывающая жизненный стиль потребителей по трем группам параметров – деятельность (activities), интересы (interests), мнения (opinions) [2]. Так, деятельность анализируется с точки зрения занятий потребителя, т. е. профиля работы, свободного времени, отпуска и т. д.; интересы – насколько потребитель является примерным семьянином, чем он питается, как одевается и др.; мнения – что он думает о себе, о своем ближайшем окружении, политике страны, экономике и др. На основе полученных данных составляют портрет потребителя, который ложится в основу признаков сегментации [3].

Цель психографического сегментирования рынка – разработать маркетинговую программу, все элементы которой соответствуют большей части целевого рынка. Основным принцип сегментирования заключается в самих критериях оценки, которые характеризуют тип личности:

1. Стиль жизни (интересы, организация свободного и рабочего времени, манеры поведения).
2. Личностные качества (эмоционально-чувственные, коммуникативные, поведенческие, творческие, мыслительные).
3. Мотивация покупки (причины, по которым осуществляется покупка).
4. Реакция на нововведения (в отношении к инновациям могут быть новаторы, консерваторы или промежуточные реакции).
5. Отношение к себе (то, как человек ощущает себя в этом мире).
6. Жизненная позиция (пассивная или активная, спокойная или агрессивная).
7. Основные ценности (какое место занимает семья, самореализация, свобода, любовь, социальный статус, развлечения, материальное благополучие в жизни потребителей).

Более подробно изучена психографическая сегментация на основе модели VALS. Известная модель психографической сегментации VALS (англ. Value and Lifestyle — «ценности и типы образа жизни») была разработана Стенфордским исследовательским институтом в 1978 году, в основе которой используется два критерия разделения потребителей на группы: мотив покупки и черты характера. Согласно модели VALS, условно всех потребителей можно разделить на 4 основные группы:

- Потребители, которые руководствуются потребностями, а не предпочтениями (достаточно бедные слои населения без хорошего образования).
- Потребители, которые находятся под влиянием различных внешних факторов (их волнует общественное мнение и то, что сейчас соответствует тенденциям моды).
- Потребители, выбор которых обусловлен внутренними факторами (такая группа потребителей прислушивается к себе, к своим предпочтениям и потребностям).
- Потребители-индивидуалы, которые включают в себя различного рода характеристики из предыдущих трех групп.

По классификации психографического сегментирования VALS мотивация бывает трех видов:

- Мотивация на основе стремления к идеалам: потребитель делает выбор исходя из того, что он знает и считает значимым.
- Мотивация на основе стремления к достижениям: потребитель приобретает товары и услуги, которые могут подчеркнуть его социальный статус и поднять в глазах окружающих.
- Мотивация на основе стремления к самовыражению: потребитель совершает покупку в пользу своей уникальности и индивидуальности.

В зависимости от принадлежности потребителей к перечисленным выше группам выделяют 8 основных сегментов согласно модели VALS.

По классификации психографического сегментирования VALS можно выделить три вида мотивации выбора:

1. Стремление к идеалу.

В основе выбора потребителя – консервативность знаний и принципов. Выбор этого типа потребителя ориентирован на собственный комфорт.

2. Стремление к достижениям.

Главная черта поведения потребителя – позиционирование себя как успешного. Выбор людей с таким мотивом основывается на цели демонстрации своего успеха.

3. Стремление к самовыражению.

Потребители, у которых главенствует данный тип мотивации, руководствуются принципами уникальности предмета (дорогостоящие гаджеты, вещи, которые изготавливаются ограниченными сериями) [4].

Обратимся к восьми психотипам, которые являются основой данной модели сегментирования [5].

1. Инноваторы (Innovators). Люди, способные проявлять все три уровня базовых мотиваций. Они открыты новым технологиям и тенденциям, являются активной группой потребителей с уточненным вкусом. Обычно выбирают нишевые товары или услуги. С помощью покупок выражают независимость.

2. Мыслители (Thinkers). Ответственно и рассудительно подходят к выбору товара или услуги. При выборе склонны к поиску исчерпывающей информации о товаре. Мыслители следят за новостями, в курсе последних трендов, в том числе и в области товаров и услуг. При выборе товара данный сегмент придерживается консерватизма, ориентируясь на функциональность и стоимость покупки.
3. Последователи (Believers). Потребительское поведение последователей достаточно предсказуемо. Они выбирают привычные продукты известных брендов, хорошо относятся к местным производителям, проявляют высокую лояльность к уже испробованным товарам и услугам, редко соглашаются на инновационные предложения.
4. Добивающиеся (Achievers). Данный сегмент имеет четкую цель и жизненную позицию, что сказывается на их потребительском выборе. Семья, социальный и профессиональный статус – три ключевые цели, влияющие на их поведение. При заинтересованности на потребительском рынке имеют потребность в удовлетворении сразу нескольких желаний и стремлений, так как в жизни нацелены на многозадачность. Уделяют большое внимание имиджу – предпочитают известные и престижные товары. Выбирают продукты, способные сэкономить их время.
5. Старающиеся (Strivers). Потребительский сегмент, который следует трендам и уделяет большое внимание моде, так как беспокоится, что думают о нем окружающие. Ограничены в финансах, однако являются активными участниками рынка и уделяют большое внимание шопингу, чтобы поравняться с группой людей с достатком, что приводит к необходимости экономить на товарах, не являющихся выражением социального статуса. Иногда старающиеся проявляют повышенную склонность к кредитам и к азартным играм/ лотереям, так как в большинстве являются энергичными (иногда импульсивными) молодыми людьми.
6. Экспериментаторы (Experiencers). Сегмент молодежи, которую привлекает разнообразие, риски, непостоянство, непривычные и новые вещи. Сильно мотивированы на самовыражение. Экспериментаторы являются заядлыми потребителями, большую часть своих доходов готовы тратить на моду, развлечения, отдых. Также, как и предыдущий кластер, проявляют импульсивность. Предпочитают хорошо выглядеть и являться обладателями «крутых» товаров и услуг.
7. Творцы (Makers). Данный вид потребителей нацелен на создание ценностно важных вещей — построи дом, вырастить детей, купить автомобиль, поэтому развивают мастерство, навыки и приобретают знания. Творцы с подозрением относятся к новым идеям и большим корпорациям. Не являются ценителями продуктов роскоши, достаточно практичны в своем выборе и предпочитают товары, удовлетворяющие базовые потребности.

Модель VALS-2 делит общество на восемь сегментов по двум направлениям (рисунок 2) [6].

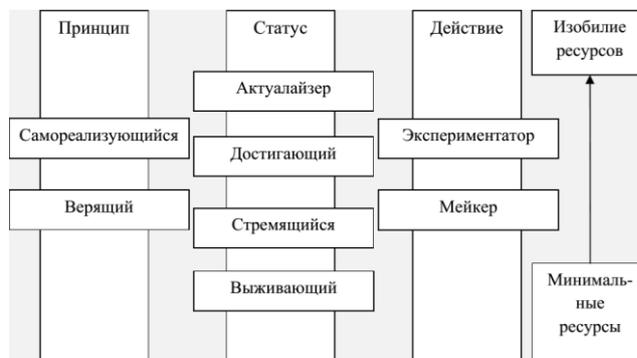


Рисунок 2 – Модель VALS-2

Классификация VALS-2 разделяет людей на группы в зависимости от того, как они проводят время и тратят деньги. Потребители согласно этой модели делятся на группы в зависимости от корреляции двух показателей: самоориентация и доходы

По классификации психографического сегментирования VALS 2 можно выделить три общие потребительские группы, которые отличаются характеристиками, на которые они ориентируются при выборе товара:

- Ориентированные на принцип (principle). Данная аудитория основывается при выборе продукта только на личных убеждениях, не доверяя мнению и советам окружающих.
- Ориентирование на статус (status). В отличие от первой группы, данные потребители в процессе приобретения товара основываются на одобрении окружающих.
- Ориентирование на действие (action). Третья группа руководствуется потребностью в физической или социальной активности, разнообразием и насыщенностью.

Рассмотрим подробно следующие восемь психотипов модели VALS 2, обратив внимание на систему ценностей потребителей, их положение в обществе и, прежде всего, мотивы при выборе продукта [7].

1. Реализующие (Actualizers). Потребители, стремящиеся удовлетворить в первую очередь потребность в самовыражении. Уделяют большое внимание личному росту и развитию, а также самостоятельности и независимости. Зачастую являются лидерами в сфере бизнеса и имеют большую власть. Покупают товары высокого качества, не задумываясь о цене.
2. Осуществляющие (Fulfilled). Консервативность вкусов обусловлена обеспеченностью, образованностью и зрелым возрастом потребительской группы, которая в связи с этим отдает предпочтение прочным и функциональным товарам.
3. Преуспевающие (Achievers). Карьеристы, которые делают акцент на престиже товара. Данная группа также имеет несколько консервативные взгляды, стремится к стабильности и избегает рисков.
4. Рискующие (Experiencers). В большинстве данный психотип представляет молодая аудитория. Яркая черта характера – импульсивность, которая играет главную роль при выборе товара.
5. Убежденные (Believers). Лояльные потребители брендов: много лет отдают предпочтение конкретным продуктовым маркам, несмотря на то, что на рынке появляются новые предложения. Среди личностных качеств можно выделить консервативность, уважение традиций и ценностей.
6. Старающиеся (Strivers). В связи с ограниченными материальными ресурсами данная группа зачастую чувствует себя незащищенной и принимает все усилия, чтобы выйти на новый уровень дохода, добиться комфортной жизни. Приобретают товары, которые формируют имидж, однако превышают уровень дохода старающихся.
7. Практики (Makers). Данный психотип меньше всего способен оказаться под влиянием рекламы и сделать импульсивную покупку. Для практиков, прежде всего, важна функциональность, качество и надежность товара, а престижность и дизайн могут быть хорошим дополнением, но будут оставаться на втором плане.
8. Сопrotивляющиеся (Strugglers). Представители данной потребительской группы являются людьми в возрасте, которые имеют некоторые заболевания и ограниченность денежных ресурсов. В связи с этим обладают высоким уровнем скептицизма и осторожности, выбирают знакомые марки товаров.

Вывод

Метод VALS получил широкое распространение в маркетинге при сегментации потребительского рынка, позволяя учитывать социально-демографическую составляющую его поведения. Способ также описывает стиль жизни и поведение потребителя. Однако данная технология имеет объективные ограничения, поскольку жизненный стиль клиента не бывает идеальным. Любой потребитель склонен совершать нетипичные для него поступки. Кроме того, приведенная выше методика сегментирования характерна скорее для американского общества.

Психографическое сегментирование рынка позволяет найти уникальный подход к каждому типу покупателей, выявить наилучшие каналы коммуникации с отдельными сегментами рынка, проанализировать соответствие товара и его восприятия покупателями,

разработать подходящую упаковку и найти способы привлечения новых покупателей. Психографическая сегментация рынка является перспективным направлением улучшения производства, развития коммуникаций и становления хороших отношений между людьми.

Она позволяет выделить однородные группы клиентов, одинаково реагирующих на маркетинговые стимулы, а также одновременно учитывать традиционные признаки (уровень дохода, социальную группу) и такие важные факторы, как стиль жизни и систему ценностей, что способствует наиболее точному пониманию нужд потенциальных потребителей.

Список цитированных источников

1. Краснов, А. С. Технологические тренды маркетинга в цифровой экономике / А. С. Краснов // Неделя науки СПбПУ. Материалы научн. конф. с междунар. участием. – СПб. : Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли, 2018. – С. 486–488.
2. Зотова, Т. А. Поведение потребителей: теория и практика / Т. А. Зотова. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 222 с.
3. Лыгина, Н. И. Поведение потребителей: учеб. пособие для вузов / Н. И. Лыгина, Г. А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Юнити-Дана, 2007. – 239 с.
4. Лапшова, О. А. Сегментирование потребителей по психографическому признаку / О. А. Лапшова // Личность в пространстве и времени. – 2019. – № 8. – С. 112–118.
5. Лобанова, А. С. Теория и практика применения модели психографического сегментирования VALS в маркетинге / А. С. Лобанова, С. А. Санинский, Л. Л. Аверьянова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2016. – Т. 11. – С. 3301–3305.
6. Алёшина, И. В. Поведение потребителей: учебник / И. В. Алёшина. – М. : Экономист, 2006. – 525 с.
7. Типы потребителей в модели VALS 2. Характеристика стиля жизни [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vuzlit.ru/248618/typy_potrebiteley_modeli_vals. – Дата доступа: 10.03.2022.

References

1. Krasnov, A. S. Tekhnologicheskie trendy marketinga v cifrovoj ekonomike / A. S. Krasnov // Nedelya nauki SPbPU. Materialy nauchn. konf. s mezhdunar. uchastiem. – SPb. : Institut promyshlennogo menedzhmenta, ekonomiki i trgovli, 2018. – S. 486–488.
2. Zotova, T. A. Povedenie potrebitelej: teoriya i praktika / T. A. Zotova. – Rostov n/D : Feniks, 2008. – 222 s.
3. Lygina, N. I. Povedenie potrebitelej: ucheb. posobie dlya vuzov / N. I. Lygina, G. A. Vasil'eva. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Yuniti-Dana, 2007. – 239 s.
4. Lapshova, O. A. Segmentirovanie potrebitelej po psihograficheskomu priznaku / O. A. Lapshova // Lichnost' v prostranstve i vremeni. – 2019. – № 8. – S. 112–118.
5. Lobanova, A. S. Teoriya i praktika primeneniya modeli psihograficheskogo segmentirovaniya VALS v marketinge / A. S. Lobanova, S. A. Saninskij, L. L. Aver'yanova // Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal «Koncept». – 2016. – T. 11. – S. 3301–3305.
6. Alyoshina, I. V. Povedenie potrebitelej: uchebnik / I. V. Alyoshina. – M. : Ekonomist, 2006. – 525 s.
7. Tipy potrebitelej v modeli VALS 2. Harakteristika stilya zhizni [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://vuzlit.ru/248618/typy_potrebiteley_modeli_vals. – Data dostupa: 10.03.2022.

Материал поступил в редакцию 18.05.2022

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В. В. Зазерская

К. э. н., доцент, декан экономического факультета Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: zazerskaya@mail.ru

Реферат

На основе результатов исследования подходов к рассмотрению категории экономического развития региона в работе уточнен понятийный аппарат, обоснована взаимосвязь понятий «развитие», «экономическое развитие», «экономическое развитие региона» и сформулирована авторская трактовка понятия экономического развития региона. Рассмотрены ключевые признаки развития ЭС, закономерности эволюционного развития социально-экономических систем, характерные для современного этапа развития мировой экономики. Дополнена классификация видов развития социально-экономических систем критерием «структурные изменения», который учитывает приращение экономических результатов за счёт участия в интеграционных процессах.

Ключевые слова: регион, развитие, экономическое развитие, экономическое развитие региона, структурные изменения, трансграничное сотрудничество, инновации, инфраструктура, экономическая интеграция, трансграничный регион, пространственное развитие территорий.

THEORETICAL ASPECTS OF THE ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE REGION IN MODERN CONDITIONS

V. V. Zazerskaya

Abstract

Based on the results of the study of approaches to considering the category of economic development of the region, the paper clarifies the conceptual apparatus, substantiates the relationship between the concepts of "development", "economic development", "economic development of the region" and formulates the author's interpretation of the concept of economic development of the region. The key features of the development of ES, the patterns of evolutionary development of socio-economic systems, characteristic of the current stage of development of the world economy, are considered. The classification of the types of development of socio-economic systems has been supplemented with the criterion of "structural changes", which takes into account the increment of economic results due to participation in integration processes.

Keywords: region, development, economic development, economic development of the region, structural changes, cross-border cooperation, innovations, infrastructure, economic integration, cross-border region, spatial development of territories.

Введение

Регион как центральный элемент административно-территориального устройства, а также и всей экономической системы страны представляет собой агломерацию производительных сил, характер которых определён природно-географическими, социально-экономическими, демографическими и другими особенностями. Цикличность его развития влияет на экономическое развитие всего государства. Поэтому проблемы экономического развития регионов являются актуальными и в настоящее время.

Теоретические аспекты регионального развития

Экономический подход понимает под регионом часть территории, где существует система связей между хозяйственными субъектами, подсистему всего социально-экономического комплекса страны, сложный территориально-экономический комплекс со своей структурой связи с внешней и внутренней средой. Многие ученые акцентируют внимание на критерии общественного разделения труда. Согласно этому критерию И. В. Арженовский рассматривает регион как «выделившуюся в процессе общественного разделения труда часть территории страны, которая характеризуется специализацией на производстве товаров и услуг, общностью и специфическим по отношению к другим территориям характером воспроизводственного процесса; комплексностью и целостностью хозяйства, наличием органов управления, обеспечивающих решение стоящих перед регионом задач» [1]. В. С. Бильчак и В. Ф. Захаров видят регион как социально-экономическую пространственную целостность, характеризующуюся структурой производства всех форм собственности, концентрацией населения, рабочих мест, духовной жизни человека из расчета на единицу пространства и времени, имеющую местные органы управления территорией (область, край, республика) [2]. Н. М. Некрасов предложил критерий выделения региона – общность народно-хозяйственных задач. Под регионом он понимает крупную территорию страны с более-менее однородными природными условиями и характерной направленностью развития производительных сил на основе сочетания комплекса природных ресурсов

с соответствующей сложившейся и перспективной материально-технической базой, производственной и социальной инфраструктурой. Согласно нормативному подходу регионом считается область, административный район, группа административных районов или иных административно-территориальных и территориальных единиц в соответствии с [3].

Таким образом, регион в нашем исследовании – это территория в административных границах в составе государства, обладающая характеристиками: комплексностью, целостностью, специализацией и управляемостью, то есть наличием политико-административных органов управления.

В последние годы увеличивается самостоятельность регионов, которые несут все большую ответственность за результаты регионального экономического развития. Очевидно, что исследование проблем, связанных с экономическим развитием регионов, направленных на оптимизацию использования имеющихся в их пределах ресурсов и выбор основных приоритетов в развитии каждого из регионов, является приоритетным.

Цель данной статьи – раскрыть сущность экономического развития регионов на текущем этапе развития экономики, а также проанализировать существующие подходы к гносеологическому осмыслению развития, экономического развития, экономического развития региона как социально-экономических категорий.

Одним из базовых понятий экономической науки является развитие. Данную категорию рассматривают в рамках различных наук – развитие в философии, развитие в экономике, развитие в социологии и т. д. Рассматривая указанную категорию с точки зрения философии, её можно определить как необратимое, направленное, закономерное изменение. Причем наличие указанных свойств является обязательным отличием процессов развития от иных изменений. В рамках немецкой классической философии развитие рассматривается как универсальная категория, источником которого выступают борьба и преодоление противоположностей. Г. Гегель описал природный, исторический и духовный мир в виде процесса непрерывного движения, изменения, преобразования и развития и разработал

диалектику как системы принципов, законов и категорий. Марксистская теория трактует развитие в качестве универсального свойства материи, основы для объяснения исторического развития общества и осознания его особенностей [4]. В качестве общей теории развития выступает материалистическая диалектика, которая посредством своих основных законов определяет такие особенности процесса развития, как: единство и борьба противоположностей, трансформация количественных изменений в качественные.

Современное научное представление о развитии базируется на положениях теории систем, где категория «развитие» используется для описания системной динамики. Так, А. В. Бузгалин связывает диалектический метод с теорией больших систем: «... если мы ставим перед собой проблему исследования законов рождения, развития и заката «больших» систем, мы неизбежно встаем перед необходимостью использования системного диалектического метода» [5]. Метод исследования систем «от абстрактного к конкретному» отображает процесс полагания и снятия противоречий как действительное развитие системы. Данный метод показывает действительные процессы развития системы через выявление специфики каждого их разнокачественных элементов, субординирует их, выделяет их действительное конкретное единство, показывая их некантифицируемые связи, отображает устойчивые закономерности развития. Л. Н. Щербакова утверждает, что в рамках такого подхода выявляется отличие от функционально-математического метода, который дает результативность только в случае анализа однокачественных связей и элементов (кантифицируемых) [6]. В таком случае развитие в отличие от функционирования однокачественных объектов предполагает качественные трансформации.

Эволюционный подход к возникновению развития предложенный теорией естественного отбора отождествляют с моделью конкурентной борьбой за ограниченные ресурсы. В своей работе [7] И. Шумпетер концепцию развития представлял как изменения, рожденные рыночным устройством общества, однако рынок у него является не простым механизмом, а сферой радикальных изменений. Главным моментом в развитии экономики ученый считал не плавные и постепенные изменения, а скачки, для которых первый тип изменений является лишь фоном. И. Шумпетер суть развития видел в переходе от одного состояния равновесия к другому под влиянием инноваций. «Новаторы вытесняют консерваторов» из среды социально-экономического взаимодействия и занимают «освободившуюся нишу» [7].

Институциональная точка зрения на это понятие определяет развитие как необратимый закономерный процесс изменения окружающего мира. Представитель институциональной школы Г. Мюрдаль считал: «Под развитием все мы фактически понимаем движение вперед всей социальной системы» [8]. А. Н. Олейник полагал, что анализ трех типов организаций – фирм, государств, домашних хозяйств – формирует институциональную теорию долгосрочного развития. Кроме того, он обращает внимание на необходимость выявления роли институциональных факторов в неоклассическом варианте теории развития и в неокейнсианских теориях экономической динамики для выявления принципов институциональной теории развития [9].

Таким образом, при определении развития региона необходимо учитывать следующие ключевые признаки:

- необратимое, направленное, закономерное изменение системы с переходом к цели более высокого качественного уровня;
- процесс изменений системы в продолжительном временном периоде;
- процесс количественных и качественных изменений системы;
- процесс изменений системы, обусловленный воздействием факторов внешней и внутренней среды;
- переход системы из исходного качественного состояния в лучшее, более целесообразное для дальнейшей деятельности.

Исходя из данных признаков, понятие «развитие» отражает переход региона из исходного состояния в более эффективное, соответствующее поставленным целям.

Отметим, что качественные изменения происходят вследствие определенных закономерностей эволюционного развития социально-экономических систем, характерных для современного этапа развития мировой экономики:

- влияние глобализации и регионализации на развитие социально-экономических систем. Глобализация и регионализация преду-

сматривают усиление международного взаимодействия и способствуют росту открытости экономики, и приносят как положительный, так и отрицательный эффект. Экономическая интеграция дает возможность широкого использования ресурсов, новейших технологий, производство продукции в расчете на емкий рынок. Регионализация проявляется через внутреннюю интеграцию для сохранения культурного своеобразия и самостоятельности национальных рынков, а также стимулирует возникновение специфических экономических и политических образований, которые будут решать проблемы именно этого конкретного территориального пространства;

- цифровизация развития социально-экономических систем. Цифровые технологии, как драйверы экономического роста, приводят к изменению спроса на факторы производства. Они привносят новые бизнес-модели, что подвергает трансформации не только отдельные сектора, но и всю структуру экономики и межотраслевые взаимодействия. Максимальные экономические эффекты могут быть достигнуты при кардинальном повышении производительности и инвестиционной активности в отраслях экономики. Таким образом, в долгосрочной перспективе цифровизация способна стать значимым структурным фактором экономического роста;
- усложнение взаимодействия социально-экономических систем. Изменения в экономике за счёт интеграции, объединения материальных и финансовых ресурсов и пр. приводят к организации технологических цепочек, что способствует повышению конкурентоспособности экономик и ускорению экономического развития экономических систем (ЭС);
- цикличность развития социально-экономических систем;
- взаимозависимость и соподчиненность развития социально-экономических систем;
- неравномерность развития различных социально-экономических систем.

Данные закономерности развития экономических систем во многом определяются факторами ЭС, становление, изменение которых приводят к структурным изменениям, происходящим на основе взаимодействия различных видов и форм разделения и комбинации труда, производства и ведения бизнеса.

К факторам ЭС, вызывающим трансформацию мы относим макроэкономическую стабильность, развитие научно-технической, финансовой и промышленной инфраструктуры, институциональные преобразования. Они формируют базис качественного развития и повышают эффективность инструментов структурной трансформации. Структурные преобразования являются причиной экономического роста [10], а его акселератором по мнению Д. Родрика производительности труда, которая позволяет промышленным предприятиям более мобильно встраиваться в глобальные продуктовые цепочки, проводить трансфер технологий и обеспечивать высокую конкурентоспособность на длительном временном интервале [11]. Такого же мнения придерживается и И. А. Забелина и Е. А. Клевакина [12], утверждая, что эффективность функционирования производственных цепочек определяется производительностью труда. В своих исследованиях, посвящённых развитию методологических основ и методов измерения наблюдаемых трансформаций, некоторые авторы акцентирует внимание на взаимосвязи между структурными изменениями и экономическим ростом [13]. Другим параметром изменений является уровень развития технологий [14].

Обобщая существующие исследования в рамках теории экономического развития и теории структурных сдвигов, считаем необходимым выделить структурные изменения, происходящие в структуре воспроизводства и специализации хозяйственных систем регионов, вовлеченных в интеграционное (трансграничное) взаимодействие в закономерность, характеризующую современное изменение и развитие ЭС. Структурные изменения как преобразование, перерождение, видоизменение экономической системы выступают процессом ее непрерывного движения, качественного изменения эволюционного и революционного характера. Изменения во внутренней организации элементов в системе (или частей целого) раскрывают способность целого к развитию, а также вариативность при преобразованиях целого. Это дает возможность считать их видовым критерием в классификации развития социально-экономических систем, который учитывает приращение экономических результатов за счёт участия в интеграционных процессах. При этом уровень интеграции

определяется через связь темпов экономического развития с текущими материальными затратами и с формированием отраслевой структуры общественного продукта регионов.

Недостаточность методологической базы предопределило доплатнение классификации видов развития социально-экономических систем критерием «структурные изменения». В зависимости от структурных изменений различают:

- катализаторное развитие, предполагающее формирование темпов расширенного воспроизводства выше среднестатистических для стабильного социально-экономического развития, сокращения разрыва в уровне и качестве жизни населения путем привлечения инвестиций и создания новых рабочих мест;
- расширенное развитие направлено на достижение максимально возможных темпов развития народного хозяйства при максимальной степени соответствия структуры, ассортимента и качества продукции сложившимся общественным потребностям;
- прогрессивное развитие предполагает качественные системные изменения, вызванные ростом общефакторной производительности, которая формируется за счет технологических инноваций. Это динамичное развитие на основе качественно новых организационных, технологических, социальных инноваций, обеспечивающих технологические прорывы. Одновременно происходят качественные изменения в технологии и в оборудовании уже сложившихся отраслей. Динамичное развитие на основе качественно новых организационных, технологических, социальных инноваций, обеспечивающих технологические прорывы, предполагает увеличение темпов экономического роста выше мировых при сохранении макроэкономической стабильности.

Таким образом, подводя итог всему вышесказанному, мы приходим к выводу, что развитие – это необратимый, направленный, взаимосвязанный процесс качественных и количественных изменений, происходящий под влиянием внешних и внутренних, управляемых и неуправляемых факторов, приводящий к новому качественному состоянию объекта.

Направление развития характеризуется системой приоритетов социального характера над экономическим. Оно определяется содержанием фактора структурных изменений экономических систем, в соответствии с которым формируются структура ценностей, цели общества. Диалектическое изменение структуры ценностей и целей является проявлением процесса видоизменения систем и характеризует ее направление. Цель экономической системы – экономическое развитие, которое создает базу для повышения жизненного уровня населения. Количественно экономическое развитие выражает экономический рост, а качественно структурные изменения, приводящие к наделению системы новыми характеристиками. Критический анализ литературы позволяет выделить несколько подходов, отражающих сущностные характеристики понятия «экономическое развитие» применительно к региону как социально-экономической системе. Сторонники революционного подхода рассматривают экономическое развитие как качественное преобразование экономики, изменение траектории ее движения, связанное с революционными изменениями ее структуры и функционирования [15].

Представители эволюционного подхода определяют дефиницию «экономическое развитие» как необратимую направленность закономерного развития, результатом которого станет новое качественное состояние объекта, в том числе его структурная трансформация. В этом случае экономическое развитие представляет собой многоплановый процесс, охватывающий экономический рост, структурные сдвиги в экономике, повышение уровня и качества жизни населения на основе высоких технологий, диверсификации производства и экспорта, импортозамещения, проведения глубоких преобразований экономической системы, улучшении условий жизни населения и сокращении социальных контрастов.

Рассмотренная выше закономерность эволюционного развития – цикличность – трактует экономическое развитие как циклический процесс, поскольку периоды подъема в экономике чередуются с периодами спада национального производства с различной продолжительностью.

Под экономическим развитием будем понимать непрерывное, целенаправленное, закономерное количественное и качественное изменение системы, обусловленное воздействием факторов внешней и внутренней среды, которое проводится целенаправленно для улучшения экономических параметров.

С развитием общества, трансформацией содержания и характера данной дефиниции последовательность изменения следует рассматривать по уровню иерархии на макро-, мезо- и микроуровнях. На макроуровне экономическое развитие базируется на национальном хозяйстве и представляет собой «целенаправленный процесс количественных и качественных изменений структуры и параметров хозяйственной системы, который выводит систему из состояния равновесия, определяет ее обновление и приобретение новых свойств, которые позволяют обеспечить рост эффективности объекта» [16]. На мезоуровне оценивают экономическое развитие региона. Эффективность, факторы и особенности развития отдельных регионов становятся основными факторами экономического развития страны. Л. М. Кузьменко обращает внимание на комплексный подход к содержанию категории, которая характеризуется изменениями экономической, социальной, экологической, политической, духовной сфер, приводящими к качественным преобразованиям в направлении улучшения условий жизнедеятельности человека [17].

В данном подходе сфера производства и воспроизводства неразделимы. Экономический рост определяет производительные силы, а количественные и качественные показатели, характеризующие социально-экономический результат как общественное богатство в разных его формах. Таким образом, экономическое развитие региона – это комплексный процесс, ведущий к повышению условий жизни жителей региона путем достижения целевых показателей социально-экономического развития, осуществляемого на основе рационального использования всего ресурсного потенциала региона.

Экономическое развитие на микроуровне подразумевает его исследование на уровне предприятия. При рассмотрении экономического развития И. В. Афонин особую роль отводит эффективному перераспределению ресурсов инвестиционного характера для обеспечения максимальной конкурентоспособности в течение максимально длительного периода, совершенствование товаров и услуг, а также структуры и систем управления организацией [18]. О. И. Новакова и Г. С. Мерзлякина в работе [19] определяют экономическое развитие организации как баланс экономического роста и устойчивости предприятия.

Основываясь на проведенных исследованиях, выделим два типа экономического развития: интенсивный, в основе которого качественное совершенствование факторов производства, и экстенсивный, предполагающий количественное увеличение факторов производства. Тип развития определяет систему факторов экономического развития – интенсивные (качество продукции, квалификация работников и их благосостояние, совершенствование организации производства, режим экономики, научно-технический прогресс) и экстенсивные факторы (объемы используемого сырья, численность работников и капиталовложения). Кроме того, по воздействию окружающей среды они разделяются на факторы внешней (уровень и качество производства, показатели экономической эффективности, валовой продукт, структура предприятия) и внутренней среды (производительность труда, материалоемкость конкретных видов продукции, качество производства). По признаку иерархии выделяют факторы, определяющие экономическое развитие на макроуровне по группам: стартовые (начальные), состояние человеческого капитала, внутренние (эндогенные) условия хозяйствования и внешние (экзогенные) условия хозяйствования. Отдельным фактором в современной экономике выступает инновационный потенциал экономики. Вместе с тем концепция управления изменениями Норберта Тома [20] предлагает следующие факторы: экономические (например, рост или снижение налогов, вступление в ВТО, глобализация рынка и т. д.), технологические (модернизация, использование высоких технологий), политико-правовые (положительные изменения в законодательстве), социально-культурные (мораль и нравственность, культура, изменения в системе ценностей, адресная соц. поддержка), физико-экологические (климатические условия, экология).

- Для экономического развития ЭС присущи следующие признаки:
- способность ЭС противодействовать флуктуациям;
 - обеспечение достижения целевых показателей экономического развития ЭС;
 - цикличность;
 - обеспечение сбалансированности динамики экономических показателей развития ЭС в прогнозируемом интервале времени;
 - статичность и динамичность ЭС.

Заключение

Обобщая базовые теоретико-методологические результаты исследования, под экономическим развитием региона будем понимать непрерывное, целенаправленное, закономерное изменение экономической системы, на основе диалектического единства национальных и глобальных экономических процессов, проявляющееся в гетерохронных качественных и количественных изменениях ее параметров под воздействием факторов внешней и внутренней среды в длительном интервале времени, обеспечивающее достижение целевых темпов роста ЭС.

Такая трактовка понятия определяет методические основы оценки экономического развития в разрезе каждой составляющей (экономической, социальной, институциональной и др.), выявляя уровень развития системы, учитывая при этом ее специфические характеристики и направленность разрабатываемых мер.

Список цитированных источников

- Арженовский, И. В. Региональный рынок: воспроизводственный / И. В. Арженовский. – Нижний Новгород : Экономическая культура, 1997. – 186 с.
- Бильчак, В. С. Региональная экономика / В. С. Бильчак, В. Ф. Захаров ; под ред. В. С. Бильчака. – Калининград : Янтар. сказ., 1998. – 245 с.
- Строительные нормы. Градостроительные проекты общего, детального и специального планирования [Электронный ресурс] : постановление Министерства архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 16 нояб. 2020 г. № 87 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь, 12.02.2021, 8/36325.
- Маевский, В. И. Введение в эволюционную макроэкономику: монография / В. И. Маевский. – Москва : Япония сегодня, 1997. – 107 с.
- Бузгалин, А. В. Пределы капитала: методология и онтология / А. В. Бузгалин, А. И. Колганов. – М. : Культурная революция, 2009. – С. 151.
- Щербакова, Л. Н. Категория экономического развития как самостоятельный объект экономического анализа / Л. Н. Щербакова // Вестник КемГУ. – 2013. – № 1 (53). – С. 300–305.
- Шумпетер, Й. Теория экономического развития: монография / Й. Шумпетер. – М. : Директмедиа Паблшинг, 2008. – 401 с.
- Мюрдаль, Г. Современные проблемы «третьего мира»: учебник / Г. Мюрдаль. – М. : Прогресс, 1972. – 768 с.
- Олейник, А. Н. Институциональная экономика: учебное пособие / А. Н. Олейник. – М. : Инфра-М, 2000. – 389 с.
- Амосов, А. И. Об угрозах деиндустриализации народного хозяйства на современном этапе / А. И. Амосов // Экономическая безопасность. – 2019. – Том 2, № 1. – С. 35–38.
- Rodrik, D. Unconditional Convergence in Manufacturing / D. Rodrik // Quarterly Journal of Economics. – 2013. – Vol. 128, No. 1. – P. 165–204.
- Забелина, И. А. Структурные сдвиги в экономике приграничных регионов России и Китая / И. А. Забелина, Е. А. Клевакина // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2015. – № 46. – С. 41–55.
- Fan, Sh. Structural Change and Economic Growth in China / Sh. Fan, X. Zhang, Sh. Robinson // Review of Development Economics. – 2003. – Vol. 7, № 3. – P. 360–377.
- Urraca-Ruiz, A. The technological dimension of structural change under market integration / A. Urraca-Ruiz // Structural Change and Economic Dynamics. – 2013. – Vol. 27. – P. 1–18.
- Мохнаткина, Е. В. Показатели, тенденции и факторы экономического развития хозяйствующих субъектов в Российской Федерации / Е. В. Мохнаткина, А. А. Голубев // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2015. – № 3. – С. 106–116.
- Мохнаткина, Е. В. Значение инновационной активности в процессе экономического развития / Е. В. Мохнаткина // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. – 2015. – Т. 3. – С. 30–34.
- Кузьменко, Л. М. Управление функционированием и развитием экономики региона: монография / Л. М. Кузьменко ; НАН Украины, Ин-т экономики промышленности. – Донецк, 2004. – 272 с.
- Ерохина, Е. А. Теория экономического развития: системно-синергетический подход: монография / Е. А. Ерохина. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 1999. – 160 с.
- Кондрашева, В. Н. К вопросу об экономическом развитии и экономическом росте [Электронный ресурс] / В. Н. Кондрашева, И. Ю. Ложкина. – Режим доступа: <http://journals.tsutmb.ru/a8/upload/upload--2017-12-12/pdf.70acb4fcb64e2cc023aa525c1c7b902c.pdf>. – Дата доступа: 20.02.20122.
- Матвеева, Т. Ю. Основы экономической теории: учеб. пособие для вузов / Т. Ю. Матвеева, И. Н. Никулина. – М. : Дрофа, 2003. – 442 с.

References

- Arzhenovskij, I. V. Regional'nyj rynek: vosproizvodstvennyj / I. V. Arzhenovskij. – Nizhnij Novgorod : Ekonomicheskaya kul'tura, 1997. – 186 s.
- Biľchak, V. S. Regional'naya ekonomika / V. S. Biľchak, V. F. Zaharov ; pod red. V. S. Biľchaka. – Kalinigrad : Yantar. skaz., 1998. – 245 s.
- Stroitel'nye normy. Gradostroitel'nye proekty obshchego, detal'nogo i special'nogo planirovaniya [Elektronnyj resurs] : postanovlenie Ministerstva arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 16 noyab. 2020 g. № 87 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Resp. Belarus', 12.02.2021, 8/36325.
- Maevskij, V. I. Vvedenie v evolyucionnyu makroekonomiku: monografiya / V. I. Maevskij. – Moskva : Yaponiya segodnya, 1997. – 107 s.
- Buzgalin, A. V. Predely kapitala: metodologiya i ontologiya / A. V. Buzgalin, A. I. Kolganov. – M. : Kul'turnaya revolyuciya, 2009. – S. 151.
- SHCHerbakova, L. N. Kategoriya ekonomicheskogo razvitiya kak samostoyatel'nyj ob'ekt ekonomicheskogo analiza / L. N. SHCHerbakova // Vestnik KemGU. – 2013. – № 1 (53). – S. 300–305.
- Shumpeter, J. Teoriya ekonomicheskogo razvitiya: monografiya / J. Shumpeter. – M. : Direktmedia Publishing, 2008. – 401 s.
- Myrdal', G. Sovremennye problemy «tret'ego mira»: uchebnik / G. Myrdal'. – M. : Progress, 1972. – 768 s.
- Olejnik, A. N. Institucional'naya ekonomika: uchebnoe posobie / A. N. Olejnik. – M. : Infra-M, 2000. – 389 s.
- Amosov, A. I. Ob ugrozah deindustrializacii narodnogo hozyajstva na sovremennom etape / A. I. Amosov // Ekonomicheskaya bezopasnost'. – 2019. – Tom 2, № 1. – S. 35–38.
- Rodrik, D. Unconditional Convergence in Manufacturing / D. Rodrik // Quarterly Journal of Economics. – 2013. – Vol. 128, No. 1. – P. 165–204.
- Zabelina, I. A. Strukturnye sdvigi v ekonomike prigranichnyh regionov Rossii i Kitaya / I. A. Zabelina, E. A. Klevakina // Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost'. – 2015. – № 46. – S. 41–55.
- Fan, Sh. Structural Change and Economic Growth in China / Sh. Fan, X. Zhang, Sh. Robinson // Review of Development Economics. – 2003. – Vol. 7, № 3. – P. 360–377.
- Urraca-Ruiz, A. The technological dimension of structural change under market integration / A. Urraca-Ruiz // Structural Change and Economic Dynamics. – 2013. – Vol. 27. – P. 1–18.
- Mohnatkina, E. V. Pokazateli, tendencii i faktory ekonomicheskogo razvitiya hozyajstvuyushchih sub'ektov v Rossijskoj Federacii / E. V. Mohnatkina, A. A. Golubev // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskij menedzhment». – 2015. – № 3. – S. 106–116.
- Mohnatkina, E. V. Znachenie innovacionnoj aktivnosti v processe ekonomicheskogo razvitiya / E. V. Mohnatkina // Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v sovremennom mire : mat-ly X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – 2015. – T. 3. – S. 30–34.
- Kuz'menko, L. M. Upravlenie funkcionirovaniem i razvitiem ekonomiki regiona: monografiya / L. M. Kuz'menko ; NAN Ukrainy, In-t ekonomiki promyshlennosti. – Doneck, 2004. – 272 s.
- Erohina, E. A. Teoriya ekonomicheskogo razvitiya: sistemno-sinergeticheskij podhod: monografiya / E. A. Erohina. – Tomsk : Izd-vo Tomskogo un-ta, 1999. – 160 s.
- Kondrasheva, V. N. K voprosu ob ekonomicheskom razviti i ekonomicheskom roste [Elektronnyj resurs] / V. N. Kondrasheva, I. Yu. Lozhkina. – Rezhim dostupa: <http://journals.tsutmb.ru/a8/upload/upload--2017-12-12/pdf.70acb4fcb64e2cc023aa525c1c7b902c.pdf>. – Data dostupa: 20.02.20122.
- Matveeva, T. Yu. Osnovy ekonomicheskoy teorii: ucheb. posobie dlya vuzov / T. Yu. Matveeva, I. N. Nikulina. – M. : Drofa, 2003. – 442 s.

Материал поступил в редакцию 07.04.2022

ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ВЕНЧУРНОГО ФИНАНСИРОВАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Л. А. Захарченко¹, Г. Б. Медведева²

¹ К. э. н., доцент, доцент кафедры экономической теории и логистики
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: luda_az@bk.ru

² К. э. н., доцент, зав. кафедрой экономической теории и логистики
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: medgb@mail.ru

Реферат

В статье рассматривается венчурное финансирование как источник финансирования инновационных проектов. Отмечается, что венчурное финансирование не получило широкого развития на данном этапе развития Беларуси, но имеются институциональные основы и практика применения. Данный инструмент инновационного развития является важным фактором, способствующий построению реально функционирующей рыночной экономики, а устранение имеющихся барьеров в правовой, экономической и социальной областях может способствовать трансформации в полноценную инновационную систему.

Ключевые слова: риск, венчурное финансирование, венчурный фонд, инновации, проекты.

TRENDS AND PROBLEMS OF DEVELOPMENT OF THE VENTURE FINANCING IN THE REPUBLIC OF BELARUS

L. A. Zakharchenko, G. B. Medvedeva

Abstract

The article discusses the venture financing as a source of financing for innovative projects. It is noted that venture financing has not been widely developed at this stage of development of Belarus, but there are institutional foundations and practice of application. This tool for innovative development is an important factor contributing to the construction of a truly functioning market economy, and the elimination of existing barriers in the legal, economic and social areas can contribute to transformation into a full-fledged innovation system.

Keywords: risk, venture financing, venture fund, innovation, projects.

Введение

По общим оценкам экспертов одним из решающих факторов, препятствующих инновационному развитию Республики Беларусь, является недостаточное финансирование инновационных проектов. Особенно это касается проектов с высокой долей риска, реализуемых малыми и средними предприятиями. И с этих позиций в условиях, когда традиционных источников финансирования инновационных процессов становится недостаточно и доступ к ним ограничен, следует обратить внимание на привлечение таких источников, как венчурный капитал, средства фонда ЕАЭС, союзного государства и другие.

Роль и мировой опыт венчурного финансирования

Венчурное финансирование рассматривается как привлекательный источник финансирования для высокотехнологичных и высокорискованных малых компаний, имеющие долгосрочный потенциал роста при реализации инновационных проектов. Однако реализация инноваций «как товаров/услуг, производственных процессов требует компетенций и финансовых затрат, к которым многие участники инновационного процесса, особенно в отраслях реального сектора экономики, не готовы» [1, с. 91]. Исходя из этого, привлекательным инструментом снижения рисков финансирования инноваций являются венчурные инвестиции. Согласно статистике 75 % венчурных проектов не возвращают деньги вкладчикам, 20 % стартапов терпят неудачу в течение первого года, 30 % – в течение двух, 50 % – за следующие пять лет [2].

Для снижения риска венчурные инвесторы вкладывают деньги не в один проект, а в ряд проектов. Долевая форма участия может рассматриваться как способ снижения риска посредством диверсификации совершаемых инвестиционных вложений, поскольку, помимо крупных игроков, в венчуре появляется огромное количество небольших инвесторов. Венчурный инвестор имеет возможность выхода из проекта, используя три основных способа: вывод компании на биржу, продажа ее стратегическому покупателю или менеджеру, причем этот выход не скажется на операционной и финансовой деятельности.

В то же время венчурные инвестиции, при успешном завершении проекта, весьма доходные. Так, за последний 25-летний период их доходность по данным индекса The Cambridge Associates US Venture Capital (по результатам отслеживания около 1800 американских венчурных фондов) составляла 32,4 %. Для сравнения: доходность крупнейших компаний S&P 500 (в этом индексе акции компаний с наибольшей капитализацией на американских биржах) за тот же период была 9,6 % [3].

Основное назначение венчурных инвестиций – это обеспечение финансовыми ресурсами инновационных высокотехнологичных проектов на ранних стадиях развития, когда средств нет, а потребность в них велика, и предприятия (стартапы) по различным причинам не могут добиться инвестирования со стороны кредитных организаций. Надо заметить, что средства представляются в большинстве случаев просто под перспективную идею без гарантированного обеспечения имеющимся имуществом, сбережениями или прочими активами предпринимателя. Одной из особенностей венчурных инвестиций является тот факт, что инвесторы вкладывают в проект не только финансовые средства, но также свой профессиональный опыт, знания и связи, участвуют в управлении, определяют его стратегическое развитие, создавая ему все условия для выхода на рынок и, в конечном итоге, могут стать собственниками проекта. С этих позиций венчурные инвестиции – это не только деньги, но и имеют признаки человеческого капитала.

Венчурные инвестиции можно назвать «умными деньгами», поскольку они обладают эффектом мультипликатора: однажды вложенные в венчурный бизнес средства возвращаются через «выходы» из компаний, вновь вкладываются в венчурные проекты или фонды, а новые «стартапы» стремятся повторить успех состоявшихся компаний предыдущего цикла. Самое главное, венчурные инвестиции являются ресурсной базой инновационного развития страны и это наиболее эффективный метод стимуляции преобразования чистого научного прогресса в востребованные рынком продукты. Для венчурного инвестора решающим фактором выбора объекта вложений выступает именно оригинальность продукта или технологии, несмотря на неоднозначность реакции рынка и неопределенность

финансового результата. Значение венчурного капитала определяется тем фактом, что уровень развития данной индустрии предопределяет, какую долю в ВВП страны будут занимать новые технологии.

В современных условиях такое финансирование в развитых странах стало важной и неотъемлемой частью инновационной или цифровой экономики. В настоящее время растет интерес к венчурным сделкам со стороны инвесторов, сама венчурная индустрия приобретает все более зрелые черты, что в свою очередь привлекает внимание все большего числа потенциальных участников. На сегодняшний день лидирующие позиции по объему венчурного инвестирования занимают США и Китай, на которые приходится соответственно 44 и 40 % от общемирового объема венчурного капитала. На все остальные страны мира, включая страны Европейского союза, Индию (3-ю страну в мире по числу стартапов) и Россию, приходится суммарно лишь около 16 % глобального объема венчурных инвестиций [4 с. 53].

Глобальный рынок венчурного финансирования развивается быстрыми темпами, так за восемь лет прирост составил 279 % в стоимостном выражении. Такое финансирование приобретает все большее распространение в США, Израиле, Западной Европе, инструменты венчурного финансирования используются в Центральной и Восточной Европе, хотя еще не имеют такого широкого распространения. По данным аналитиков CB Insights в 2021 году объем венчурных инвестиций по всему миру достиг рекордных \$ 621 млрд, что более чем вдвое (на 111 %) превосходит показатель годичной давности в \$ 294 млрд. Чуть меньше половины (\$ 311 млрд) мировых инвестиций в стартапы пришлось на американский рынок, что на 106 % больше, чем в 2020 году. В США проведен 12 281 раунд финансирования, из которых 55 % – это сделки, заключенные на ранних стадиях развития стартапов. Таким образом, рост рынка венчурных инвестиций – это общемировой тренд [5]. Ожидается, что в 2022 году объемы венчурных инвестиций останутся достаточно значительными в большинстве регионов мира, а менее развитые рынки венчурного капитала, такие как Африка и Ближний Восток, привлекают больше внимания венчурных инвесторов. Поскольку в основе венчурного финансирования лежит стремление инвесторов к получению сверхприбылей и завоеванию рынка, что обуславливает оперативное реагирование на изменение рыночной конъюнктуры и потребностей в обществе. В этих условиях наиболее привлекательными отраслями для инвесторов стали такие сферы, как работа, здравоохранение, образование, финансы, покупки и развлечения и их программное обеспечение. По данным отчета CB Insights, инвестиции в розничные технологии были самыми быстрыми за последние полвека, а венчурные инвестиции в стартапы в области психического здоровья выросли на 72,6 % в период с 1 квартала 2020 года по 1 квартал 2021 года. Внедрение новых технологий стало причиной увеличения инвестиций в кибербезопасность. Глобальные инвестиции в эту сферу выросли с \$ 22 млрд в 2020 году до более \$ 37 млрд в первом полугодии 2021 года [6].

Состояние венчурного финансирования в Республике Беларусь

В Республике Беларусь сложившейся венчурной системы пока нет, венчурный рынок только зарождается и государство принимает определенные меры по развитию практики венчурного инвестирования в целях формирования условий для развития быстрорастущих инновационных компаний.

Данный вид финансирования начался с Указа Президента Республики Беларусь № 1 «О возможности создания венчурных организаций» (2007 год). Дальнейшему развитию венчурной деятельности способствовал Декрет Президента Республики Беларусь от 21.12.2017 г. № 8 «О развитии цифровой экономики», поскольку он включает меры по либерализации условий ведения предпринимательской деятельности в сфере информационных технологий при особом налоговом и правовом режимах развития Парка высоких технологий. Декрет позволяет структурировать венчурные сделки с резидентами особой экономической зоны на основе передовой международной практики.

О развитии венчурного финансирования в Республике Беларусь свидетельствует тот факт, что среди инструментов реализации направлений государственной инновационной политики на 2021–2025 годы определено формирование развитой венчурной экосистемы

(включающей инкубаторы, акселераторы стартапов, фонды развития разных стадий) с учетом лучших международных практик (Казахстан, Израиль, Эстония, Финляндия и иные страны).

Становление венчурного финансирования в Беларуси имеет определенные особенности, в первую очередь это касается структуры источников венчурного финансирования. Согласно мировому опыту в качестве венчурных инвесторов могут выступать как частные лица, так и государство, а все источники венчурного финансирования, по мнению большинства исследователей, разделяются на формальные и неформальные. К формальным относятся: фонды венчурного капитала, институциональные финансовые инвесторы (страховые компании, пенсионные фонды и т. п.), нефинансовые корпорации, нефинансовые учредители, национальные и коммерческие банки. Их интересуют поздние стадии развития компаний, требующие больших вложений, но которые являются менее рискованными. К неформальным относятся: сбережения определенных физических лиц (финансовые средства самого новатора, семьи, друзей), гранты, средства академических базовых институтов, университетов и иных научно-технических учреждений (инвестиции в виде предоставления помещений, территории, оборудования, консультаций и т. д.), средства бизнес-ангелов. Зачастую бизнес-ангелы, объединяясь, создают фонды, имеющие название «супер-ангелы», находящиеся на ранних стадиях развития. Неформальные источники инвестирования вкладывают свои собственные средства в предприятия-новаторы и их средства более важны на самых ранних стадиях развития инновационных фирм, когда такие фирмы нуждаются в первоначальном капитале для завершения комплекса исследований и доведения научной идеи до первого рабочего образца, но по каким-то причинам не могут получить кредиты.

Соотношение этих субъектов может значительно отличаться в зависимости от степени развития страны и ее цифровизации, от степени государственного регулирования экономики. Что касается Республики Беларусь, то в отличие от развитых рыночных стран, где основную долю венчурных инвесторов составляют пенсионные фонды, банки и страховые компании и заметную роль играют корпоративные и частные инвесторы, в нашей стране основную роль играет государство, а источником венчурного капитала являются преимущественно средства государственного бюджета.

Но необходимо заметить, что ни в одной стране венчурная индустрия не развивалась без первоначальной поддержки государства. В США, Израиле, странах Юго-Восточной Азии и Европы ключевым стимулятором для развития данной индустрии выступало именно государство. Роль государства необходима с точки зрения адаптации венчурных инструментов под местное законодательство, с позиций создания системы стимулирования венчурных инвесторов к инвестированию посредством создания экономических механизмов и «подставляя им плечо», своего рода «подушки безопасности», в случае потери инвестиций. В дальнейшем, по мере развития инновационного рынка, роль государства должна уменьшаться и в итоге свестись к минимуму, чтобы на рынке взаимодействовали только частные технологические предприниматели и частные венчурные игроки.

На сегодняшний день главной проблемой построения венчурной системы в Республике Беларусь является недостаточность устойчивых источников внутреннего венчурного капитала, и эта проблема находит свое отражение в государственных правовых актах и программах. Так, в мае 2019 года подписан Указ Президента Республики Беларусь № 252, в котором Белорусский инновационный фонд (Белинфонд), который финансирует инновационные проекты на возвратной основе, был наделен функциями государственного венчурного фонда. Особенность этого фонда является тот факт, что он финансируются преимущественно инновационные проекты крупных компаний. Для дальнейшего развития его деятельности, в области венчурного финансирования, на базе его, согласно выше указанной программы инновационного развития на 2021–2025 гг., предполагается создание специализированного института развития в форме государственного Фонда фондов, на который будут возложены функции LP (основных инвесторов, наполняющие фонд капиталом). Таким образом, Белинфонд будет софинансировать рыночные венчурные фонды с частным капиталом, которые предоставляют инвестиции технологическим стартапам, имеющим центры разработки и штат сотрудников в Беларуси.

На сегодняшний день условно классическим венчурным фондом является Российско-белорусский фонд венчурных инвестиций, созданный в декабре 2016 года в форме инвестиционного товарищества между Белорусским инновационным фондом и АО "Российская венчурная компания". Управляет им Белорусский инновационный фонд и ООО «Инфрафонд РВК». И финансирование осуществляется на паритетной основе (50/50). Целью участия белорусской стороны является внедрение и продвижение рыночного механизма венчурного финансирования накопленного российской стороной в области отбора соответствующих проектов, структурирования сделок, опыта использования классических инструментов венчурного финансирования и непосредственного управления фондом. Целевой фокус фонда – белорусские и российские технологические стартапы на посевной стадии (seed) и стадии роста (A), средний чек составляет 0,3–1 млн долларов, финансирование осуществляется через приобретение доли в стартапе (как правило, от 10 % до 35 %); конвертируемые займы; опционы.

По итогам 2020 года в портфель фонда входят 4 проекта российского и белорусского происхождения, в первом полугодии 2021 года планируется добавить к ним еще один белорусский проект. Кроме того, деятельность фонда направлена на развитие инновационной экосистемы страны в целом. Особенностью фонда является то, что финансовые ресурсы зарезервированы в госбюджете на текущий календарный год.

В настоящее время в сферу венчурного финансирования инновационных проектов успешно подключаются банки, хотя это достаточно интересная, перспективная, но нестандартная область банковской деятельности. Так, Банк развития Республики Беларусь и ОАО «Банк БелВЭБ» заключил соглашение с Белорусским инновационным фондом. Данное сотрудничество сфокусировано на основных направлениях в области венчурного финансирования и развития венчурной системы Беларуси. Прежде всего, это создание венчурных организаций различных видов, нацеленных на финансирование разработок конкурентоспособной на мировом рынке продукции; внедрение и продвижение инструментов венчурного финансирования; увеличение объемов привлекаемых финансовых ресурсов международных организаций и с учетом практики последних внесение предложений по изменению законодательства в области венчурного финансирования, организация информационно-образовательных мероприятий по вопросам инновационного развития и венчурного финансирования в Беларуси. Ставя задачу развития венчурного финансирования в Республике Беларусь, банки стремятся использовать экосистемный подход, объединив в эту экосистему всех игроков рынка инноваций Беларуси: стартапы, инвесторов, экспертов, менторов, малый и средний бизнес, корпорации, венчурные фонды, с целью придания импульса в развитии этого направления. Такое сотрудничество является обоюдно выгодным, поскольку в периметре Белорусского инновационного фонда находятся более 100 компаний различных стадий развития, которые могут получить возможность дальнейшего развития через венчурное финансирование. Поэтому для Белфонда как для крупного инвестора в инновационные решения совместная работа с Банком БелВЭБ является открытием новых возможностей по поиску и экспертизе перспективных как финтех стартапов, так и команд, которые находят решения по расширению взаимодействия банков и реального сектора экономики.

Одной из устойчивых тенденций венчурного финансирования в мире является рост венчурных корпоративных фондов, которые формируются за счет средств отдельной компании в целях и интересах данной компании, с целью повышения ее инновационности, например, таких как Microsoft Ventures, NGP Capital, Baidu Ventures и GV (Google Venture), Intel Capital, BMW Ventures. Такое развитие корпоративных фондов вызвано необходимостью повышения конкурентоспособности компании на рынке в долгосрочной перспективе, поскольку уже сегодня компании недостаточно производить качественные товары или услуги, и сосредоточиться только на основном виде деятельности, а необходимо искать разноплановые резервы устойчивого развития. Необходимо разрабатывать инновации, создавать уникальные преимущества, что может резко изменить структуру отрасли и которые одновременно и могут быть потенциальной угрозой, и источником дохода для рыночных лидеров. Наиболее

приемлемым способом решения данных проблем является инвестирование в стартапы с высоким технологическим потенциалом для своих стратегических целей. Тенденция такова, что скорость создания новых продуктов внутри корпораций не соответствует запросам времени и необходимо привлекать молодые компании. В венчурных инвестициях крупных корпораций давно прослеживается четкая логика – каждая из них формирует вокруг себя экосистему, позволяющую благодаря дополнительным услугам (от сферы финансов до развлечений) аккумулировать базу данных о клиентах и использовать ее для развития основного бизнеса. Если пару лет назад корпорации только сформировали портфель стартапов, то сейчас вступили в стадию конкуренции и неожиданных альянсов. Результаты деятельности зарубежных корпоративных венчурных фондов демонстрируют их высокую результативность в наращивании ключевых конкурентных преимуществ и деловой синергии.

В Республике Беларусь среди аналитиков нет единого мнения по вопросу: если в Республике корпоративные венчурные фонды. По мнению большинства исследователей, такие фонды отсутствуют, по мнению других – они присутствуют в единичном экземпляре. Так, к ним относят компанию с белорусскими корнями EPAM Systems, которая развивается в этом направлении и имеющая сегодня центры разработки в более чем 20 странах и оперирующую уже почти в 40 странах. В феврале 2019 года компания EPAM Systems сообщила о создании инвестиционного фонда Global Opportunity Philly Fund (GO Philly Fund), где она выступила в качестве ведущего инвестора и участника консультативного совета нового венчурного фонда. Управлять им будет компания Ben Franklin Technology Partners. Инвестирование будет осуществляться технологических компаний, в том числе разработчиков блокчейн- и криптовалютных решений. Компании, получившие поддержку фонда, будут иметь доступ к глобальной экосистеме компании EPAM System.

Что касается частных инвестиционных компаний, то в стране их всего несколько, имеющих белорусские корни и ориентированные на венчурное финансирование. Венчурный фонд Nahus (инвесторы стадий Pre-Seed, Venture) имеет 10 профинансированных проектов в области искусственного интеллекта и виртуальной реальности. Целевая доля фонда от 10 % до 25 %, стоимость сделки – от 300 долларов до 2 миллионов.

Инвестиционная компания VP Capital (инвесторы стадий Seed, Venture, Series A) – 8 проектов; инвестиционная компания Bulda Ventures (инвесторы стадий Pre-Seed, Seed) – 4 проекта; EBRD Venture Capital Investment Program (инвесторы стадий Early, Growth stage) – 19 проектов; инвестиционная компания Flint Capital (инвесторы стадий Seed, Venture (Series A-D) – 49 проектов на разных стадиях. Инвестиционная компания «Зубр Капитал» вложила до 10 млн. долларов в белорусского партнера YouTube MediaCube – «компанию-разработчика ИТ-решений для видеокреаторов и музыкантов». И это первая сделка структурирована с применением механизмов английского права.

Определенную, хотя еще незначительную роль на рынке венчурных капиталов, стала играть сеть белорусских бизнес-ангелов Angels Band. В западных странах бизнес ангелы в предпринимательстве – обычное явление, которое представлено людьми со значительными личными финансовыми ресурсами, являющие профессионалами с опытом работы в области высоких технологий. Что касается Республики Беларусь, то в нашей стране пока все еще только зарождается, поскольку наши бизнесмены, по мнению экспертов, пока не готовы вкладывать свои кровно заработанные деньги в новые и слабые компании. Этот тип инвестора начинает работать, когда уже есть идея, она частично реализована, есть клиенты и прибыль, т. е. работает, в подавляющем большинстве случаев, с раундами Pre-seed и Seed, их задача — вывести компанию на более серьезный уровень. Венчурный капитал бизнес-ангела часто является единственным источником финансирования на начальном этапе в ситуации, когда объем ресурсов компании еще незначительный и не позволяет обратиться в инвестиционный фонд и когда нужна менторская поддержка и помощь в создании необходимого продукта для нашей страны, а также представление и интеграция страны в международную арену.

Для повышения эффективности работы бизнес-ангелов в Беларуси в 2020 году было создано организационное объединение Invest

Clube, которое помогает своим участникам искать перспективные проекты, обмениваться опытом и совершать синдицированные сделки – вкладывать средства вместе с другими инвесторами в один стартап. Чаще всего бизнес-ангелы выделяют 10–50 тысяч долларов, потому что они инвестируют в стартап свои личные деньги. Бизнес-ангелы, как правило, также просят долю в компании за финансовую поддержку.

На сегодняшний день фактических членов Angels Band насчитывается порядка девяносто человек, выполняющих в основном организационно-агитационную и образовательно-информационную работу. Но их деятельность набирает обороты, если за прошлый год бизнес-ангелы Angels Band одобрили 229 проектов (19 проектов в месяц), то сейчас в базе данных сети – 415 активных стартапов и рассматривается 20–25 проектов в месяц, а всего в базе более 500 проектов. Три стартапа, в которые вложились ранее в Angels Band, привлекли посевные инвестиции почти на 2,4 миллиона долларов [7].

Уже сейчас можно с уверенностью сказать, что есть обоюдная заинтересованность как со стороны бизнес-ангелов в неординарных проектах и готовность их финансировать, (причем как в стране, так и за рубежом), так и со стороны вновь создающихся стартапов в финансовой и другой поддержке.

Бизнес-ангелы, как в стране, так и за рубежом, рассматривают местный рынок как весьма интересную площадку для вложений. К преимуществам инвестирования стартапов Беларуси стоит отнести: привлекательный инвестиционный климат; выгодное географическое положение страны; шесть свободных экономических зон; хорошо развитая транспортная и коммуникационная инфраструктура страны; государственная защита прав инвесторов. Есть определенные успехи, так в прошлом году Angels Band заключило партнерство с Amazon, что позволило осуществить кредитование проектов на 55 тысяч долларов, однако нам недостаточно бизнес-ангелов, которые умеют инвестировать в венчурную модель. Необходимо создать определенный мост, который соединит предпринимателя, способного запустить бизнес под капитализацию, и бизнес-ангела, способного на ранних стадиях поддержать понимающего, на чем он зарабатывает, и тогда появятся крутые венчурные истории.

Программу длительного тесного взаимодействия с проектами, обеспечивающими инновационное развитие компании в кратчайшие сроки посредством венчурного финансирования через инвестирование, инфраструктуру, менторство, обучение, информационную и экспертную поддержку могут осуществить бизнес-акселераторы. Они ускоряют процесс создания технологических бизнесов, имеющие повышенный риск, и дают возможность объективно оценить проект на старте. Это новая для Беларуси модель выращивания стартапов, но в мире уже насчитывается более 560 акселерационных программ. Самые известные и «старые» из них – это американские Y Combinator (выпустил такие проекты, как Scribd, Reddit, Airbnb, Dropbox, Disqus), 500 Startups (Eat App, IDreamBooks, Little Eye Labs, myGengo, Udemy, RidePal) и Techstars (Bench, Digital Ocean, FullContact). Если говорить о порядке сумм, то в мировой практике pre-seed инвестиции составляют \$10–100 тыс., а в Российской Федерации этот показатель составляет 1–3 млн рублей [8].

Главная задача акселератора – помощь стартапам в поиске инвесторов путем формирования финансовой и маркетинговой стратегии, выделения уникальных преимуществ продукта и презентации их так, чтобы у инвестора не оставалось сомнений. Ключевую роль в акселераторах играют менторы и трекаеры, которые помогают оценить необходимые усилия, определить рынок сбыта, протестировать гипотезы, наладить связь с покупателями и решить множество других задач. Кроме того, участие в акселерационных программах дает возможность лично познакомиться с представителями ключевых фондов, а значит, и повысить шансы привлечь финансирование. Задачей акселератора является создание необходимых компетенций для реализации проектов. В рамках акселеративных программ стартапы не просто получают доступ к кругу инвесторов и клиентов, они становятся известными в венчурной экосистеме.

В современных условиях достаточно широкое развитие получили корпоративные акселераторы, которые создаются и финансируются конкретной компанией для достижения своих собственных целей путем соединения масштаба и мощи крупного бизнеса с гибкостью

и инновационностью стартапов. В эпоху цифровизации главной целью акселератора компании является поиск технологий, которые позволят ей пройти цифровую трансформацию и повысить эффективность бизнеса. С помощью корпоративного акселератора крупные компании отслеживают новые решения и необычные идеи, чаще всего они запускаются для поиска новых IT-решений и запуска инновационных продуктов, которые компания может предложить своим клиентам. Отсюда, чтобы участвовать в программах корпоративных акселераторов, участник должен работать в той же отрасли, что и компания, которая запустила конкретную программу и иметь инновационную составляющую в технологии производства представляемого проекта. Все это обеспечивает компаниям более высокую скорость внедрения прорывных инноваций с привлечением гораздо меньших ресурсов. Кроме того, внедрение инноваций, обеспечивающих даже маленький эффект на больших объемах крупных компаний, может обеспечить значительный общий результат. Стартапы в этом случае получают доступ к ресурсам и инфраструктуре большой корпорации: экспертам, технологическим мощностям, внутренним процессам. В зависимости от целей и задач, которые стоят перед бизнесом, акселератор может являться как программой пилотирования технологий, так и выполнять роль образовательной программы с менторской поддержкой. Для Республики Беларусь в целях инновационного развития большую ценность имеет корпоративные акселераторы, поскольку они в большей степени связаны с распространением и внедрением новых инновационных технологий в реальный сектор экономики.

В Беларуси развитие акселераторов как источника для цифровых инноваций в различных сферах ограничено. Пока создано 6 акселераторов, сферой деятельности которых являются информационные технологии, медиа, медицинская техника и электротранспорт. Наибольших успехов в этой области достиг независимый акселератор TechMinsk, который был создан на базе платформы Imaguru, ранее успешно развивавшей стартап-сообщество в Республике Беларусь. На нашей территории активно действуют акселераторы международных компаний. В частности, с 2017 года у стартапов из Республики Беларусь есть возможность пройти акселерационную программу Google Launchpad Accelerator. Также активно рекламируют себя на территории Республики Беларусь акселераторы российских компаний, в том числе МТС и Татнефть. К сожалению, на данный момент в стране отсутствуют национальные государственные и университетские акселераторы, хотя необходимые предпосылки существуют.

Как было показано выше и о чем свидетельствует зарубежный опыт, венчурные компании (фонды) в основном предпочитают работать со стартапами, на которых можно получить ощутимый доход в короткие сроки, или если этот стартап стоит на пороге создания новаторской и передовой технологии и, в случае успеха, может изменить правила игры для всего рынка какого-либо товара. Следует отметить, что в Республике имеется высокий потенциал для привлечения венчурных инвесторов, в том числе иностранных. Прежде всего, это высокий уровень и устойчивое развитие IT сектора, который является родиной многих глобально известных стартапов, таких как – MSQRD (Facebook), AIMATTER (Google), Maps.me (Mail.ru), Juno (Gett), Viber (Rakuten); Friendly Data team (ServiceNow, самая инновационная корпорация в США по версии Forbes). Причем IT-сектор включает в себя множество различных направлений, благодаря чему у инвесторов есть широкий выбор подсекторов при постоянном спросе на IT услуги. Одним из преимуществ для развития белорусского стартапа является ориентация не только на внутренний рынок, но и на глобальный рынок.

Количество стартапов в Беларуси на конец 2020 года составило 339, но по количеству стартапов мы все еще отстаем от соседних стран. В 2020 году белорусскими стартапами совершено 10 крупнейших сделок с привлечением более 160 млн долларов. В 2021 году стартапы привлекли около 190 млн долларов в рамках как минимум 30 сделок – это рекордная сумма инвестиций для нашей экосистемы. Согласно данному отчету тенденции в сфере венчурного финансирования в Республике Беларусь отличаются от тенденций мирового рынка. Так, в 2020 году объем венчурных инвестиций в Беларуси за прошлый год снизился почти на 22 % до 36 миллионов долларов [9].

Заключение

Проведенный анализ венчурного финансирования в Республике Беларусь показывает, что усиливается интерес к данному виду инвестирования ввиду возможности его применения в условиях инновационного развития экономики. В тоже время, основной проблемой является тот факт, что источники венчурного финансирования находятся в начале своего развития. Это касается как формальных, так и неформальных источников, причем некоторые из них не включены в венчурную систему (пенсионные фонды, страховые компании и банки). Следует обратить особое внимание на создание корпоративных венчурных фондов и корпоративных акселераторов, как наиболее эффективных венчурных инвесторов с целью инновационного развития Республики Беларусь. С этой же целью расширить количество вариантов организации венчурных фондов, используя практики стран Западной Европы, Израиля и других.

Дальнейшее развитие венчурной системы в Республике Беларусь сдерживается отсутствием официальной статистики по объемам и структуре венчурного рынка, что является риском для принятия управленческих решений. Также отсутствует информация об общей сумме расходов республиканского бюджета на инновационную деятельность, венчурное и прямое финансирование инновационных проектов. Надежным поставщиком рыночной информации: кредитных рейтингов, рэнкингов, исследований и аналитики, в Республике Беларусь является BIK Ratings. Это первое и на данный момент единственное национальное рейтинговое агентство в Беларуси, аккредитованное Национальным банком.

Помимо этого, существует ряд барьеров, препятствующих развитию венчурной системы в Республике Беларусь, которые связаны правовой, экономической и социальной сферой. Что касается правовой сферы, то недостаточно развита правовая база в области венчурного финансирования и ее несоответствие международным стандартам, что иногда приводит к некоторым противоречиям с мировыми законодательными практиками. Усложняющим моментом венчурного финансирования являются проблемы защиты прав на интеллектуальную собственность, гарантии прав инвесторов, наличие субсидиарной ответственности, непрозрачность механизма и отсутствие инструментов структурирования венчурных сделок, широко используемых в международной практике. Наличие бюрократических препятствий для прихода иностранных венчурных фондов, которое проявляется в их обязательной регистрации в качестве субъектов инновационной деятельности.

В экономической сфере барьерами выступает отсутствие стимулов со стороны налогообложения при привлечении капитала в высокорискованные проекты. Не развитость венчурной инфраструктуры, отсутствие ключевого звена механизма венчурного финансирования (венчурных и страховых фондов), отсутствие поддержки развития частных фондов.

В социальной сфере одной из причин неразвитости венчурной экосистемы эксперты считают отсутствие квалифицированных управляющих венчурными фондами, менеджеров, обладающих бизнес-навыками для коммерциализации научных разработок, низкое качество корпоративного управления.

Венчурное финансирование – это важный фактор, который будет способствовать построению реально функционирующей социально-ориентированной рыночной экономики, а устранением имеющихся барьеров в правовой, экономической и социальной областях и внедрение мировых практик в нашу действительность венчурный рынок может трансформироваться в полноценную экосистему.

Список цитированных источников

1. Медведева, Г. Б. Трансформация и проблемы инновационного процесса в условиях развития цифровых технологий / Г. Б. Медведева, Л. А. Захарченко // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий : материалы 17-го Международного научного семинара, проводимого в рамках 19-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике», 25–26 марта 2021 года, Минск, Республика Беларусь. – Минск : Право и экономика, 2021. – С. 90–92.
2. Взлететь или прогореть: как работают венчурные инвестиции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation>. – Дата доступа: 10.03.2022.

3. Benchmark label: us venture capital. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.cambridgeassociates.com/> – Date of access: 01.03.2022.
4. Ерёмченко, О. А. Мировая практика государственной поддержки венчурной индустрии / О. А. Ерёмченко, В. Г. Зинов // Экономика науки. – 2021. – № 7(1). – С. 51–65.
5. Венчурное инвестирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/index.php>. – Дата доступа: 02.03.2022.
6. State of Fintech: Investment & Sector Trends To Watch [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cbinsights.com/reports/CB-Insights_Fintech-Report-Q4-020.pdf=report. – Дата доступа: 02.03.2022.
7. Белорусские бизнес-ангелы в два раза увеличили инвестиции в стартапы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://devby.io/news>. – Дата доступа: 02.03.2022.
8. Чем отличаются бизнес-инкубаторы от стартап-акселераторов? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://biznespark.by>. – Дата доступа 02.03.2022.
9. Особенности и итоги венчурных сделок белорусской экосистемы за 2021 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bel.biz/other/>. – Дата доступа: 12.03.2022.

References

1. Medvedeva, G. B. Transformaciya i problemy innovacionnogo processa v usloviyah razvitiya cifrovyyh tekhnologij / G. B. Medvedeva, L. A. Zaharchenko // Mirovaya ekonomika i biznes-administrirovanie malyyh i srednih predpriyatij : materialy 17-go Mezhduнародnogo nauchno seminar, provodimogo v ramkah 19-j Mezhduнародnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Наука – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike», 25–26 marta 2021 goda, Minsk, Respublika Belarus'. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2021. – S. 90–92.
2. Vzletet' ili progoret': kak rabotayut venchurnye investicii [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation>. – Data dostupa: 10.03.2022.
3. Benchmark label: us venture capital. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.cambridgeassociates.com/> – Date of access: 01.03.2022.
4. Eryomchenko, O. A. Mirovaya praktika gosudarstvennoj podderzhki venchurnoj industrii / O. A. Eryomchenko, V. G. Zinov // Ekonomika nauki. – 2021. – № 7(1). – S. 51–65.
5. Venchurnoe investirovanie [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.tadviser.ru/index.php>. – Data dostupa: 02.03.2022.
6. State of Fintech: Investment & Sector Trends To Watch [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://www.cbinsights.com/reports/CB-Insights_Fintech-Report-Q4-020.pdf=report. – Data dostupa: 02.03.2022.
7. Belorusskie biznes-angely v dva raza uvelichili investicii v startapy [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://devby.io/news>. – Data dostupa: 02.03.2022.
8. Chem otlichayutsya biznes-inkubatory ot startup-akseleratorov? [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://biznespark.by>. – Data dostupa 02.03.2022.
9. Osobennosti i itogi venchurnyh sdelok belorusskoj ekosistemy za 2021 god [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://bel.biz/other/>. – Data dostupa: 12.03.2022.

Материал поступил в редакцию 04.05.2022

МЕЖСТРАНОВОЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕНДЕНЦИЙ В ЧАСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИК

С. Ф. Куган

К. э. н., доцент, доцент кафедры экономики промышленных предприятий
Белорусского государственного экономического университета, Минск, Беларусь, e-mail : sfkugan@mail.ru

Реферат

В настоящее время возможности, которые предоставляет единое информационное пространство, способствуют цифровизации и трансформации экономических процессов, связанных с технологическими изменениями и автоматизацией управленческих и производственных процессов. В связи с чем возникает необходимость системных преобразований, способствующих развитию цифровой экономики в социально-экономических системах. Вопросы, связанные с цифровизацией, актуальны, чему в полной мере способствует активное развитие информационно-коммуникационных технологий.

В данной статье предпринята попытка проанализировать состояние экономик разных стран с точки зрения их цифровизации.

Ключевые слова: анализ, цифровая трансформация, цифровизация, рейтинговые исследования.

CROSS-COUNTRY ANALYSIS OF EXISTING TRENDS IN THE PART OF DIGITALIZATION OF ECONOMIES

S. F. Kuhan

Abstract

At present, the opportunities provided by a single information space contribute to the digitalization and transformation of economic processes associated with technological changes and automation of management and production processes. In this connection, there is a need for systemic transformations that contribute to the development of the digital economy in socio-economic systems. Issues related to digitalization are relevant, which is fully facilitated by the active development of information and communication technologies.

This article attempts to analyze the state of the economies of different countries in terms of their digitalization.

Keywords: analysis, digital transformation, digitalization, rating research.

Введение

Стратегия движения в направлении цифровой трансформации экономик предполагает максимальную концентрацию усилий в области технологической перестройки производств, их экологизации, усилению борьбы с киберпреступлениями, построение системы электронного правительства и др. При проведении исследований, связанных с анализом данных в различных сферах, необходимо опираться на ряд доступных и значительных рейтинговых обзоров, отражающих текущую ситуацию и существующие тенденции. Используемые различными агентствами индексы позволяют получить информацию, показывающую уровни развития разных стран по исследуемой тематике, в частности по цифровой трансформации или цифровизации экономик. В мировом сообществе признан ряд индексов, которые, по мнению исследователей наиболее точно описывают уровень цифровизации экономик разных стран [1]. К ним относятся:

- Индекс развития информационно-коммуникационных технологий (ICT Development Index – IDI);
- европейский Индекс цифровой экономики и общества (Digital Economy and Society Index – DESI);
- Индекс цифровизации экономики Boston Consulting Group (eIntensity);
- Индекс развития электронного правительства (The UN Global EGovernment Development Index – EGD) и другие.

По нашему мнению, отчеты DESI наиболее точно оценивают состояние цифровой экономики и общества, хотя последние исследования, опубликованные в открытой печати, были осуществлены еще до пандемии. Нынешний кризис оказал серьезное влияние на ключевые социальные показатели, касающиеся использования гражданами интернет-услуг. Европейский индекс цифровой экономики и общества (DESI) определяет эффективность цифровых технологий в европейских странах, анализируя генезис цифровой конкурентоспособности стран-членов ЕС, и представляет собой сводный индекс, в состав которого включены пять сводных показателей [2].

Анализ цифровизации экономик западных и восточных регионов

Индекс DESI охватывает пять основных областей: связь, цифровые навыки, использование Интернета, цифровые технологии и государственные услуги в цифровом масштабе [2, 3].

Связь. Данная область обеспечивает доступ к быстрому и надежному широкополосному соединению, что имеет сегодня решающее значение, т. к. достаточно большое количество услуг предо-

ставляется в онлайн-формате. Существующие технологии и поставители цифровой инфраструктуры обеспечивают необходимый уровень услуг. Пандемия и нарастающие кризисные явления спровоцировали значительно возросший спрос на широкополосные соединения и мобильную связь.

Общая связанность улучшилась как в отношении спроса, так и предложения. В 2019–2020 гг. охват NGA увеличился до 86–88 % домохозяйств по сравнению с 83 % в 2018 году, а фиксированные сети очень высокой пропускной способности (VHCN) доступны для 44 % домохозяйств. VHCN предоставляются либо в кабельных сетях FTTP (Fibre to the Premises), либо в кабельных сетях DOCSIS 3.1 (спецификация интерфейса передачи данных по кабелю). Мальта, Дания и Люксембург лидируют по VHCN с охватом не менее 90 %. В 2019 году в Европе 78 % домохозяйств имели подписку на фиксированный широкополосный доступ по сравнению с 70 % пять лет назад. Анализ статистических данных показал, что в период 2016–2020 гг. имеется значительный рост пользователей услуг широкополосного доступа со скоростью не менее 100 Мбит/с: в 2021 году проникновение достигло 26 % домохозяйств, что в пять раз больше, чем в указанный период. Население Европы практически повсеместно пользуется услугами сети 4G, и лишь небольшая часть использует спектр 5G. В настоящее время только 17 государств выделили спектр в первых диапазонах 5G. Финляндия, Германия, Венгрия и Италия наиболее продвинуты в плане готовности к 5G. В целом по параметру «связь» Дания, Швеция и Люксембург набрали самые высокие баллы.

Цифровые навыки. Являясь основой цифрового общества, данные навыки позволяют людям пользоваться цифровыми услугами и выполнять необходимые действия в Интернете, особенно в условиях ограниченной мобильности. Период пандемии COVID-19 показал, что цифровые навыки, позволяющие гражданам получать доступ к информации и услугам, имеют решающее значение для всего населения. В сложившейся ситуации это особенно актуально для работников системы здравоохранения, государственных служащих, ППС и учащихся. Базовые и продвинутые цифровые навыки необходимо укреплять в школьных программах и академических предложениях в странах ЕС. Точно так же цифровые навыки также необходимы для эффективного использования решений для дистанционного обучения, включая поддержку школ и семей, с особым вниманием к тем, кто подвергается риску социальной изоляции (например, обеспечить доступность аппаратного оборудования, а также обучения). Значительное улучшение цифровых навыков в период

2019–2020 гг. как базового, так и продвинутого уровня достигло уровня 58 % (по сравнению с 55 % в 2015 году). Несмотря на рост показателей по цифровым навыкам и учитывая тот факт, что большинство имеющихся вакансий требует базового уровня владения компьютерной техникой, вопрос о развитии цифровых навыков у населения ЕС остается открытым. В 2018 году около 9,1 миллиона человек работали специалистами по ИКТ в ЕС, что на 1,6 миллиона больше, чем 4 года назад. Имеющий дефицит специалистов в области ИКТ продолжает сохраняться. Проблема подбора кадров с соответствующей специализацией и квалификацией имеет место в Румынии и Чехии, где не менее 80 % предприятий, которые нанимали или пытались нанять, сообщили о таких трудностях. Существует также проблема гендерного баланса, поскольку только каждый шестой специалист по ИКТ является женщиной. В целом в измерении человеческого капитала DESI Финляндия, Швеция и Эстония являются самыми передовыми [3].

Использование Интернета. Использование Интернета отдельными лицами резко возросло во время пандемии. Всеобщее заключение привело к постоянному доступу к социальным сетям и развлекательным платформам, а также к удаленной работе, электронной коммерции и услугам электронного правительства. Эта тенденция существовала еще до пандемии, поскольку использование Интернета продолжало расти: 85 % европейцев выходят в Интернет не реже одного раза в неделю (по сравнению с 75 % в 2014 году). Цифры варьируются от 67 % в Болгарии до 95 % в Дании, Швеции и Нидерландах. Использование видеозвонков выросло больше всего: с 49 % интернет-пользователей в 2018 году до 60 % в 2019 году. Интернет-банкинг и покупки также стали более популярными: их используют 66 % и 71 % интернет-пользователей соответственно. Напротив, только 11 % прошли онлайн-курсы.

По мере того, как экономика ЕС готовится к восстановлению, обеспечение сохранения этих возможностей будет приоритетом. Ключевую роль в этом будет играть более совершенная телекоммуникационная инфраструктура.

Интеграция цифровых технологий бизнесом. Поскольку руководство большинства европейских государств принимали меры по сокращению социального взаимодействия, предприятия приходилось адаптироваться, вводя альтернативные формы работы. Малым и средним предприятиям (в том числе микропредприятиям) с низким уровнем цифровизации сложно предоставить своим сотрудникам возможность работать из дома. Одним из основных препятствий на пути цифровизации МСП является пробел в цифровых знаниях, который вызван низким уровнем цифровой грамотности владельцев, руководителей и сотрудников. Устранение этих недостатков будет иметь жизненно важное значение для обеспечения надежного восстановления. Незадолго до пандемии интеграция цифровых технологий предприятиями демонстрировала большие различия в зависимости от размера компании, сектора, а также государства-члена. Предприятия становились все более и более цифровыми, и крупные компании брали на себя инициативу. 38,5 % крупных компаний уже полагаются на передовые облачные сервисы, а 32,7 % использовали аналитику больших данных. Однако подавляющее большинство малых и средних предприятий еще не воспользовались преимуществами этих технологий: только 17 % из них использовали облачные сервисы и только 12 % – аналитику больших данных. Лучшими в своем классе по этим показателям являются: Мальта с 24 % компаний, использующих большие данные, и Финляндия, 50 % из которых полагаются на облачные сервисы. Что касается электронной коммерции, то в 2019 году только 17,5 % малых и средних предприятий продавали через Интернет, после очень небольшого увеличения на 1,4 процентных пункта по сравнению с 2016 годом. Напротив, в 2019 году 39 % крупных предприятий использовали онлайн-продажи. оцифровкой бизнеса являются Ирландия, Финляндия, Бельгия и Нидерланды.

Цифровые госуслуги. Кризис COVID-19 показывает, насколько важно обеспечить продолжение деятельности правительства, когда действуют меры социального дистанцирования. Успешная стратегия выхода из нынешней пандемии потребует надежных цифровых государственных услуг во всех государствах-членах, включая электронное здравоохранение (например, телемедицину, электронные рецепты и обмен медицинскими данными), а также использование передовых технологий для улучшения государственных услуг, например, путем использования больших данных. До пандемии наблюдалась тенденция роста цифровых госуслуг. В 2019 году выросли как качество, так и использование цифровых государственных услуг. 67 % интернет-пользователей, которые представили формы в свои государственные органы, теперь используют онлайн-каналы (по сравнению с 57 % в 2014 году), что свидетельствует об удобстве

онлайн-процедур по сравнению с бумажными. Лидерами в этой области являются Эстония, Испания, Дания, Финляндия и Латвия.

На рисунке 1 показан прогресс государств-членов в отношении общего уровня цифровизации экономики и общества за последние 5 лет по оценкам DESI.

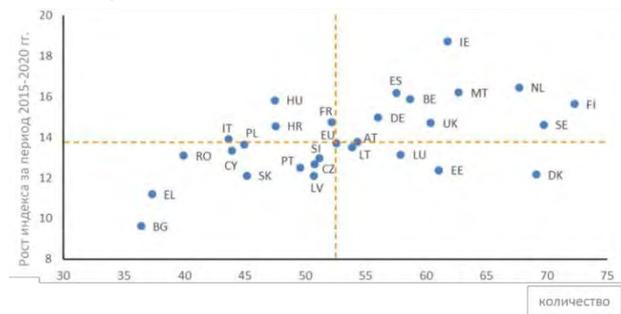


Рисунок 1 – Индекс цифровой экономики и общества: прогресс государств, 2015–2020 гг.

Источник: DESI 2020, Европейская комиссия

Наиболее значительный прогресс отмечен в Ирландии, за ней следуют Нидерланды, Мальта и Испания. Эти страны также показывают результаты, намного превышающие средний показатель по ЕС, согласно шкале DESI. Общими для этих государств-членов являются надежная политика и целевые инвестиции во всех областях, измеряемых DESI. Финляндия и Швеция входят в число лидеров по общей эффективности цифровых технологий, но с точки зрения прогресса за последние пять лет они лишь немногим выше среднего, вместе с Бельгией и Германией. Дания, Эстония и Люксембург демонстрируют относительно низкий прогресс в оцифровке за последние пять лет, даже несмотря на то, что они остаются среди государств-членов с высокими показателями в общем рейтинге DESI. В Дании самая большая проблема заключается в дальнейшем улучшении передовых цифровых навыков, в то время как в Люксембурге цифровизация бизнеса относительно низка. В Эстонии наблюдается относительная слабость в отношении подключения и оцифровки предприятий.

Примечательно, что большинство стран, которые ниже среднего по ЕС по уровню цифровизации, не достигли значительного прогресса за последние пять лет. Это касается, в частности, Болгарии, Греции и Румынии. Однако все эти государства-члены недавно запустили несколько инициатив в различных областях, контролируемых DESI, и результаты могут быть заметны в ближайшие годы.

Важно подчеркнуть, что крупнейшие экономики ЕС, с точки зрения ВВП, не входят в число лидеров цифровых технологий, и это влияет на общую производительность единого рынка. При этом в этих государствах-членах недавно было выдвинуто несколько инициатив по улучшению цифровизации экономики и общества. Германия, которая занимает 1-е место среди стран ЕС по готовности к 5G, запустила ряд мер с целью продвижения цифровизации и продвижения инициативы в области ИТ-безопасности, суперкомпьютеров, искусственного интеллекта и блокчейна. Франция начала комплексную работу по оцифровке государственных услуг и предприятий, а также по созданию динамичной экосистемы для технологических стартапов. В декабре 2019 года Италия приняла «Италия-2025» – пятилетний план, который ставит оцифровку и инновации в центр «процесса структурной и радикальной трансформации страны». Эти инициативы, которые требуют надежной реализации с течением времени, а также инвестиций, могут привести к прогрессу этих государств-членов в DESI в ближайшие годы.

В контексте Евразийского экономического союза (ЕАЭС), в который входят пять стран: Республика Армения, Республика Беларусь, Республика Казахстан, Кыргызская Республика и Российская Федерация, доля цифровой экономики в совокупном ВВП ЕАЭС составляет менее 3 %. Основными направлениями цифровизации экономики ЕАЭС являются: обеспечение усиления процессов экономической интеграции и международного сотрудничества; создание благоприятной среды для внедрения региональных цифровых инициатив; создание общей цифровой инфраструктуры и цифровых платформ; цифровизация ведущих экономических отраслей экономики и региональных рынков (рисунок 2). Динамика развития экономики в цифровую эпоху обеспечивается не только за счет новых технологических компаний и предприятий: более 75 % добавленной стоимости приходится на традиционные отрасли благодаря повышению производительности за счет использования Интернета.

Рейтинг EGDl (Индекс развития электронного правительства) оценивает характеристики доступа к электронному правительству, главным образом технологическую инфраструктуру и образовательный уровень, чтобы представить, как страна использует возможности ИКТ для национального, экономического, социального и культурного развития. Индекс интересен для политиков и специалистов, поскольку позволяет проводить анализ состояния и позицию стран в мире в области готовности к развитию и использованию электронного правительства. Обновляемый раз в два года индекс EGDl рассчитывается на основе трех показателей каждой из стран: развитие электронных услуг, развитие человеческого капитала и развитие телекоммуникационной инфраструктуры на протяжении двух лет, предшествующих обновлению рейтинга [4].

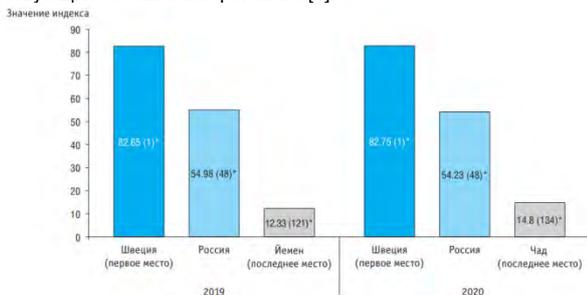


Рисунок 2 – Индекс готовности к сетевому сообществу

Примечания : В скобках указано место страны в рейтинге. Источник: [5].

Каждый из субиндексов, в свою очередь, является средневзвешенным значением его показателей. По итогам 2016 г. Беларусь заняла 49-е место из 193, Казахстан – 33-е, Россия – 35-е, Армения – 87-е, Кыргызстан – 97-е. Значение EGDl для Беларуси составило 0,6625, что значительно выше общемирового EGDl – 0,4922 [8, с. 154]. За период 2010–2016 гг. индекс Республики Беларусь увеличился с 0,4900 балла до 0,6625 балла, обеспечив тем самым рост рейтинга с 64 до 49 места. Отметим, что в 2004 г. Беларусь была только на 81-м месте.

Согласно обзору ООН в 2020 году, Беларусь по уровню развития электронного правительства опередила в рейтинге такие страны, как Бельгия, Греция, Латвия, Китай, Кувейт, Малайзия, Саудовская Аравия, Сербия, Словакия.

Наилучший результат среди стран СНГ в EGDl-2020 продемонстрировал Казахстан, который расположился на 29 строчке рейтинга. Беларусь заняла 40 место, Армения – 68-е, Украина – 69-е, Молдова – 79-е, Узбекистан – 87-е. Из стран постсоветского пространства у Казахстана – третий результат: выше расположились только Эстония, замкнувшая тройку лидеров и уступившая первенство в рейтинге Дании и Южной Кореи, и Литва, ставшая 20-й страной рейтинга. По уровню развития электронного правительства Россия опережает Китай, который занял 45 место в списке [6].

Еще одной составляющей оценки развития цифровой экономики является публикуемый ООН Индекс электронного участия (EPART) – показатель развития сервисов активной коммуникации между гражданами и государством. Цель индекса EPART заключается в отражении механизмов электронного участия граждан в правительственных веб-сайтах. Сферы электронного участия, в свою очередь, рассматриваются через призму технологий участия, включающих специализированные порталы и другие интернет-сайты, социальные сети, мобильные платформы и устройства, технологии открытого правительства и данных. Из стран-членов ЕАЭС Россия разместилась на 32-м месте, Казахстан и Кыргызстан – на 67-м, Беларусь – на 76-м (в 2014 г. была на 92-м месте), Армения – на 84-м. В целом, отставая в силу ряда объективных причин от государств-лидеров, Беларусь по оценке МСЭ и ООН относится к группе стран, непосредственно следующих за лидерами, имеющих большой потенциал и демонстрирующих динамику развития ИКТ.

Республика Беларусь активно включилась в международные рейтинги оценки развития цифровой экономики, а значит, отслеживает не только «свое» место в рейтинге, но и динамику изменений во времени, сравнивая себя с другими странами [7]. Отрицательные тренды отдельных индексов цифрового развития служат сигналом для организаций и руководящих государственных структур к принятию соответствующих мер по их преодолению, а положительные – свидетельствуют о правильно выбранном направлении цифрового реформирования экономики. В аналитическом плане учитываются также

результаты специальных исследований международных организаций, например, Всемирного экономического форума (WEF, World Economic Forum). В исследовании Global Competitiveness Report (GCI), проведенном этой организацией, сравнивается состояние этой области в 141 стране, которые производят 99 % мирового валового продукта планеты.

Необходимо отметить, что Республика Беларусь отсутствует во всех рейтингах World Economic Forum.

Заключение

Кризис COVID-19 усилил потребность в скоординированном общегосударственном политическом подходе к цифровой трансформации. Это потребовало балансирования, которое не будет одинаковым для всех стран, поскольку культурные, социальные и экономические факторы влияют на наиболее подходящую политическую среду. Усиление цифровизации в сферах доступа, использования, инноваций, доверия, увеличение или сохранение рабочих мест, развитие общества и открытость рынка позволит сформировать общее цифровое будущее, которое улучшает жизнь и способствует экономическому росту и благосостоянию.

Список цитированных источников

1. Головенчик, Г. Г. Цифровизация белорусской экономики в современных условиях глобализации / Г. Г. Головенчик. – Минск : Изд. центр БГУ, 2019. – 257 с.
2. The Digital Economy and Society Index (DESI) [Electronic resource] // European Commission. – Mode of Access: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/desi>. – Date of access: 03.01.2022.
3. The Digital Economy and Society Index (DESI) [Electronic resource] // European Commission. – Mode of Access: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_5481 – Date of access: 03.04.2022.
4. Digital Economy Report 2021 [Electronic resource] // European Commission. – Mode of Access: https://unctad.org/system/files/official-document/der2021_en.pdf. – Date of access: 03.03.2022.
5. Рейтинг стран по уровню сетевой готовности [Электронный ресурс] // Институт Портулас. – Режим доступа: <https://nonews.co/directory/lists/countries/networked-readiness-index>. – Дата доступа: 12.04.2022.
6. Measuring the Information Society Report. Volume 1. – Geneva: ITU, 2017. – 156 p.
7. Global Technology Governance Report 2021: Harnessing Fourth Industrial Revolution Technologies in a COVID-19 World / William D. Eggers, Ruth Hickin. – Geneva: Cornell University, INSEAD, WEF, 2020. – 67 p.
8. Digital economy and society. Main Tables [Electronic resource] // Eurostat. – Mode of Access: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/digital-economy-and-society/data/main-tables>. – Date of access: 08.01.2022.

References

1. Golovenchik, G. G. Cifrovizaciya beloruskoj ekonomiki v sovremennykh usloviyakh globalizatsii / G. G. Golovenchik. – Minsk : Izd. centr BGU, 2019. – 257 s.
2. The Digital Economy and Society Index (DESI) [Electronic resource] // European Commission. – Mode of Access: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/desi>. – Date of access: 03.01.2022.
3. The Digital Economy and Society Index (DESI) [Electronic resource] // European Commission. – Mode of Access: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_5481 – Date of access: 03.04.2022.
4. Digital Economy Report 2021 [Electronic resource] // European Commission. – Mode of Access: https://unctad.org/system/files/official-document/der2021_en.pdf. – Date of access: 03.03.2022.
5. Rejting stran po urovnyu setevoy gotovnosti [Elektronnyj resurs] // Institut Portulas. – Rezhim dostupa: <https://nonews.co/directory/lists/countries/networked-readiness-index>. – Data dostupa: 12.04.2022.
6. Measuring the Information Society Report. Volume 1. – Geneva: ITU, 2017. – 156 p.
7. Global Technology Governance Report 2021: Harnessing Fourth Industrial Revolution Technologies in a COVID-19 World / William D. Eggers, Ruth Hickin. – Geneva: Cornell University, INSEAD, WEF, 2020. – 67 p.
8. Digital economy and society. Main Tables [Electronic resource] // Eurostat. – Mode of Access: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/digital-economy-and-society/data/main-tables>. – Date of access: 08.01.2022.

Материал поступил в редакцию 09.06.2022

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОРПОРАТИВНЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И. А. Кулаков¹, Л. О. Кулакова²

¹ Старший преподаватель кафедры менеджмента
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: kulakou1965@mail.ru

² Старший преподаватель кафедры менеджмента
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: lejla67@mail.ru

Реферат

Проблема выбора оптимальной ИТ-системы, с точки зрения современных и будущих требований рынка, в настоящее время является и наиболее актуальной, и наиболее сложной. Рынок разработчиков и поставщиков программных продуктов уже весьма насыщен, разнообразен и при этом продолжает расти с большой скоростью. Поэтому субъектам хозяйствования необходимо опираться на ряд существенных критериев при выборе ЛИС, что в свою очередь предопределяется мировыми тенденциями развития ИТ-технологий в сфере логистики. В противном случае высокие инвестиции в ЛИС неоправданны и ведут серьезным рискам.

В данной работе проанализированы основные ЛИС на рынках ЕАЭС и, в частности, Беларуси. Изучены и оценены ключевые игроки данного рынка – разработчики и поставщики-интеграторы логистических информационных систем.

Ключевые слова: логистическая информационная система, информационные технологии, ИТ-система, интралогистика, логистическое программное обеспечение.

DEVELOPMENT TRENDS OF CORPORATE LOGISTICS INFORMATION SYSTEMS

I. A. Kulakou, L. O. Kulakova

Abstract

The problem of choosing the optimal IT-system in terms of current and future market requirements is currently both the most relevant and the most difficult. The market for developers and software vendors is already very saturated, diverse and continues to grow at a rapid pace. Therefore, business entities need to rely on a number of significant criteria when choosing a LIS, which in turn is predetermined by global trends in the development of IT-technologies in the field of logistics. Otherwise, high investments in LIS are unjustified and lead to serious risks.

This paper analyzes the main LIS in the markets of the EAEU and, in particular, Belarus. The key players of this market - developers and suppliers-integrators of logistics information systems - have been studied and evaluated.

Keywords: logistics information system, information technology, IT system, intralogistics, logistics software.

Введение

Развитие современной логистики невозможно без опоры на информационные технологии. Эффективное управление цепями поставок предполагает систематичный, интенсивный, оперативный обмен информацией, мгновенное реагирование на запросы рынка. Сегодня своевременное и качественное принятие оперативных и стратегических решений в логистической системе любого уровня обеспечивается, прежде всего, благодаря информационным системам и программным комплексам. Более того, именно информационные системы и технологии предопределили роль логистики как доминирующей концепции в мире в области управления товародвижением.

Таким образом, под информационными системами (ИС) и информационными технологиями (ИТ) в логистике подразумевается совокупность программно-технических инструментов и методов генерации, трансфера, анализа и использования информации в организующих товародвижение системах. Ключевым вектором в эволюции ИС и ИТ в логистике является интеграция информационных потоков с применением новейших методов анализа и трансфера данных, получившая название «телематика». К техническим средствам ИТ в логистике относят: электронно-вычислительную технику, персональные компьютеры, серверы, периферийное оборудование, средства коммуникации, автоматизированное оборудование.

Программными средствами ИТ в логистике являются:

- 1) Программные средства общего назначения: ИСУП – информационная система управления предприятием как программная база для создания логистических информационных систем (ЛИС); САПР-системы – средства компьютерного проектирования; АСУТП-системы – средства управления технологическим процессом роботизации, управления автоматизированным оборудованием, в том числе, системы контроля за ходом технологического

процесса; средства управленческого моделирования – моделирование бизнес-процессов, оргструктуры; различные офисные приложения – текстовые редакторы, табличные редакторы, средства создания презентаций, органайзеры; СУБД – система управления базами данных, обеспечивающая функционирование ИСУП; вспомогательные СУБД; прочие программные средства.

- 2) Специализированные программные средства: входящие в состав корпоративных информационных систем (КИС) – подавляющее большинство КИС содержит модуль Логистики или блок Логистика, состоящий, в свою очередь, из нескольких модулей; самостоятельные программные средства, реализующие отдельные логистические функции[1].

Более детально и глубоко процессы информационного взаимодействия в товародвижении освещены в специальной литературе, рассматривающей межорганизационное взаимодействие и международную торговлю на макроуровне. Следует констатировать, что проблема рационализации, а тем более оптимизации информационных систем, в настоящее время недостаточно изучена, отдельные рекомендации по их интеграции в цепи поставок большей частью опираются на практический опыт.

Возникновение и бурное развитие информационной логистики как самостоятельной сферы аналитических исследований и эмпирического опыта обусловлено, пожалуй, главенствующей ролью информации в бизнес-процессах, а также стремительным динамизмом средств связи и компьютерной техники. Важнейшая, если не ключевая, роль информации в современном мире объясняется многими факторами: значительным удельным весом информации в себестоимости продуктов и услуг; возрастающей долей ИТ-работников на рынке труда; интегрирующей функцией информации в экономике и социуме в целом; инновационной функцией, выражающейся в генерировании новых идей, их трансформации и диффузии.

Актуальность широкого внедрения и использования ИТ в логистике предопределена нарастающими объемами обрабатываемой и анализируемой информации, а также тесной корреляцией между скоростью оборота информации и всех других необходимых ресурсов в цепях поставок и логистических системах, что в настоящее время является очевидным для всех игроков рынка. Именно поэтому информацию часто называют "стратегическим сырьем". В экономике развитого Запада затраты на информацию уже превышают затраты на энергию, что приводит к значительному росту эффективности производства. Прорывную роль в скачке роста производительности труда сегодня играют современные информационные технологии, базирующиеся на концепциях информационных хранилищ и интеллектуальной обработки данных [1].

Исследования в рамках выше обозначенного «проблемного поля», т. е., логистического направления информационных систем, нашли своё отражение в работах белорусских ученых – М. М. Ковалева и В. М. Котова. Отдельные аспекты управления логистическими информационными системами освещены в работах А. А. Королевой и А. А. Дутиной [2], Е. Г. Елфимовой, Р. Б. Ивуця, А. В. Черновалова, Т. Р. Киселя, В. Ф. Медведева, И. А. Елового, Е. А. Аюжитова, Н. Ю. Вайгандта, В. В. Дыбской, В. И. Сергеева, Н. Н. Лычкиной и др.

Анализ логистических информационных систем

Логистическая информационная система (ЛИС) – одна из важнейших составляющих корпоративной информационной системы (КИС), предназначенная для решения, оптимизации, автоматизации задач, связанных с управлением складскими, транспортными, а при более высоком уровне – производственными и финансовыми ресурсами.

На рисунке 1 представлена функциональная модель предприятия на основе международного стандарта ANSI/ISA-95 для создания интерфейса между предприятиями-партнерами и управляющими системами Северной Америки [3]. Ему соответствует европейский стандарт IEC 62264.

Классификация логистических информационных систем представлена ниже:

- система управления автохозяйством (FMS);
- система управления ТООП транспортными средствами и вооружением;
- CTM (Container Terminal Management) – управление контейнерным терминалом;
- системы безопасности и контроля автотранспорта;
- S&OP (Sales & Operation Planning) – система планирования продаж и операционной деятельности;
- FP&S (Factory planning & Scheduling) – система планирования технологических процессов и создания календарных графиков;
- SRM (Supplier Relationship Management) – система управления взаимоотношениями с поставщиками;
- CRM (Customer Relationship Management) – система управления взаимоотношениями с заказчиками;
- TMS (Transportation Management System) – система управления транспортом;
- WMS (Warehouse Management System) – система управления складом.

Каждая из названных областей обладает своей спецификой и предполагает различные подходы к управлению[3].

Выбор логистического программного обеспечения сопряжён не только с его функциональными возможностями или условиями конкретного поставщика ПО, но и, прежде всего, – гибкостью, адаптивностью, высокой степенью интегрируемости информационной системы, что обеспечивает в итоге рост рентабельности предприятия за счет эффективного управления ресурсами.

Развитие ANSI/ISA-95 (IEC 62264)

Основные поддерживаемые задачи

- ✓ Стратегическое управление
- ✓ Анализ показателей деятельности предприятия
- ✓ Производственно-экономическое моделирование
- ✓ Консолидация отчетности
- ✓ Управление запасами
- ✓ Управление снабжением
- ✓ Управление сбытом
- ✓ Управление производством
- ✓ Управление проектами
- ✓ Планирование
- ✓ Управление сервисным обслуживанием
- ✓ Управление поставками
- ✓ Управление финансами
- ✓ Управление персоналом
- ✓ Проектирование
- ✓ Управление документооборотом
- ✓ Управление ИТ-сервисами
- ✓ Управление ИБ
- ✓ Оперативное/Детальное планирование производства
- ✓ Оперативно-диспетчерское управление производством
- ✓ Управление технологической документацией
- ✓ Управление качеством продукции
- ✓ Управление производственными процессами
- ✓ Анализ производительности
- ✓ Сбор технологических параметров
- ✓ Визуализация технологических параметров
- ✓ Автоматический контроль технологических параметров
- ✓ Управление технологическим процессом
- ✓ Контроль действий оператора



Рисунок 1 – Функциональная модель предприятия

Примечание – *Источник:* составлено на основе [4]

Характеристика функциональных рынков компаний-интеграторов ЛИС

В настоящее время на рынках ЕАЭС зарегистрировано около 100 компаний-разработчиков и поставщиков ЛИС [4].

На рисунке 2 представлена структура рынка поставщиков ЛИС в ЕАЭС.

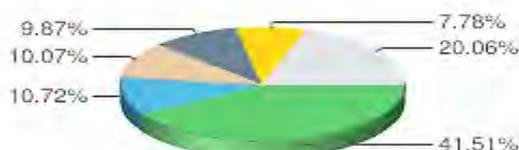


Рисунок 2 – Структура рынка поставщиков ЛИС в ЕАЭС

Источник: составлено на основе [4]

На территории ЕАЭС функционируют компании-интеграторы:

- 20,06 % – Ай Ти Скан (IT Scan);
- 10,72 % – 1С-Парус;
- 10,07 % – ИнтелСервис;
- 9,87 % – Эн + Диджитал (En+ Digital);
- 7,78 % – Ахелот (Акселот);
- 41,51 % – Другие [4].

Рисунок 3 демонстрирует структуру рынка разработчиков и поставщиков программного продукта ERP в ЕАЭС.

Охарактеризуем ключевых поставщиков и разработчиков IT-продуктов на рынки ЕАЭС.

«IT Scan» – российский разработчик и интегратор систем управления складом (WMS). Оказывает услуги по логистическому проектированию и внедрению складских технологий, систем управления, поставке и адаптации программного обеспечения и оборудования в контуре WMS-системы, технического сопровождения с учетом специфики складов.

1С-Парус – совместное предприятие двух компаний: «1С» и «Парус», образованное в 1994 году. Сегодня «1С-Парус» – холдинг, имеющий филиалы в 17 российских городах с персоналом численностью более 2700 сертифицированных фирмой «1С» специалистов. Качество менеджмента «1С-Парус» соответствует международному стандарту ISO 9001:2015. «1С-Парус» является ключевым партнером компании «1С», а также сертифицированным партнером Google, золотым партнером Билайн и 1С-Битрикс, членом ассоциации некоммерческого партнерства поставщиков программных продуктов (НП ППП).

1С-Парус предоставляет услуги по разработке приложений и их внедрению, в том числе для платформ iOS (iPhone, iPad), Android, кросс-платформенных приложений с использованием мобильной платформы «1С»; созданию пользовательских интерфейсов; аудиту работы подрядчиков; созданию комплексных систем, включающих web, серверную и мобильную часть; интеграции разработанных решений в существующие у заказчика информационные системы на платформе «1С:Предприятие».

ИнтелСервис (CWMS-3000) — разработчик и поставщик WMS-систем автоматизации и управления складской деятельностью, обеспечивающих управление всем комплексом технологических операций на складах и биллинг (расчет) складских и иных услуг.

Тенденции развития ЛИС

Логистика сегодня является основным инструментом, влияющим на структуру и уровень затрат. Традиционные резервы оптимизации себестоимости внутри самого предприятия (интралогистика, производственная логистика) оказались не бесконечны, и большинство предприятий осознали необходимость внедрения информационных технологий (ИТ) как во внутренний, так и внешний контур (цепь поставок). Однако именно проблема выбора оптимальной ИТ-системы с точки зрения современных и будущих, стремительно меняющихся требований рынка, в настоящее время является и наиболее актуальной, и наиболее сложной. Рынок разработчиков и поставщиков программных продуктов уже весьма насыщен, разнообразен и при этом продолжает расти с большой скоростью. Поэтому субъектам хозяйствования необходимо опираться на ряд существенных критериев при выборе ЛИС, что в свою очередь определяется мировыми тенденциями развития ИТ-технологий в сфере логистики. Рассмотрим наиболее значимые из них:

1. *Тенденции интралогистики.* Высокая эффективность инвестиций может быть обеспечена сегодня лишь при условии учёта динамики рынка и факторов, влияющих на его поведение. По результатам исследования «Будущее интралогистики 2020+» Научно-исследовательского общества по интралогистике, подъёмно-транспортному оборудованию и логистическим системам

(IFL) были выявлены три глобальные тенденции, существенно влияющие на развитие интралогистики:

- глобализация экономики;
- рост эффективности использования ресурсов;
- рост инновационной активности [5].

Именно эти тренды мирового рынка являются точкой отсчёта при выборе оптимальной для предприятия ИТ-системы, поскольку её важнейшее назначение – стимулирование инновационной активности, совершенствование бизнес-процессов или, как минимум, оказание им поддержки, обеспечение эффективного использования имеющихся ресурсов. Для международных корпораций, кроме того, необходима системная интеграция с контрагентами, преодолевающая границы и континенты. Таким образом, интегративность, адаптивность и эффективность являются в настоящее время ключевыми в процессе выбора оптимального логистического софта.

2. *Стандартное программное обеспечение (ПО) со свойствами индивидуальной системы.* Сегодня перед разработчиками программных продуктов для нужд интралогистики уже не стоит задача создания ПО «с нуля» в каждом конкретном случае. Связано это с высокими затратами многих ресурсов – финансовых и интеллектуальных, и, что ещё более значимо, затратами времени. Поэтому индивидуальность ПО для интралогистики достигается за счёт модульной структуры стандартных продуктов. Современные софты по своей сути представляют собой программные LEGO, позволяющие на базе стандартной системы комбинировать, изменять параметры, масштабировать её отдельные элементы, создавая при этом индивидуальный продукт, отвечающий требованиям пользователя и рассчитанный на конкретные процессы.

3. *Архитектура.* Адаптивность ПО предопределяется уже на этапе формирования её базовой архитектуры, получившей название аспектно-ориентированной (сервисно-ориентированной) архитектуры (SOA). Такой подход возник в ответ на усложнение и ускорение бизнес-процессов в рамках современной концепции комплексной логистики, с одной стороны, и расширения амплитуды функциональных задач, успешно решаемых с помощью различных программных продуктов.

4. *Интерфейсы.* Одной из сложнейших проблем интралогистики является необходимость согласованности и скоординированности взаимодействия многочисленных материальных объектов (стеллажи, подъёмно-транспортное оборудование, штабелёры, системы управления и т. д.), производителей, подрядчиков и субподрядчиков, посредников и прочих контрагентов.

Кроме того, уже сегодня остро стоит задача оперативного обмена информацией с партнерами в цепочках поставок в сетях с различными системными ландшафтами. Следовательно, есть необходимость стандартного подключения оборудования к специальным интерфейсам, его расширения либо модернизации на модульной основе.

5. *Совокупные затраты на ИТ.* Суммы инвестиций в системы управления складами сегодня измеряются миллионами евро, при этом лишь 15 % общих расходов (TCO – Total Cost of Ownership) составляют стартовые инвестиции, а с учётом стоимости оснащения и сетей, эксплуатационных издержек и сторонних услуг начальные инвестиции составляют 40 % от суммарных проектных затрат на ИТ-системы. Остальные 60 % – это текущие расходы на развитие и поддержку проекта.

Таким образом, прогнозируя и бюджетуруя предстоящие инвестиции по внедрению ПО и современной ЛИС на предприятии, следует обращать внимание не только и не столько на стоимость предложения поставщика софта, сколько на дальнейшие условия его эксплуатации, гарантии и сроки ввода, дополнительный сервис, что обеспечит эффективную поддержку бизнес-процессов и адаптировать программный продукт к изменяющейся бизнес-модели предприятия в будущем.

6. *Тенденции и технологии.* Сегодня ИТ-системы представляют собой многофункциональные смарт-комплексы, обладающие свойствами адаптивности, гибкости и интегративности. Гибкость и адаптивность – свойства, необходимые для настройки и подстройки ИТ-систем к стремительно меняющимся микро- и макро-бизнес-процессам. Интегративность же предполагает способность встраиваться и объединять в единую систему, более высокого уровня, софты различных партнеров, например, в цепочках поставок. Такие возможности достигаются за счёт модульности структуры стандартного программного продукта.

7. *Пользовательский интерфейс.* Сегодня требования к пользовательскому интерфейсу достаточно высоки. Он должен быть удобным, интуитивно понятным, легко воспринимаемым и осваиваемым,

позволяющим работать на разных языках, адаптируемым под индивидуальные запросы и задачи пользователя.

В сфере логистики наиболее ценными ресурсами являются достоверная информация и время, и поэтому сегодня всё более востребованы мобильные концепции интерфейса, выходящие за границы традиционных систем управления штабеллерами и электронного коммиссионирования, такие как iPhone и iPad компании Apple.

8. *Сети между предприятиями.* Жесткий прессинг глобальной конкуренции, рост цен, усиление требований к качеству и сервису в новых экономических реалиях, когда, по сути, происходит новый передел мира, ведут к необходимости перестройки и модернизации цепей товародвижения под стремительно меняющиеся условия. Таким образом, возникает острая необходимость адаптации современных ПО к новым требованиям логистики. Уже сегодня перед разработчиками и поставщиками логистических программных продуктов стоит важная задача создания единой мировой цифровой логистической системы, позволяющей моделировать и сравнивать различные варианты перевозок на основе достоверного прогноза издержек, а следовательно, выстраивать и оптимизировать цепи поставок любой географии, сложности и протяженности.

Итак, в результате цифровой трансформации производства и торговли, взрывного роста масштаба их внедрения, логистика и электронное управление цепями поставок (е-УЦП/е-SCM) сегодня играют роль ключевых инструментов и факторов, влияющих на уровень себестоимости конечного продукта; структуру и масштабы компаний, секторов и отраслей экономики; выбор бизнес-моделей и бизнес-стратегий; в целом инфраструктуру цифровой экономики страны. Во всём мире актуальной является задача разработки и внедрения инновационных технологий, востребованных e-SCM, таких как RFID, Mobileapp, Big Data, Cloud Services, IoT, Blockchain, 3D Printing и др. новейших ИТ-продуктов для ускорения и оптимизации цепей поставок, автоматизации бизнес-процессов и достижения высокой их эффективности.

Рассмотрим основные мировые тенденции в сфере e-логистики и УЦП до 2030 г., выявленные ведущими аналитическими и консалтинговыми компаниями и подтверждающие необходимость ускоренного развития цифровой логистики в Беларуси:

- эффективность логистики будет определяться большими данными (Big Data) и новейшими ИТ-технологиями: Blockchain, IoT, AR/VR, ML, AI;
- широкое использование больших данных приведёт к усилению значения предиктивного анализа и прогнозирования;
- большая гибкость и динамичность (Agile) логистики будут обеспечены облачными сервисами;
- логистический сервис для потребителей значительно расширится за счет интернет-вещей;
- большая часть логистических операций будет осуществляться чат-ботами и роботами;
- начиная с 2022–2023 гг. будет преобладать рынок логистических роботов;
- большинство фирм будут использовать индивидуальные ИТ-технологии с целью эффективной доставки на последней миле (Last-mile Logistics);
- беспилотные доставки (транспорт без водителей) станут реальностью;
- в системе логистической безопасности кибербезопасность приобретает приоритетный характер;
- использование мобильных приложений в области логистики стремительно растёт.

Цифровая трансформация белорусской экономики и социума достигла внушительного размаха, однако в отсутствии общей методологической основы, централизованной электронной платформы, системного анализа происходящих преобразований в производстве, торговле, в целом в цепочках поставок пока наблюдается скорее «цифровой хаос», чем стройная концепция. Разрозненные и разнонаправленные цифровые технологии, спонтанные оперативные решения без проекции на стратегические цели, фрагментарное использование потенциала программных продуктов, обусловленное недостаточным уровнем компетенций персонала, страхами реализации сложных систем, отсутствие практически выверенной методологии цифровизации логистических систем и целей – это реальная система координат, в которой действуют современные белорусские субъекты логистики.

Основные цифровые технологии, популярные в развитом мире, такие как Big Data (аналитика больших данных), IoT (интернет вещей), технология Blockchain (системы распределенного реестра), Cloud Services (облачные сервисы), Artificial Intelligence (искусственный интеллект), дополненная/виртуальная реальность (Augmented/Virtual

Reality), Machine Learning (машинное обучение), методология на базе SCOR-модели коммуникационной сетевой структуры (Multi Party Network), технологии блокчейн, экосистема цифровых двойников, платформа контроля и мониторинга событий в цепи поставок (Supply Chain Control Tower) – это та цифровая инфраструктура, без широкого внедрения которой дальнейшее развитие логистической макросистемы Беларуси и успешной ее интеграции в мировую невозможно [5].

Заключение

Успешное становление информационной логистики в Беларуси предопределяется доминирующей ролью информации в мировых бизнес-процессах, высокой обеспеченностью страны средствами связи и компьютерной техники. Ведущая роль информации связана со следующими факторами: значительным удельным весом информации в себестоимости товаров и услуг; возрастающей долей ИТ-работников на рынке труда; интегрирующей функцией информации в экономике и социуме в целом; инновационной функцией, выражающейся в генерировании новых идей, их трансформации и диффузии.

Применение инструментов ИТ в логистике предназначено для обслуживания цепей поставок, различных бизнес-процессов между структурными единицами предприятий и самостоятельными субъектами хозяйствования в закупочной и распределительной логистике. Информационные технологии в отрыве от конкретных стадий товародвижения, без учета фазы и функций логистики, то есть вне конкретных задач, – бесполезны. Эффективная логистическая информационная система базируется, прежде всего, на глубоком изучении потребностей и сложнейших проблем предприятия, различных ее потоков и лишь затем с помощью новейших ИТ-средств решает их в индивидуальном режиме. В противном случае высокие инвестиции в ЛИС неоправданны и ведут серьезным рискам.

Резюмируя, можно заметить, что цифровизация – процесс объективный, и поэтому неизбежный, но от скорости ее реализации в отдельной стране зависит ее интегрированность и конкурентоспособность на мировых рынках.

Список цитированных источников

1. Информационная логистика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studme.org/10611207/logistika/informatsionnaya_logistika. – Дата доступа: 23.03.2022.
2. Королева, А. А. Международная транспортная логистика: конкурентные позиции Беларуси : монография / А. А. Королева, А. А. Дутина. – Минск : Изд. Центр БГУ, 2020. – 143 с.
3. Логистическая информационная система. Классификации и методы // TAdviser - портал выбора технологий и поставщиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.tadviser.ru. – Дата доступа: 14.02.2022.
4. Бизнес. Технологии. Государство. [Электронный ресурс] // Информационный портал. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru>. – Дата доступа: 23.03.2022.
5. Тенденции Развития ЛИС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studme.org/10611207/logistika/informatsionnaya_logistika. – Дата доступа: 23.03.2022.
6. Кулаков, И. А. Логистика (в схемах, рисунках, и таблицах) : краткий курс лекций / И. А. Кулаков, В. В. Зазерская, Л. О. Кулакова. – Брест : БрГТУ, 2019. – 108 с.

References

1. Informatsionnaya logistika [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://studme.org/10611207/logistika/informatsionnaya_logistika. – Data dostupa: 23.03.2022.
2. Koroleva, A. A. Mezhdunarodnaya transportnaya logistika: konkurentnye pozicii Belarusi : monografiya / A. A. Koroleva, A. A. Dutina. – Minsk : Izd. Centr BGU, 2020. – 143 s.
3. Logisticheskaya informatsionnaya sistema. Klassifikatsii i metody // TAdviser - portal vybora tekhnologii i postavshchikov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: www.tadviser.ru. – Data dostupa: 14.02.2022.
4. Biznes. Tekhnologii. Gosudarstvo. [Elektronnyj resurs] // Informatsionnyj portal. – Rezhim dostupa: <https://www.tadviser.ru>. – Data dostupa: 23.03.2022.
5. Tendencii Razvitiya LIS [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://studme.org/10611207/logistika/informatsionnaya_logistika. – Data dostupa: 23.03.2022.
6. Kulakov, I. A. Logistika (v skhemah, risunkah, i tablicah) : kratkij kurs lekciy / I. A. Kulakov, V. V. Zazerskaya, L. O. Kulakova. – Brest : BrGTU, 2019. – 108 s.

Материал поступил в редакцию 06.05.2022

ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ ТРЁХМЕРНЫХ СТРУКТУР ДАННЫХ В ТРАНСПОРТНОМ АСПЕКТЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ

Н. Н. Леонович¹, Т. Ф. Старовойтова², Т. Г. Хомицкая³

¹ Аспирантка кафедры управления информационными ресурсами Академии управления при Президенте Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: nnleonovich@g.bstu.by

² К. э. н., доцент, доцент кафедры управления информационными ресурсами Академии управления при Президенте Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: Tan.star00@gmail.com

³ Старший преподаватель кафедры информатики и прикладной математики Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: tgh@g.bstu.by

Реферат

Базовым способом решения транспортной задачи коммивояжёра является метод ветвей и границ, в основе которого лежит последовательное разбиение множества допустимых решений на подмножества. При этом, на каждом шаге метода, подмножества проверяются на оптимальность, посредством вычисления оценки снизу для целевой функции.

В данной статье рассматривается способ применения метода ветвей и границ в виде алгоритма Литтла для поиска кратчайшего маршрута движения по заданной матрице расстояний. Авторами статьи метод автоматизирован в виде процедур и функций, созданных в Visual Basic for Application приложения Microsoft Excel с использованием трёхмерных массивов.

Ключевые слова: задача коммивояжёра, метод ветвей и границ, алгоритм Литтла, автоматизация, Visual Basic for Application.

TOOL USE BASED ON THREE-DIMENSIONAL DATA STRUCTURES IN THE TRANSPORT ASPECT OF THE SYSTEM MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT

N. N. Leonovich, T. F. Starovoitova, T. G. Khomitskaya

Abstract

The basic way to solve the transport traveling salesman problem is the branch and bound method, which is based on the sequential partitioning of the set of feasible solutions into subsets. At the same time, at each step of the method, subsets are checked for optimality by calculating a lower estimate for the objective function.

This article discusses how to apply the branch and bound method in the form of Little's algorithm to find the shortest route for a given distance matrix. The authors of the article automated the method in the form of procedures and functions created in the Visual Basic for Application of Microsoft Excel using three-dimensional arrays.

Keywords: traveling salesman problem, branch and bound method, Little's algorithm, automation, Visual Basic for Application.

Введение

Математическое моделирование играет важную роль в решении различных задач, позволяя оценить структуру для целостного анализа, и в связи с этим является неотъемлемой частью любого исследования в области экономики. Ввиду сложности экономических систем, для их структурного описания используются различные подходы, одним из которых является линейное программирование. В общем случае задача, в которой необходимо найти самый дешевый способ удовлетворить спрос в n пунктах назначения, таким образом уменьшив транспортные издержки предприятия, делая его конкурентоспособным, является транспортной задачей с возможностью исследования при помощи методов линейного программирования. Частным случаем транспортной задачи является задача коммивояжёра.

Задача коммивояжёра (от англ. Travelling salesman problem (TSP)) заключается в поиске самого выгодного маршрута, проходящего через указанные точки хотя бы по одному разу с последующим возвратом в первоначальную точку. В условиях задачи указываются критерий выгоды маршрута (кратчайший, самый дешевый или др.) и соответствующие матрицы (расстояний, стоимости и др.). Как правило, маршрут должен проходить через каждый пункт только один раз и условный коммивояжёр должен вернуться в исходный пункт отправления, другими словами, во взвешенном графе требуется найти гамильтонов контур минимального веса. Сложность данной задачи заключается в том, что при увеличении количества городов, при полном переборе всех вариантов, количество возможных маршрутов будет очень большим: при составлении маршрута для 10 пунктов – число перестановок составит $n!=3\ 628\ 800$, а для 15 пунктов – уже более одного триллиона (1 307 674 368 000).

Задача коммивояжёра находит применение на практике в различных областях экономики и человеческой деятельности: финансы (оптимизация денежных потоков), туризм (расчет маршрутов экскурсий и туров), шоу-бизнес (организация турне музыкальных артистов), телекоммуникации и связь (проектирование телекоммуникационных сетей, управление спутниками), энергетика и коммунальное хозяйство (соединение населенных пунктов линиями электропередач, газоснабжения, схем вывоза мусора), электроника (проектирование топологий микросхем, оптимальное вырезание чипов лазером) и мн. др.

Для поиска решения задачи коммивояжёра кроме эвристических способов решения (муравьиный, генетический алгоритмы) существуют комбинаторные (метод северо-западного угла, симплекс-метод), среди которых следует выделить метод ветвей и границ [1]. В отличие от глобального рассмотрения всех возможных вариантов (полного перебора), в методе ветвей и границ происходит отсев подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных. Основу метода составляют две процедуры: ветвления и нахождения оценок (границ). Процедура ветвления состоит в разбиении множества допустимых решений на подмножества (подобласти) меньших размеров. Полученные подмножества образуют бинарное дерево поиска (в каждом узле порождаются 2 ветви), например, содержит маршрут выбранную дугу перехода или не содержит. Процедура нахождения оценок заключается в поиске верхних и нижних границ для решения задачи на подмножестве допустимых решений. Суть заключается в следующей идее: если нижняя граница значений функции на подобласти P больше, чем верхняя граница на какой-либо ранее рассмотренной подобласти, то P может быть отсеяна из дальнейшего рассмотрения. Если нижняя граница для узла

дерева совпадает с верхней границей, то это значение является минимумом функции на соответствующей подобласти.

Метод ветвей и границ имеет широкое применение во многих экономических практических задачах: календарное планирование, упорядочение работ в системе конвейерного типа, сетевое планирование с ограниченными ресурсами.

Целью данного исследования является создание инструментального средства в виде программной реализации метода ветвей и границ для автоматизации формирования оптимального (кратчайшего) маршрута движения автомобиля.

Математическая модель транспортной задачи коммивояжёра

Рассматривается n пунктов назначения, связанных дорожной сетью. С каждой дугой (i, j) связано значение C_{ij} , интерпретируемое как расстояние от пункта i до пункта j . Маршрут или путь – это произвольная последовательность дуг, соединяющих данные пункты. Пусть булевы переменные x_{ij} принимают значение 1 (истина), если коммивояжёр переезжает из i -го пункта в j -й пункт и 0 (ложь), если j -й пункт не посещается после i -го. В таком случае решением задачи будет определение минимума целевой функции – пройденного расстояния:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \tag{1}$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}; \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}; \tag{3}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \tag{4}$$

Здесь функция (1) определяет расстояние выбранного маршрута. Условие (2) в силу ограничения (4) указывает на то, что после пункта i может следовать только один пункт, а условие (3) – перед пунктом j может быть также только один пункт.

Для того чтобы обеспечить замкнутость маршрута (выйти из первого и вернуться, после обхода всех пунктов только один раз, опять в первый) и избежать замкнутых подциклов (несвязанных между собой), необходимы дополнительные ограничения, связывающие переменные x_{ij} . Не допускается расщепление замкнутого из $n+1$ звеньев маршрут условного коммивояжёра на несколько замкнутых маршрутов меньшего числа звеньев [2]:

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad x_{ij}, \quad i, j = \overline{2, n}, \quad i \neq j. \tag{5}$$

Таким образом, условие (5) определяет построение гамильтонова цикла из n вершин. Следует отметить, что в сформулированной задаче в качестве неизвестных, кроме переменной x_{ij} , выступают переменные $u_i, \quad i = \overline{2, n}$.

Алгоритм решения задачи коммивояжёра посредством метода ветвей и границ был предложен в 1963 году группой учёных Дж. Литтлом, К. Мурти, Д. Суини, К. Кэролом и в дальнейшем получил название алгоритм Литтла [3].

Пример решения транспортной задачи при помощи алгоритма Литтла

В качестве примера рассмотрим процесс поиска оптимального (с минимальной длиной) маршрута движения автомобиля для сбора твердых коммунальных отходов из пяти контейнерных площадок Брестского района, где первая точка маршрута – мусороперерабатывающий завод, из которого начинается и которым должен завершаться маршрут, итого шесть пунктов маршрута.

Расстояния между пунктами расположения контейнерных площадок взяты из геоинформационной системы Яндекс.Карты [4] (рисунок 1), округлены до целых (для наглядности расчетов) и представлены в исходной матрице W_0 (рисунок 2). Всем элементам матрицы расстояний, расположенным на главной диагонали,

присвоены достаточно большие, по сравнению с остальными, значения, так как соответствующие им дуги – это петли, которые не должны включаться в маршрут.



Рисунок 1 – Поиск расстояния по карте между двумя пунктами в геоинформационной системе Яндекс.Карты [4]

1. *Получение приведённой матрицы W_0^* .* Для этого необходимо выписать справа от каждой строки исходной матрицы W_0 минимальный элемент, а затем вычесть из каждой строки ее минимальный элемент; далее необходимо выписать под каждым столбцом полученной матрицы минимальный элемент этого столбца и затем вычесть из каждого столбца его минимальный элемент (нулевые минимальные элементы не учитываются, так как их вычитание ничего не изменит). Таким образом получится приведённая матрица W_0^* , у которой в каждой строке и каждом столбце содержится нуль.

W_0	1	2	3	4	5	6		W_0^*	1	2	3	4	5	6
1	1000	11	9	12	9	7	7	1	993	4	2	5	2	0
2	6	1000	16	12	10	4	4	2	2	996	12	8	6	0
3	3	13	1000	6	10	2	2	3	1	11	998	4	8	0
4	3	1	2	1000	4	18	1	4	2	0	1	999	3	17
5	5	3	1	2	1000	11	1	5	4	2	0	1	999	10
6	4	5	8	7	9	1000	4	6	0	1	4	3	5	996

Рисунок 2 – Получение приведённой матрицы W_0^* из исходной матрицы расстояний

2. *Нахождение предварительной нижней оценки C_0 общей длины маршрута.* Для этого достаточно просуммировать все вычитенные числа: $C_0 = 7 + 4 + 2 + 1 + 1 + 4 + 1 + 2 = 22$. Число C_0 указывает, что построить маршрут меньшей длины нельзя.
3. *Вычисление оценок (степеней) всех нулевых элементов приведённой матрицы.* Для этого для каждого нуля вычисляется сумма минимальных элементов строки и столбца, на пересечении которых он располагается без учета рассматриваемого нуля.
4. *Выбор нуля с наибольшей степенью (если таких несколько, то выбирается любой).* Альтернативным является первый нуль с наибольшей степенью 2 (рисунок 3).
5. *Разбиение исходного множества на два.* Так как выбранный нуль стоит на пересечении 2-й строки и 6-го столбца, рассматриваются два варианта:
 - проезд из 2-го пункта в 6-й (2→6);
 - исключение проезда из 2-го пункта в 6-й (2↔6).

Записываются две матрицы W_{11} и W_{12} , соответствующие каждому из двух случаев. Для получения матрицы W_{11} (для случая 2→6) из приведённой матрицы удаляется строка и столбец, на пересечении которых находится нуль с наибольшей степенью. Дополнительно ставится достаточно большое значение в 6-й строке и 2-м столбце, запрещая построение неполного цикла переходов (см. рисунок 3).

Для получения матрицы W_{12} (для случая 2↔6) в приведённой матрице вместо нуля с наибольшей степенью, для запрета перехода, ставится достаточно большое значение.

Далее для каждой из матриц W_{11} , W_{12} определяются числа, которые необходимо вычесть из строк и столбцов, чтобы получить из нее приведённую матрицу (рисунок 3).

W_{11}^*	1	2	3	4	5	6
1	999	4	2	4	0	0
2	2	998	12	7	4	0
3	1	11	998	3	6	1
4	2	0	1	998	1	17
5	4	2	0	0	997	10
6	0	1	4	2	3	996

Рисунок 3 – Вычисление нулевых степеней и две матрицы W_{11} и W_{12} для случаев посещения или непосещения пункта 6 маршрута

6. Уточнение оценок для каждой матрицы. Для получения уточнённой оценки увеличивается предыдущая оценка (C_0) на сумму вычитенных чисел:
- $C_{11} = 22 + 1 = 23$
 - $C_{12} = 22 + 2 = 24$
- Строится 1-е ветвление на дереве решений (рисунок 4)

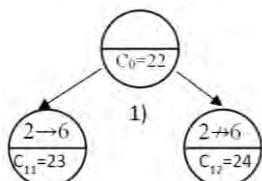


Рисунок 4 – 1-е ветвление на дереве решений

Следует заметить, что оценка множества с запрещением перехода есть сумма предыдущей оценки C_0 и оценки выбранного нуля.

7. Из всех открытых на данный момент ветвей выбирается ветвь с наименьшей оценкой ($C_{11} = 23$) и в дальнейшем рассматривается соответствующая ей матрица (W_{11}).

Далее в ходе решения для выбранной матрицы выполняются действия, аналогичные описанным выше пунктам 3–7 [5], до тех пор, пока порядок матрицы не станет равен двум.

Для выбранной матрицы W_{11} строится приведённая W_{11}^* . В приведённой матрице W_{11}^* вычисляются степени нулей и выбирается нуль с наибольшей степенью, записываются две матрицы W_{21} (для случая $1 \rightarrow 5$) и W_{22} (для случая $1 \nrightarrow 5$) (рисунок 5).

W_{11}^*	1	2	3	4	5
1	999	4	2	4	0
3	0	10	997	2	5
4	2	0	1	998	1
5	4	2	0	0	997
6	0	1000	4	2	3

Рисунок 5 – Приведённая матрица W_{11}^* , вычисление нулевых степеней и две матрицы W_{21} и W_{22} для случаев посещения или непосещения пункта 5 маршрута

Уточняются соответствующие оценки:

- $C_{21} = 23 + 0 = 23$
 - $C_{22} = 23 + 2 + 1 = 26$
- Строится 2-е ветвление на дереве решений (рисунок 6).

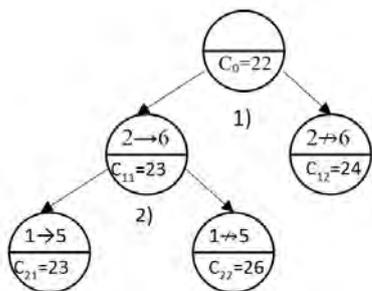


Рисунок 6 – 2-е ветвление на дереве решений

Из всех открытых на данный момент ветвей выбирается ветвь с наименьшей оценкой C_{21} и рассматривается соответствующая ей матрица W_{21} , для неё строится приведённая W_{21}^* , в которой вычисляются степени нулей и выбирается нуль с наибольшей степенью (рисунок 7).

Для нуля с максимальной степенью 3 соответствуют два случая: маршрут из пункта 4 продолжается в пункт 2 ($4 \rightarrow 2$) или маршрут из пункта 4 не продолжается в пункт 2 ($4 \nrightarrow 2$). В построенных соответствующих матрицах W_{31} и W_{32} в первом случае ставится запрет на посещение 4 пункта после 6-го (неполный цикл), а во втором – достаточно большие числа на пересечении 4-го и 2-го пунктов.

W_{21}^*	1	2	3	4
3	0	2	10	997
4	2	0	1	998
5	1000	2	0	0
6	0	2	1000	4

Рисунок 7 – Приведённая матрица W_{21}^* , вычисление нулевых степеней и две матрицы W_{31} и W_{32} для случаев посещения или непосещения пункта 2 маршрута

Уточненные оценки будут равны следующим значениям:

- $C_{31} = 23 + 0 = 23$
- $C_{32} = 23 + 1 + 2 = 26$

Строится 3-е ветвление на дереве решений (рис. 8).

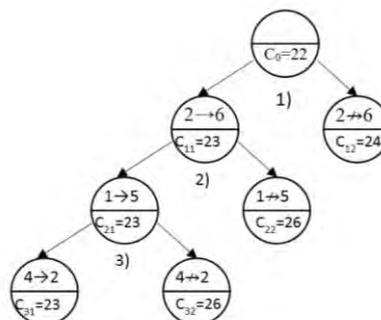


Рисунок 8 – 3-е ветвление на дереве решений

Из всех открытых на данный момент ветвей выбирается ветвь с наименьшей оценкой и соответствующая ей матрица. Для выбранной матрицы W_{31} с наименьшей оценкой $C_{31} = 23$ строится приведённая матрица W_{31}^* , в которой вычисляются степени нулей и выбирается нуль с наибольшей степенью (рисунок 9). В связи с тем, что получившаяся матрица, после удаления соответствующей строки и столбца, на которых располагается нуль с наибольшей оценкой, имеет размерность 2 – дальнейшее построение ветвления на дереве решений не требуется.

При посещении 3-го пункта после 5-го необходимо поставить достаточно большое значение в строке, соответствующей 3-му пункту и столбцу, соответствующему 1-му пункту, запрещая построение неполного цикла переходов. В данном случае остается только два возможных перехода: из пункта 3 в пункт 4 и из пункта 6 в пункт 1.

W_{31}^*	1	3	4
3	0	2	997
5	1000	0	0
6	0	4	1000

Рисунок 9 – Приведённая матрица W_{31}^* , вычисление нулевых степеней, конечная матрица размерности 2 для случая перемещения из пункта 5 в пункт 3

Уточненная оценка составит $C_{41} = 23 + 2 = 25$.

Таким образом, исходя из всего вышесказанного, оптимальный маршрут движения автомобиля, состоящий из шести пунктов посещения и последующего возврата в исходную точку, для данного примера

будет выглядеть следующим образом: 1→5→3→4→2→6→1. Длина пути составит 25 условных единиц.

Реализация автоматизированного поиска оптимального маршрута

Алгоритм Литтла, реализующий метод ветвей и границ, закодирован авторами статьи в среде программирования Visual Basic for Application (VBA) приложения Microsoft Excel (ME) в виде процедуры Algorithm_Littla(), где расстояния между пунктами назначения, которые необходимо посетить, представлены таблицей в виде матрицы.

При разработке указанной выше подпрограммы созданы для использования три ключевые функции: для приведения матрицы расстояний (One(w(), n, ww(), t, s, l)), для определения оценок нулей (Two(w(), n, smax, imax, jmax)) и для удаления строки и столбца при выборе пунктов отправления и прибытия с наименьшей оценкой (Three(w(), n, ww(), ss(), t, smax, imax, jmax)). Для каждой из функций входными аргументами (значениями) являются: w() – матрица расстояний, n – количество пунктов, ww() – 3D-матрица всех матриц расстояний, s – предварительная (нижняя) оценка длины маршрута, l – количество слоев (уровней) 3D-матрицы; ss() – двумерный массив, содержащий размерность по строкам и столбцам каждой матрицы, открытость/закрытость соответствующего ей узла дерева; smax – максимальная оценка нуля; imax – пункт отправления; jmax – пункт прибытия. Указанные выше, в качестве входных аргументов, переменные, сохраняют свои значения после работы соответствующей функции, что позволяет работать с ними в основной подпрограмме.

При разработке процедуры в VBA – Algorithm_Littla() – для хранения всех матриц расстояний каждого узла дерева используется трёхмерный массив. 3D-матрица (D от англ. dimension – «размерность») – трёхмерное множество элементов одного типа, имеющих общее имя. Если представить двухмерные матрицы в виде одной грани куба, то визуально можно показать, что эти 2D-матрицы накладываются одна на одну послойно, таким образом образуя из массив из двумерных массивов (рисунок 10).

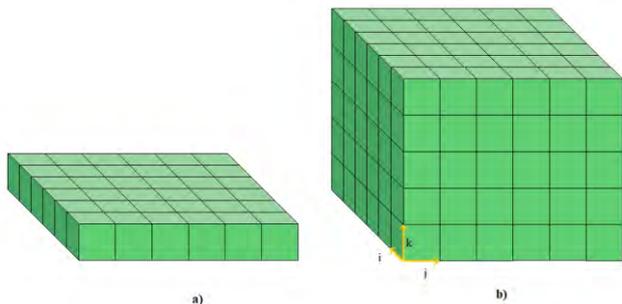


Рисунок 10 – Трёхмерная модель 3D-матрицы первого слоя (k = 0) (a) и 3D-матрица для 6-ти пунктов назначения (b)

Обращение к элементам 3D-матрицы происходит по тройному индексу: в качестве первого значения индекса (k) каждого элемента указывается номер слоя, второго значения индекса (i) – номер строки, третьего значения индекса (j) – номер столбца расположения элемента (рисунок 11).

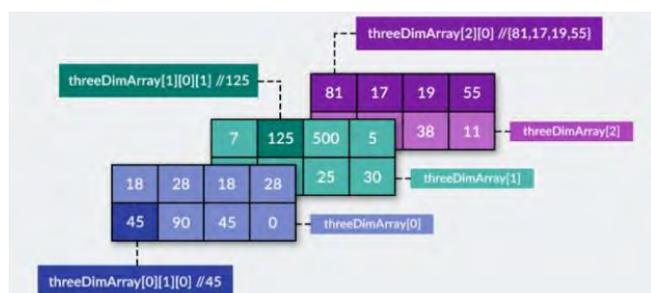


Рисунок 11 – Пример доступа к элементам трехмерного массива [6]

Блок-схема работы функции приращения текущей матрицы расстояний One() представлена на рисунке 12) и содержит следующие основные моменты:

- приращению подлежит матрица, соответствующая открытой в данный момент ветви дерева решений, с наименьшей оценкой;
- выбор слоя 3D-матрицы, содержащего матрицу с наименьшей оценкой, происходит в подпрограмме процедуре Algorithm_Littla() и передается в переменную t;
- значение оценки каждой 2D-матрицы расстояний хранится в соответствующих элементах с нулевыми индексами;
- поиск минимальных элементов производится по порядку расположения строк/столбцов, с соответствующим уменьшением каждой строки/столбца на выбранный минимальный элемент и увеличением оценки s на данный минимальный элемент.

Блок-схема работы функции для выбора нуля с максимальной оценкой в приведенной матрице расстояний Two() представлена на рисунке 13 и содержит следующие рабочие моменты:

- из рассмотрения и оценки исключается нулевой пункт;
- для подсчета промежуточной оценки нуля используется переменная sum;
- для запоминания номера строки и столбца матрицы, содержащих нуль, используются переменные i0 и j0 соответственно;
- при расположении нуля в первом столбце/первой строке – поиск минимального значения осуществляется со второго столбца/второй строки, в противном случае – с первого пункта;
- из поиска минимального значения в строке/столбце, при вычислении степени нулевых элементов, исключается оцениваемый нуль;
- для выбранного пункта отправления и выбранного пункта прибытия в приведенной матрице расстояний задается достаточно большое значение для запрета повторного отправления.

Блок-схема работы функции Three(), выполняющей удаление из матрицы расстояний строки и столбца с выбранными пунктами, представлена на рисунке 14, где следует отметить, что:

- из выбранного слоя 3D-матрицы с наименьшей оценкой значения передаются в текущую матрицу w();
- порядковые номера пунктов могут не совпадать с порядковыми номерами строк/столбцов матрицы, потому для индексирования строк, столбцов матрицы расстояний используются переменные i, j;
- для выбранных пунктов посещения транспортом в матрице расстояний устанавливается достаточно большое значение для устранения возможности повторного посещения;
- при уменьшении размерности текущей матрицы используется временный массив temp(), с количеством строк и столбцов меньшим на одну единицу, по сравнению с исходным, который после работы удаляется из памяти компьютера.

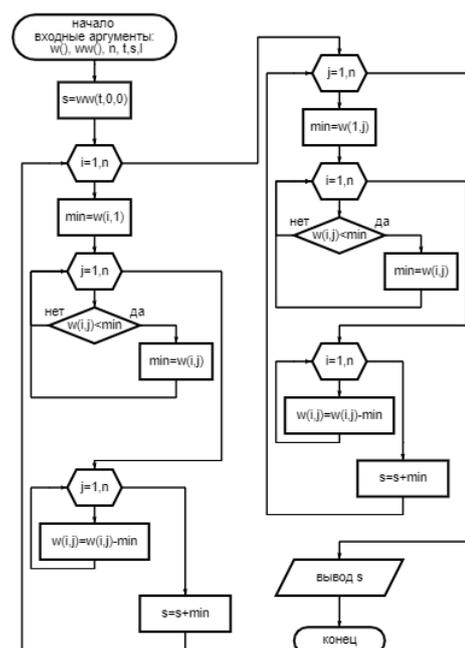


Рисунок 12 – Блок-схема работы функции приращения матрицы

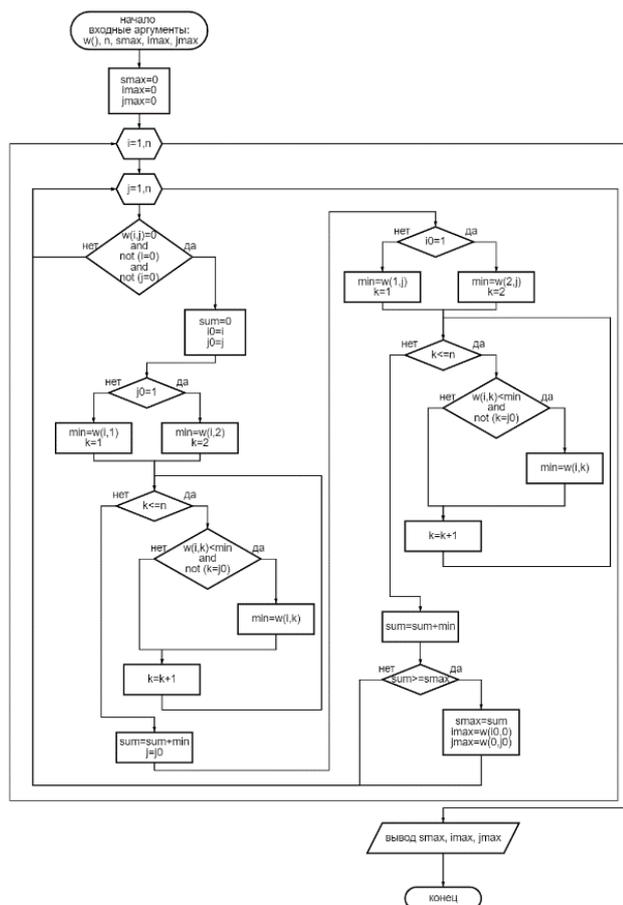


Рисунок 13 – Блок-схема работы функции оценки нулей

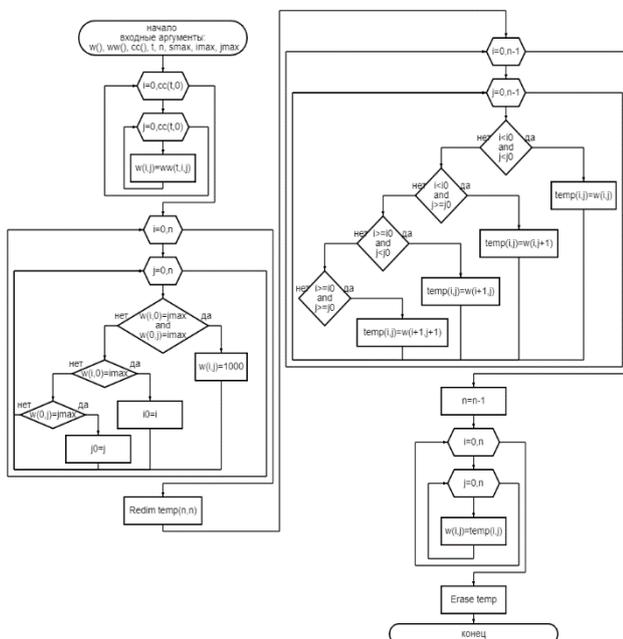


Рисунок 14 – Блок-схема функции для удаления строки и столбца, соответствующих пункту отправления и прибытия в матрице расстояний

Заключение

В наиболее популярных в Беларуси бесплатных картографических порталах, таких как Google Maps, Яндекс.Карты, построение кратчайшего маршрута возможно по двум пунктам и при добавлении

дополнительных пунктов построение кратчайшего маршрута автоматически не осуществляется.

Разработанная в среде программирования VBA приложения ME подпрограмма Algorithm_Little(), реализующая метод ветвей и границ в виде алгоритма Литтла, автоматически строит оптимальный маршрут для более 10-ти пунктов назначения. В настоящее время указанная подпрограмма проходит апробацию автоматизированного поиска кратчайшего маршрута спецавтотранспорта для вывоза твердых коммунальных отходов и вторичных материальных ресурсов на коммунальном предприятии г. Бреста в качестве инструмента повышения эффективности принятия решений организационного управления при решении задач рационального управления транспортными ресурсами.

Список цитированных источников

1. Land, A. H. An automatic method of solving discrete programming problems / A. H. Land, A. G. Doig // *Econometrica*. – No. 28. – 1960. – P. 497–520.
2. Эконометрика и экономико-математические методы и модели : учеб. пособие / Г. О. Читая [и др.] ; под ред. Г. О. Читая, С. Ф. Миксюк. – Минск : БГЭУ, 2018. – 511 с.
3. An algorithm for the traveling salesman problem / J. D. C. Little [et al.] // *Operations Research*. – No. 11 (6). – 1963. – P. 972–989.
4. Яндекс справка [Электронный ресурс] // Яндекс. – Режим доступа: <https://yandex.ru/support/m-maps/index.html>. – Дата доступа: 03.01.2022.
5. Марциновский, С. А. Реализация решения в вычислительных средах задачи составления расписания горячей обработки деталей / С. А. Марциновский, И. В. Тузик, Т. Г. Хомицкая // *Современные проблемы математики и вычислительной техники : сборник материалов IX Республиканской научной конференции молодых ученых и студентов, Брест, 19–21 ноября 2015 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: В. С. Рубанов [и др.]*. – Брест : БрГТУ, 2015. – С. 50–52.
6. JavaRuch: Многомерные массивы [Электронный ресурс] // Java-университет. – Режим доступа: <https://javarush.ru/groups/posts/mnogomernye-massivy#Трёхмерные-массивы>. – Дата доступа: 25.01.2022.

References

1. Land, A. H. An automatic method of solving discrete programming problems / A. H. Land, A. G. Doig // *Econometrica*. – No. 28. – 1960. – P. 497–520.
2. *Ekonometrika i ekonomiko-matematicheskie metody i modeli : ucheb. posobie / G. O. Chitaya [i dr.] ; pod red. G. O. Chitaya, S. F. Miksyuk*. – Minsk : BGEU, 2018. – 511 s.
3. An algorithm for the traveling salesman problem / J. D. C. Little [et al.] // *Operations Research*. – No. 11 (6). – 1963. – P. 972–989.
4. Яндекс справка [Elektronnyj resurs] // Яндекс. – Rezhim dostupa: <https://yandex.ru/support/m-maps/index.html>. – Data dostupa: 03.01.2022.
5. Marcynovskij, S. A. Realizaciya resheniya v vychislitel'nyh sredah zadachi sostavleniya raspisaniya goryachej obrabotki detalej / S. A. Marcynovskij, I. V. Tuzik, T. G. Homickaya // *Sovremennye problemy matematiki i vychislitel'noj tekhniki : sbornik materialov IX Respublikanskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh i studentov, Brest, 19–21 noyabrya 2015 goda / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: V. S. Rubanov [i dr.]*. – Brest : BrGTU, 2015. – S. 50–52.
6. JavaRuch: Mnogomernye massivy [Elektronnyj resurs] // Java-universitet. – Rezhim dostupa: <https://javarush.ru/groups/posts/mnogomernye-massivy#Tryohmernye-massivy>. – Data dostupa: 25.01.2022.

Материал поступил в редакцию 04.05.2022

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ФИНАНСОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК

М. П. Мишкова¹, Э. Э. Ермакова²

¹ К. э. н., старший преподаватель кафедры менеджмента
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: mishkova69@yandex.by

² Магистр экономических наук, старший преподаватель кафедры экономической теории и логистики
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: ermakova.eleonora@gmail.com

Реферат

Развитие понятийного аппарата теории управления цепями поставок предполагает концептуальные подходы к исследованию финансового потенциала цепей поставок и включает формулировку авторского определения «потенциал финансовых потоков цепей поставок» как совокупности реализованных и нереализованных по объективным причинам финансовых возможностей участников данных цепей, отличительная особенность которого состоит в элиминировании субъективных факторов формирования такого потенциала и утверждении возможностей управления ими.

Введение в научный оборот такой авторской трактовки позволяет развить, адаптировать многие теоретические положения к современным условиям финансовой логистики и во многом решить задачу эффективного управления цепями поставок.

Ключевые слова: цепи поставок, потенциал, финансовый потенциал, потенциал финансовых потоков цепей поставок, логистический потенциал, финансовая логистика.

CONCEPTUAL APPROACHES TO THE STUDY OF THE FINANCIAL POTENTIAL OF SUPPLY CHAINS

M. P. Mishkova, E. E. Ermakova

Abstract

The development of the conceptual apparatus of the theory of supply chain management involves conceptual approaches to the study of the financial potential of supply chains and includes the formulation of the author's definition of "the potential of financial flows of supply chains" as a set of realized and unrealized for objective reasons financial capabilities of participants in these chains, the distinctive feature of which is the elimination of subjective factors of the formation of such potential and the assertion of opportunities to manage them. The introduction of such an author's interpretation into scientific circulation makes it possible to develop and adapt many theoretical provisions to the modern conditions of financial logistics and in many ways solve the problem of effective supply chain management.

Keywords: supply chains, potential, financial potential, potential of financial flows of supply chains, logistics potential, financial logistics.

Введение

Эффективности функционирования региональной и национальной экономики способствует инициативное применение логистической концепции управления финансовыми потоками цепей поставок строительного комплекса, концепция содействует формированию структур в рамках различных видов деятельности, является базой для развития отдельных строительных организаций и комплекса в целом. Для оценки возможностей и перспектив развития экономики страны и ее регионов важно исследовать интеграцию организаций в цепях поставок и их управление как способность реализовывать логистические функции с наименьшими затратами. При этом ресурсом, который позволяет цепям поставок проявить свою максимальную финансовую эффективность в достижении цели, является их потенциал финансовых потоков.

Исследование финансового потенциала цепей поставок

Слово «потенциал» происходит от латинского «potentia», что в переводе означает «сила, мощь, возможность, способность, существующая в скрытом виде и способная проявиться при определенных условиях» [1, с. 156]. Потенциал представляет собой совокупную способность внутренней и внешней среды цепей поставок за счет их интеграции обеспечивать оптимальное с точки зрения стоимости, сохранности и скорости продвижение финансового потока до потребителя конечной продукции, товаров, работ и услуг.

Одной из основных задач, стоящих в рамках организации теоретических исследований и решения практических задач в области определения и оценки потенциала финансовых потоков цепей поставок, является формирование его состава. Так как в современной научной литературе отсутствуют исследования категории «потенциал финансовых потоков цепей поставок», не рассматриваются его компоненты, обратимся к определению понятия «логистический потенциал» и его составу, поскольку логистическая концепция цепей поставок предусматривает наличие финансового потока. Отметим,

что в настоящий момент среди отечественных и зарубежных авторов нет единого мнения по данному вопросу.

Так, Э. Веселова в своих работах приводит следующий перечень состава компонентов логистического потенциала [2]: розничная сеть, рынок логистических посредников, транспортная инфраструктура территории, которые участвуют в непосредственном продвижении материального потока и не рассматривают такие потоки, как финансовый, информационный и сервисный.

Н. П. Кузнецова представляет «логистический потенциал как совокупность следующих компонентов [3, с. 75]: пути сообщения, пассажирооборот, грузооборот, наличие современной системы резервирования, транзитные перевозки грузов всеми видами транспорта, наличие сервисных услуг, пользующихся платежеспособным спросом, внедрение современных систем логистики и поставок сырья, материалов, комплектующих». Предложенный перечень не затрагивает финансовую среду.

М. Соколов в работе, не принимая во внимание торговых и финансовых посредников, рассматривает только транспортную, складскую и информационную системы [4].

С. А. Уваров предлагает рассматривать логистический потенциал как «совокупность различных потенциалов: транспортного, складского, транзитного, кадрового, пространственного потенциала» [4]. Такой подход, в отличие от всех остальных, охватывает практически все сферы, оказывающие влияние на эффективное продвижение материального потока, однако в приведенном перечне не хватает информационного и финансового потенциалов.

О. С. Гулягиной логистический потенциал цепи поставок рассматривается «как совокупная способность звеньев цепи поставок и факторов внешней среды цепи за счет их взаимодействия обеспечивать оптимальное с точки зрения стоимости, сохранности и скорости продвижение материального потока и сопутствующих ему потоков от источника сырья до потребителя конечной продукции» [2]. Такая формулировка не учитывает в полном объеме потенциал

финансовых потоков цепей поставок экономического субъекта, но определяет понятие потенциала цепи поставок.

С экономической точки зрения потенциалом отдельной организации или любого субъекта хозяйствования является совокупность различных средств и возможностей, используемых для производства и реализации продукции, работ, услуг, позволяющих формировать прибыль как положительный финансовый результат. Одним из первых в научный оборот понятие «финансовый потенциал» ввел А. П. Гарин, который полагал, что финансовый потенциал представляет собой «часть ресурсов произведенного национального дохода, которая после всех процессов перераспределения воплощается по материально-вещественному составу в приросте средств производства» [5].

В. В. Подкопаев отмечает, что «основой построения цепочки бизнес-процессов в организациях, системы взаимосвязей с участниками рынка и другими рыночными субъектами служит собственный капитал организации. Величина собственного капитала, уровень его использования являются одним из основных составляющих элементов финансового потенциала предприятия» [5].

Подход Ю. С. Валеевой интересен тем, что автор акцентирует внимание не столько на обеспеченности, сколько на размещении средств, что важно в процессе управления финансовым потоком. Автор полагает, что финансовый потенциал организации является комплексным понятием и характеризуется структурными элементами, отражающими наличие и размещение средств, реальные и потенциальные финансовые возможности [5].

Необходимо отметить, что уровень финансового потенциала предприятия не является статической величиной и зависит от множества факторов ее внешней и внутренней финансовой среды, от взаимодействия с различными государственными, кредитными и банковскими организациями. Финансовый потенциал предприятий и организаций при рассмотрении потенциала финансовых потоков цепей поставок выступает как его структурообразующий элемент.

На наш взгляд, существенным отличием финансового потенциала предприятия от потенциала финансовых потоков цепей поставок является то, что в цепи поставок имеет значение добавленная стоимость на каждом этапе создания нового продукта или услуги, а также передачи ее покупателям и заказчикам. Посредством принятия оптимальных управленческих решений на каждом этапе бизнес-процесса созданная добавленная стоимость будет максимальна при условии минимальных затрат применительно к цепям поставок. Важным отличием также является возможность использования различных финансовых инструментов в части осуществления расчетных операций для оптимизации финансового потока в целом по цепи. Общим свойством является то, что показатели финансового потенциала предприятия как структурообразующего элемента цепей имеют значение для каждого ее звена. Скорость движения финансового потока по цепям поставок определена не только выбранным расчетным инструментом, но зависит также и от финансового состояния каждого звена цепи. Так, при выборе инструмента оплаты по условиям договора, как правило, обращают внимание на финансовые возможности, или финансовый потенциал, каждого предприятия в цепи создания добавленной стоимости или цепях поставок [6].

Таким образом, можно сделать вывод, что цепи поставок еще не изучены в контексте их «потенциала финансовых потоков». Кроме того, среди всех существующих подходов преобладает ресурсная концепция финансового потенциала предприятия, которая заключается в определении финансового потенциала как совокупности финансовых ресурсов, которые принимают участие в производственно-хозяйственной деятельности и характеризуются возможностью их привлечения для финансирования как будущей деятельности промышленных предприятия, так и его стратегических направлений развития [8], что является весьма общим и отображает только реально достигнутые финансовые результаты. К тому же финансовые потоки (ресурсы) существуют независимо от субъектов экономической деятельности, в то время как потенциал невозможно отделить от понятия «управление», поскольку сами по себе финансовые потоки (ресурсы) не способны трансформироваться в финансовые результаты.

Учитывая проведенное исследование, основанное на научных разработках в области оценки и управления финансовым потенциалом, предлагаем определить «потенциал финансовых потоков цепей поставок» как совокупности реализованных и нереализованных

по объективным причинам финансовых возможностей участников данных цепей, отличительная особенность которого состоит в элиминировании субъективных факторов формирования такого потенциала и утверждению возможностей управления ими.

Существующие подходы к оценке финансового потенциала организации, которые базируются на оценке ее финансовой устойчивости, прибыли, фондоотдачи, рентабельности капитала и других показателей, не являются совершенными с точки зрения возможности их применения к цепям поставок.

В контексте оценки потенциала финансовых потоков цепей поставок предлагаем понимать под финансовыми возможностями совокупность финансовых средств организации, которые могут быть использованы в системе управления как источники возникновения финансовых потоков для достижения оптимального результата в цепях поставок при наличии определенных условий, способствующих этому.

Таким образом, при оценке возможностей мы учитываем: финансовые средства, которые являются необходимым условием возможностей; условия (факторы), которые позволяют использовать эти возможности исходя из стратегических перспектив; эффективность системы управления, которая позволяет результативно использовать финансовые возможности. Составляющие оценки потенциала финансовых потоков цепей поставок представлены на рисунке 1.

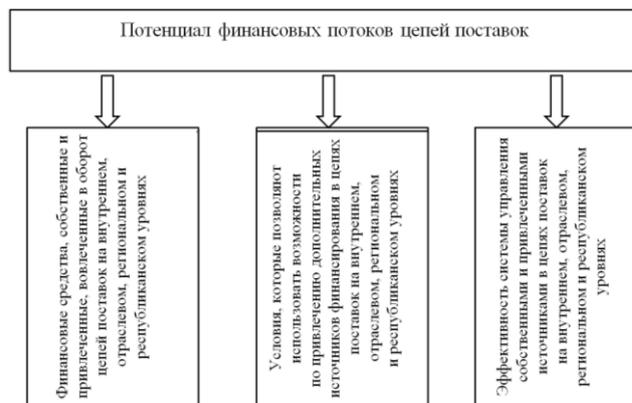


Рисунок 1 – Составляющие оценки потенциала финансовых потоков цепей поставок

Данный потенциал цепей поставок проявляет свою максимальную эффективность в качественном продвижении продукции, работ и услуг до заказчика и конечного потребителя за счет использования внутреннего ресурса цепей поставок. Это, на наш взгляд, определяет не только научный, но и практический интерес к исследованиям, объединяющим понятия «управление цепями поставок и финансовый потенциал» и «цепи поставок», расширяя научное мировоззрение в области управления цепями поставок, усиливая их практическую направленность.

Факторы развития потенциала финансовых потоков цепей поставок определяют его уровень развития, в качестве основных факторов выделены: формирование цепей поставок в рамках отраслей экономики, региональных и республиканских кластеров, оптимизация финансовых потоков в цепях поставок за счет использования внутреннего резерва организаций строительного комплекса с учетом основных финансовых инструментов и различных форм расчетов [7].

В целях оптимизации финансовых потоков Правлением Национального банка Республики Беларусь 29 января 2018 года было принято постановление № 35 «О внесении изменений и дополнений в инструкцию о банковском переводе» [8]. Документом введен новый вид банковского перевода – *прямое дебетование счета*, что позволяет ускорить расчеты при регулярных платежах за строительные работы и услуги, повысить качество предоставляемых банками услуг при осуществлении безналичных расчетов. Такая форма расчетов используется в государствах – участниках Евразийского экономического союза (Россия, Казахстан), а также в Польше, Германии и других странах. Чтобы инициировать платеж при прямом дебетовании счета, платежное требование бенефициара с указанием уникального номера акцепта предъявляется через обслуживающий банк в систему расчетов. Если в системе присутствует аналогичный номер

акцепта плательщика, денежные средства списываются с корреспондентского счета банка плательщика в пользу бенефициара, а плательщик возмещает обслуживающему банку уплаченные денежные средства. Также можно вернуть платеж, совершенный посредством прямого дебетования счета, в течение трех банковских дней со дня его осуществления.

В результате обобщения существующих взглядов ученых были выделены элементы потенциала финансовых потоков цепей поставок. Все организации (звенья цепей поставок) являются компонентами внутренней среды. Во внешней среде поставок основным компонентом финансового потенциала цепей поставок является нормативное правовое регулирование процесса движения финансовых потоков. Еще одним существенным компонентом потенциала финансовых потоков цепей поставок во внешней среде является возможность применения инструментов управления финансовыми потоками с учетом действующего законодательства. Существующие финансовые потоки в контуре логистического цикла (дебиторская, кредиторская задолженности) тесно связаны с материальными потоками. Именно неразрывная связь с материальными потоками является критерием отнесения финансового потока к сфере управления инструментами финансовой логистики. Так как предметом финансовой логистики являются регулирующие финансовые потоки, поступающие из внешней финансовой среды, эффект управления образуется по двум направлениям:

- 1) во-первых, сокращение транзакционных затрат по привлечению финансовых ресурсов (сделки авального, акцептного, вексельного кредитов, взаимодействия фокусной компании цепи поставок с финансовой инфраструктурой в виде банка);
- 2) во-вторых, сокращение логистического цикла (сделки факторинга и форфейтинга); высвобождение оборотных средств (сделки секьюритизации векселями и складскими свидетельствами расчетов между контрагентами цепи поставок).

Наличие интегрированной информационной платформы, открытой для всех участников цепей поставок, наподобие SWIFT (Society for World wide Interbank Financial Telecommunications – международная межбанковская система передачи информации и совершения платежей), в рамках страны или региона позволило бы участникам цепей поставок оптимизировать систему управления финансовыми потоками. Перечисленные компоненты являются основой, которую необходимо совершенствовать для достижения поставленного результата в эффективном продвижении материального потока от производителя к заказчику с использованием резервов оптимизации финансовых потоков путем моделирования системы управления цепями поставок организаций.

Заключение

Концептуальные подходы к исследованию финансового потенциала цепей поставок позволили сформировать авторское определение «потенциал финансовых потоков цепей поставок» как совокупности реализованных и нереализованных по объективным причинам финансовых возможностей участников данных цепей, отличительная особенность которого состоит в элиминировании субъективных факторов формирования такого потенциала и утверждении возможностей управления ими. На основании авторского определения «потенциал финансовых потоков цепей поставок» рассмотрены составляющие его оценки:

- 1) финансовые средства, собственные и привлеченные, вовлеченные в оборот цепей поставок на внутреннем, отраслевом, региональном и республиканском уровнях;
- 2) условия, которые позволяют использовать возможности по привлечению
- 3) дополнительных источников финансирования в цепях поставок на внутреннем, отраслевом, региональном и республиканском уровнях;
- 4) эффективность системы управления собственными и привлеченными источниками в цепях поставок на внутреннем, отраслевом, региональном и республиканском уровнях.

Перечисленные компоненты являются основой, которую необходимо совершенствовать для достижения поставленного результата в эффективном продвижении материального потока от производителя к заказчику с использованием резервов оптимизации финансовых потоков путем моделирования системы управления цепями поставок организаций в рамках региона, комплекса и страны.

Список цитированных источников

1. Лопатников, Л. И. Экономико-математический словарь: слов. соврем. экон. науки: русско-английский / Л. И. Лопатников; под ред. Г. Б. Клейнера. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Дело, 2003. – 519 с.
2. Гулягина, О. С. Логистический потенциал цепей поставок химической продукции в регионе: оценка и развитие: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / О. С. Гулягина. – Минск, 2016. – 262 с.
3. Веселова, Э. Амбиции регионов на транспортно-логистическом рынке [Электронный ресурс] / Э. Веселова // Континент Сибирь Online: бизнес-портал. – Режим доступа: <https://ksonline.ru/stats/-/id/912/>. – Дата доступа: 20.02.2022.
4. Соколов, М. Логистический потенциал Петербурга [Электронный ресурс] / М. Соколов // Viperson. – Режим доступа: <http://viperson.ru/articles/maksim-sokolov-logisticheskiy-potencial-peterburga>. – Дата доступа: 20.02.2022.
5. Уваров, С. А. Управление логистической инфраструктурой: проблемы становления и развития [Электронный ресурс] / С. А. Уваров // Официальный сайт администрации города Южно-Сахалинска. – Режим доступа: https://yuzhno-sakh.ru/files/prodresyrs/logist-doklad__2_yvarov.doc. – Дата доступа: 20.02.2022.
6. Мишкова, М. П. Потенциал финансовых потоков как резерв экономического роста / М. П. Мишкова // Проблемы управления социальным и гуманитарным развитием: материалы XII Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 30 нояб. 2018 г. / Днепр-проптер. регион. ин-т гос. упр. Нац. акад. гос. упр. при Президенте Украины; редкол.: О. Б. Киреева [и др.]. – Днепр, 2018. – С. 184–187.
7. Мишкова, М. П. Управление цепями поставок в строительстве и оценка их надежности на основе финансовой логистики: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / М. П. Мишкова. – Минск, 2021. – 216 с.
8. Мишкова, М. П. Управление цепями поставок в строительстве и оценка их надежности на основе финансовой логистики: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / М. П. Мишкова; Акад. упр. при Президенте РБ. – Минск, 2021. – 25 с.

References

1. Lopatnikov, L. I. Ekonomiko-matematicheskij slovar': slov. sovrem. ekon. nauki: Russko-anglijskij / L. I. Lopatnikov; pod red. G. B. Klejnera. – 5-e izd., pererab. i dop. – M.: Delo, 2003. – 519 s.
2. Gulyagina, O. S. Logisticheskij potencial cepej postavok himicheskoy produkcii v regione: ocenka i razvitie: dis. ... kand. ekon. nauk: 08.00.05 / O. S. Gulyagina. – Minsk, 2016. – 262 s.
3. Veselova, E. Ambicii regionov na transportno-logisticheskom rynke [Elektronnyj resurs] / E. Veselova // Kontinent Sibir' Online: biznes-portal. – Rezhim dostupa: <https://ksonline.ru/stats/-/id/912/>. – Data dostupa: 20.02.2022.
4. Sokolov, M. Logisticheskij potencial Peterburga [Elektronnyj resurs] / M. Sokolov // Viperson. – Rezhim dostupa: <http://viperson.ru/articles/maksim-sokolov-logisticheskiy-potencial-peterburga>. – Data dostupa: 20.02.2022.
5. Uvarov, S. A. Upravlenie logisticheskoy infrastrukturoj: problemy stanovleniya i razvitiya [Elektronnyj resurs] / S. A. Uvarov // Oficial'nyj sayt administracii goroda YUzhno-Sahalinska. – Rezhim dostupa: https://yuzhno-sakh.ru/files/prodresyrs/logist/doklad__2_yvarov.doc. – Data dostupa: 20.02.2022.
6. Mishkova, M. P. Potencial finansovyh potokov kak rezerv ekonomicheskogo rosta / M. P. Mishkova // Problemy upravleniya social'nym i humanitarnym razvitiem: materialy XII Region. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, 30 noyab. 2018 g. / Dnepropetr. region. in-t gos. upr. Nac. akad. gos. upr. pri Prezidente Ukrainy; redkol.: O. B. Kireeva [i dr.]. – Dnepr, 2018. – S. 184–187.
7. Mishkova, M. P. Upravlenie cepyami postavok v stroitel'stve i ocenka ih nadezhnosti na osnove finansovoj logistiki: dis. ... kand. ekon. nauk: 08.00.05 / M. P. Mishkova. – Minsk, 2021. – 216 s.
8. Mishkova, M. P. Upravlenie cepyami postavok v stroitel'stve i ocenka ih nadezhnosti na osnove finansovoj logistiki: avtoref. dis. ... kand. ekon. nauk: 08.00.05 / M. P. Mishkova; Akad. upr. pri Prezidente RB. – Minsk, 2021. – 25 s.

Материал поступил в редакцию 01.04.2022

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

С. Г. Прусов¹, Т. Г. Зорина²

¹ К. э. н., ведущий научный сотрудник сектора «Экономика энергетики»
Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: prusovstas@mail.ru
² Д. э. н., доцент, заведующий сектором «Экономика энергетики»
Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: tanyazorina@tut.by

Реферат

ЦЕЛЬ

Рассмотреть существующую методологию оценки цифровой трансформации энергетики Беларуси. Предложить трансформированные подходы к оценке цифровой трансформации и учету эффективности мероприятий по её реализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В статье приводится оценка целесообразности использования существующих подходов к анализу эффективности цифровой трансформации белорусской энергосистемы с существующими и прогнозными нормативными их значениями. Предложен авторский подход к проведению данной оценки в условиях трансформации объединенной энергосистемы Беларуси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход позволит комплексно учесть как технические, так и экономические факторы реализации мероприятий по цифровой трансформации в электроэнергетике с возможностью последующего ранжирования проектов по эффективности их реализации.

Ключевые слова: цифровая трансформация, эффективность мероприятий, объединенная энергосистема Беларуси.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO IMPROVING THE EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE DIGITAL TRANSFORMATION OF THE ENERGY INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

S. G. Prusov, T. G. Zorina

Abstract

THE PORPOUSE

To consider the existing methodology for assessing the digital transformation of the Belarusian energy sector. To propose transformed approaches to assessing digital transformation and taking into account the effectiveness of measures for its implementation.

RESULTS

The article provides an assessment of the feasibility of using existing approaches to analyzing the effectiveness of the digital transformation of the Belarusian energy system with their existing and projected normative values. The author's approach to carrying out this assessment in the context of the transformation of the unified energy system of Belarus is proposed.

CONCLUSION

The proposed approach will allow us to comprehensively take into account both technical and economic factors of the implementation of digital transformation measures, with the possibility of subsequent ranking of projects according to the effectiveness of their implementation.

Keywords: digital transformation, efficiency of measures, united energy system of Belarus.

Введение

С 2006 г. в энергетической отрасли Республики Беларусь проводились отдельные мероприятия, связанные с цифровой трансформацией. Однако они на протяжении длительного времени носили несистемный характер и реализовывались как отдельные программы с узкоспециализированным направлением.

Примером таких мероприятий, осуществляемых в объединенной энергосистеме Беларуси, является реализация «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года», в рамках которой осуществляется замена индукционных приборов учета электрической энергии на электронные для возможности последующего их объединения в систему АСКУЭ.

В остальных случаях речь главным образом идет об отдельных мероприятиях, среди которых можно назвать автоматизацию бизнес-процессов на платформах 1С Предприятие и SAP, построение элементов системы управления электрическими сетями Smart Grid, построение системы автоматического регулирования частоты и перетоков мощности ОЭС Беларуси, построение системы АСКУЭ и многие другие.

Ещё одним направлением деятельности в рамках цифровой трансформации Беларуси является работа над Концепцией цифровой трансформации отраслей топливно-энергетического комплекса государств – участников СНГ и Планом первоочередных мероприятий по ее реализации. Эти проекты направлены на систематизацию

имеющегося опыта использования цифровых технологий на национальных уровнях, формирование единого целевого видения цифровизации отраслей ТЭК, базовых требований и критериев к внедряемым решениям, чтобы они впоследствии могли стыковаться в единой информационной среде.

В части трансформации отдельных секторов ТЭК – электроэнергетики, нефтегазового комплекса, угольной и атомной промышленности – планируются разработка и корректировка нормативной правовой и нормативно-технической базы, отбор и реализация пилотных проектов по внедрению цифровых и отраслевых платформенных решений. При этом для каждого направления предусматриваются свои мероприятия, которые будут учитывать их специфику.

2021 год для процессов цифровой трансформации энергетики стал знаковым в части появления документа, который закрепил методологические основы оценки цифровой трансформации в электроэнергетике Беларуси. Этим документом стал приказ ГПО «Белэнерго» от 9.04.2021 г. № 752, которым утверждена «Стратегия информатизации и цифровой трансформации государственного объединения электроэнергетики «Белэнерго» на период 2021–2025 гг.». Согласно данному документу оценки эффективности предлагается производить на основе 16 показателей в разрезе 6 энергосистем (РУП-облэнерго) и в целом по ГПО «Белэнерго» по состоянию на 01.01.2020 г. и по итогам её реализации.

Предложенными показателями для оценки эффективности цифровой трансформации являются:

1. Доля цифровых подстанций 35 кВ и выше.
2. Степень автоматизации распределительных электрических сетей 0,4–10 кВ.
3. Доля объектов энергетической отрасли, интегрированных в автоматизированную систему контроля и учета электрической энергии межгосударственных межсистемных перетоков и генерации.
4. Доля объектов энергетической отрасли, интегрированных в региональную автоматизированную систему контроля и учета электрической энергии.
5. Доля промышленных и приравненных к ним потребителей с присоединенной мощностью 250 кВт·А и выше, интегрированных в автоматизированную систему контроля и учета электрической энергии.
6. Доля бытовых потребителей, интегрированных в автоматизированную систему контроля и учета электрической энергии.
7. Доля энергоисточников, оснащенных автоматизированной системой управления технологическими процессами.
8. Доля объектов энергетической отрасли, оснащенных автоматизированной системой контроля качества электроэнергии.
9. Степень автоматизации контроля сотрудников.
10. Степени автоматизации документооборота.
11. Доля взаимодействий с иностранными (международными) компаниями, реализованных путем электронного документооборота.
12. Степень автоматизации принятия решений.
13. Доля закупок, проведенных на электронных торговых площадках.
14. Индикатор наличия системы, позволяющей оценивать качество продукции, качество обслуживания в режиме онлайн.
15. Степень информатизации взаимодействующих организаций.
16. Индикатор наличия доступа у сотрудников к информационным ресурсам локальной и глобальной сети.

Предложенный в Стратегии информатизации и цифровой трансформации государственного объединения электроэнергетики «Белэнерго» на период 2021–2025 гг. методический подход, построенный на основе индикативных показателей, нуждается в совершенствовании. Следует изменить методики расчета отдельных индикаторов, поскольку:

- 1) в существующей трактовке в результате реализации предложенных мероприятий (приложение 1 к Стратегии) происходит их ухудшение;
- 2) необходимо установить их нормативные значения, а не сравнивать сугубо с фактом;
- 3) сформировать единый агрегированный (интегральный) индекс степени информационной трансформации белорусской энергетической системы для возможности оценки качественного и количественного роста показателей уровней автоматизации, информатизации и цифровизации в энергетике, а также проведения междоустановочного сравнения.

Совершенствование методологии оценки цифровой трансформации электроэнергетики Беларуси

Решение последней задачи на сегодняшний день проблематично, следовательно, целесообразно оценивать степень цифровизации на основе следующего подхода:

- 1) необходимо регламентировать общие методические принципы такой оценки объединенной энергосистемы Беларуси, включающие: разработку стратегических задач цифровой трансформации, подходов к оценке затрат и результатов ее эффективности, подходов к оценке межотраслевых эффектов (синергетических и эффектов экстерналии «канибализма» одних проектов за счет реализации других), подходов к оценке иных эффектов (социальных, экологических и прочих);
- 2) важно определить состав индикаторов;
- 3) необходимо разработать алгоритм ранжирования проектов (мероприятий) для включения в дорожные карты, предусматривающий с одной стороны достижение целевого индикатора Стратегии реализации и решения, и с другой – получение заданного эффекта (экономического, социального, экологического и иного, описанного в разделе характеристика результатов).

В качестве экономического эффекта с учетом различного срока действия проектов предлагается использование показателя величины сравнительного эквивалентного годового дохода (СЕАА) всей программы [1, 2].

В качестве стратегических задач по цифровой трансформации ОЭС Беларуси, по мнению авторов [3, 4], могут выступать следующие задачи:

- 1) обеспечение бесперебойности поставок электроэнергии потребителям;
- 2) снижение уровня аварийности на объектах электроэнергетики;
- 3) снижение производственного травматизма и смертности в электроэнергетике;
- 4) повышение качества поставляемых потребителю электроэнергии и тепла;
- 5) сокращение уровня вредных выбросов при производстве электроэнергии и тепла;
- 6) повышение экономической эффективности производственных процессов в электроэнергетике;
- 7) сдерживание роста ценовой нагрузки на потребителя;
- 8) эффективное импортозамещение, программного обеспечения, оборудования и услуг, связанных с цифровыми технологиями в электроэнергетике;
- 9) повышение эффективности конечного использования электроэнергии;
- 10) повышение конкурентоспособности белорусских цифровых технологий в сфере электроэнергетики;
- 11) создание и развитие научных школ и образовательных центров для подготовки специалистов по работе с цифровыми технологиями.

Для оценки результатов решения каждой из перечисленных задач цифровой трансформации целесообразно ввести один или несколько количественно оцениваемых индикаторов. В зависимости от решаемой стратегической задачи, для оценки ее результатов могут применяться: производственные и экономические индикаторы, оба вида индикаторов.

Также необходимо провести оценку предлагаемых индикаторов на предмет их возможности (реалистичности) расчета на основании существующих статистических данных, либо необходимости разработки дополнительных форм отчетности, а также степени воздействия цифровой трансформации непосредственно на достижение показателя вне зависимости от других влияющих факторов (таблица 1).

Таблица 1 – Шкалы оценки индикаторов цифровой трансформации

Реалистичность расчета значения индикатора на основании статистических данных (критерий Φ)	Шкала	Объективность интерпретации результатов цифровой трансформации (критерий σ)	Шкала
нереально оценить индикатор из-за сложности сбора первичной информации и (или) сложности моделирования	0	индикатор в большей степени учитывает влияние не цифровых технологий, а других факторов	0,33
при условии формирования новых статистических форм отчетности (государственных, ведомственных)	0,33	индикатор преимущественно отражает влияние цифровых технологий, но частично зависит и от других факторов	0,66
есть возможность оценки индикатора в рамках существующих, но не раскрываемых публично форм отчетности (государственных, ведомственных)	0,66	индикатор зависит исключительно от цифровых технологий	1
есть возможность оценки индикатора в рамках публично раскрываемой информации	1		

Значения шкал установлено авторами с использованием подходов, изложенных в источнике [5].

Предлагаемая методология оценки цифровой трансформации изложена в таблице 2.

Таблица 2 – Методология оценки цифровой трансформации белорусской энергетической системы с использованием предлагаемого подхода на основе первых 8 стратегических задач цифровой трансформации

Стратегическая задача цифровой трансформации	Индикатор	Алгоритм расчета	Корректировка индикатора		Примечание	Критерий экономической эффективности реализации задачи
			критерий φ	критерий σ		
1. Обеспечение бесперебойности поставок электроэнергии потребителям	Средняя частота отключений электроснабжения (SAIFI), в т. ч. вызванные киберпреступлениями	Рассчитывается в процентах к базовому году ¹ как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» филиалам сетевых филиалов к среднему значению в целом по электросетевому хозяйству	0,66	0,66	В настоящее время мониторинг ведется в рамках ведомственной отчетности РУП-облэнерго. В перспективе необходимо закрепление в формах статистической отчетности для всех организаций	$CEAA_i^2 = \begin{cases} >0 \\ \rightarrow \max \end{cases}$ где <i>i</i> – порядковый номер стратегической задачи (от 1 до 8)
	Средняя продолжительность отключений электроснабжения (SAIDI), в т. ч. вызванные киберпреступлениями		0,66	0,66		
	Средняя продолжительность отключения одного потребителя (CAIDI), в т. ч. вызванные киберпреступлениями		0,66	0,66		
	Предельный экономический ущерб от нарушения электроснабжения, в т. ч. вызванные киберпреступлениями	Требуется специальных технико-экономических расчетов по среднему значению по «цифровизированным» филиалам сетевых филиалов к среднему значению в целом по электросетевому хозяйству	0	0,66	Данный индикатор напрямую связан с индикатором SAIDI	
2. Снижение уровня аварийности на объектах электроэнергетики	Среднее число аварий в расчете на единицу установленной мощности генерирующих объектов	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» генерирующим объектам к среднему значению в целом по генерации	0,66	0,66	Мониторинг вышеуказанных показателей должен осуществляться в отношении объектов ³ до 3 или 6 МВт установленной мощности. Менее 3 или 6 МВт не производится	$CEAA_i = \begin{cases} >0 \\ \rightarrow \max \end{cases}$
	Средняя длительность аварийного простоя единицы установленной мощности генерирующих объектов		0,66	0,66		
	Среднее число аварий в системах централизованного теплоснабжения (СЦТС)	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» СЦТС к среднему значению в целом по статистически, наблюдаемым СЦТС	0,33	0,66	Статистика отсутствует, целесообразно разработать статистическую отчетность для городов с населением более 10 000 чел.	
	Средняя длительность устранения аварий в СЦТС		0,33	0,66		
	Среднее число аварий в расчете на условную единицу электросетевого оборудования	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» объектам электросетевого хозяйства к среднему значению в целом по электросетевому хозяйству	0,66	0,66	Мониторинг вышеуказанных показателей осуществляется в отношении объектов системообразующих сетей напряжением 220–750 кВ и распределительных сетей 110 кВ. Для объектов распределительных сетей 0,4–10 и 35 кВ мониторинг не производится, решается в рамках реализации стратегической задачи № 1	
Средняя длительность аварийного простоя условной единицы электросетевого оборудования	0,66		0,66			

Примечания

¹ В качестве базового года во всех расчетах индикаторов предлагается использовать 2020 г.

² Данный критерий учитывает степень влияния индикатора на достижение производственной цели реализации стратегической задачи цифровой трансформации (подробно методология расчета указанного показателя изложена в источниках [1, 2]).

³ Критерий в 6 МВт установлен с учетом отнесения объектов как было указано ранее к объектам, относимым к «малой энергетике» в соответствии с ранее действовавшим постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24.04.1997 г. № 400 «О развитии малой и нетрадиционной энергетики». В настоящее время отменено. С учетом мониторинга существующих генерирующих источников организаций ГПО «Белэнерго», по мнению авторов, данный критерий целесообразно снизить до 3 МВт установленной электрической мощности.

Продолжение таблицы 2

Стратегическая задача цифровой трансформации	Индикатор	Алгоритм расчета	Корректировка индикатора		Примечание	Критерий экономической эффективности реализации задачи
			критерий Φ	критерий σ		
3. Снижение производственного травматизма и смертности в электроэнергетике	Среднее число работников, пострадавших в результате несчастных случаев на производстве	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» генерирующим объектам к среднему значению в целом по генерации. Рассчитывается на единицу установленной мощности	0,66	0,66	Для расчета показателя используется данные статистической отчетности 1-т (травматизм), утвержденной постановлением национального комитета статистического комитета Республики Беларусь от 13.06.2016 г. № 64. Альтернативным вариантом является расчет показателя LTIFR (lost time injury frequency rate). Данный показатель измеряется на 1 млн. отработанных человеко-часов. По мнению, специалистов РАН РФ преимущество данного показателя является одновременное влияние 2-х факторов: 1. Снижение нормативной численности в результате внедрения цифровой трансформации. 2. Повышение безопасности самих объектов ремонта, диагностики, модернизации и т. п.	Не рассчитывается, учитывается в доле лимита на финансирование программы по цифровой трансформации
		Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» объектам сетевого хозяйства к среднему значению в целом по электросетевому хозяйству. Рассчитывается на условную единицу электросетевого оборудования	0,66	0,66		
	Среднее число работников, пострадавших в результате несчастных случаев на производстве	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» объектам к среднему значению в целом по генерации. Рассчитывается на единицу установленной мощности	0,66	0,66		
	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» объектам сетевого хозяйства к среднему значению в целом по электросетевому хозяйству. Рассчитывается на условную единицу электросетевого оборудования	0,66	0,66			
4. Повышение качества поставляемых потребителю электроэнергии и тепла	Время работы БЭС нормативной частотой тока ($50 \pm 0,05$) Гц, минут за календарный год	Рассчитывается в процентах к базовому году	1	0,33	Отслеживается оперативно-диспетчерским управлением ГПО «Белэнерго»	Не рассчитывается, учитывается в доле лимита на финансирование программы по цифровой трансформации
	Количество случаев недопустимого отклонения температуры/давления в СЦТС	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» СЦТС к среднему значению в целом по статистически, наблюдаемым СЦТС	0,33	0,66	Статистика отсутствует, целесообразно разработать статистическую отчетность для городов и городских поселков с населением более 10 000 чел., а также разработать величину научно-обоснованного отклонения от заданных параметров	
5. Сокращение уровня вредных выбросов при производстве электроэнергии и тепла	Удельная величина выбросов (по группам загрязняющих веществ) на единицу отпущенной электроэнергии	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение значения данного показателя на «цифровизированных» генерирующих объектах ТЭЦ и КЭС к значению в целом по генерирующим объектам ТЭЦ и КЭС	0,66	0,66	В рамках РУП-облэнерго данную величину возможно определить на основании ведомственной отчетности и статистической отчетности 1-воздух (Минприроды), утвержденной постановлением Национального статистического комитета Республики Беларусь от 10.12.2019 г. № 122	$CEAA_i = \begin{cases} >0 \\ \rightarrow \max \end{cases}$
	Удельная величина экологических платежей (включая плату за углерод – при ее введении), приходящаяся на единицу отпущенной электроэнергии	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение значения данного показателя по «цифровизированным» котельным к значению в целом по статистическим охваченным мониторингом котельным	0,33	0,66		
	Удельная величина выбросов (по группам загрязняющих веществ) на единицу отпущенного тепла	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение значения данного показателя по «цифровизированным» котельным к значению в целом по статистическим охваченным мониторингом котельным	0,33	0,66		
	Удельная величина экологических платежей (включая плату за углерод – при ее введении), приходящаяся на единицу отпущенной тепловой энергии	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение значения данного показателя по «цифровизированным» котельным к значению в целом по статистическим охваченным мониторингом котельным	0,33	0,66		

Окончание таблицы 2

Стратегическая задача цифровой трансформации	Индикатор	Алгоритм расчета	Корректировка индикатора		Примечание	Критерий экономической эффективности реализации задачи
			критерий ϕ	критерий σ		
6. Повышение экономической эффективности производственных процессов в электроэнергетике	Удельный расход топлива на единицу отпущенной электроэнергии ТЭЦ и КЭС	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» генерирующим объектам к среднему значению в целом по генерации	0,66	0,66	Рассчитывается на основании данных ведомственной отчетности организаций ГПО «Белэнерго» и организаций ЖКХ. Значение индикатора должно стремиться к 0.	$CEAA_i = \begin{cases} >0 \\ \rightarrow \max \end{cases}$
	Удельный расход топлива на единицу отпущенной тепловой энергии	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение значения данного показателя по «цифровизированным» котельным к значению в целом по статистическим охваченным мониторингом котельным	0,66	0,66		
	Удельная величина потерь электроэнергии в электрических сетях, в процентах от объемов электроэнергии, поступивших в сеть	Рассчитывается в процентах к базовому году как отношение среднего значения данного показателя по «цифровизированным» объектам сетевого хозяйства к среднему значению в целом по электросетевому хозяйству	0,66	0,66		
7. Сдерживание роста ценовой нагрузки на потребителя	$I_{цен}$	Соотношение темпов изменения среднегодовых удельных топливных затрат генерирующих объектов ТЭЦ, КЭС и котельных к темпам изменения среднеотпускного тарифа на электроэнергию и тепловую энергию по субъектам хозяйствования	0,66	0,66	Учитывая, что в структуре затрат БЭС затраты на топливо на технологические цели составляют до 80 %. Рассчитывается в целом по БЭС	Показатель должен стремиться к 1
8. Эффективное импортозамещение, программного обеспечения и услуг, связанных с цифровыми технологиями в электроэнергетике, а также оборудования	$V_{ицт}$	Доля импорта в суммарном объеме закупок предприятиями электроэнергетики следующих видов технологического оборудования: – САУ и АСУ ТП, – систем РЗА, – средств связи	1	1	Отсутствует. Необходимо введение показателя в ведомственную отчетность	$CEAA_i = \begin{cases} >0 \\ \rightarrow \max \end{cases}$
9. Повышение эффективности конечного использования электроэнергии	Электроемкость ВВП	Рассчитывается в процентах к базовому году	1	Оценивается экспертно	Рассчитывается в целом по Республике Беларусь	Интегральный эффект всех предыдущих показателей, при условии $\sum_{i=1}^8 CEAA_i = \begin{cases} \geq 0 \\ \rightarrow \max \end{cases}$
10. Повышение конкурентоспособности белорусских цифровых технологий в сфере электроэнергетики	Удельный вес экспорта ИТ услуг в сфере электроэнергетики к общему объему экспорта услуг	Рассчитывается в процентах к базовому году	1	1	Требуется введение статистической отчетности	Не рассчитывается, показатель оценивается межстрановым сопоставлением
11. Создание и развитие научных школ и образовательных центров для подготовки специалистов по работе с цифровыми технологиями	Удельный вес специалистов, получивших образование (прошедших переподготовку) по специальностям ИТ-профиля в среднем на 1000 жителей	Рассчитывается в процентах к базовому году	1	1	Требуется введение статистической отчетности	Не рассчитывается, показатель оценивается межстрановым сопоставлением

Примечание – величина $CEAA_i = \sum_{j=1}^n CEAA_{ij}$,

где j – номер мероприятия (проекта) из совокупности набора проектов n , причем обязательным условием является выполнение условия $j \leq n$.

Заключение

Реализация предложенного алгоритма оценки степени цифровой трансформации электроэнергетики Беларуси позволит более комплексно подойти к формализованной (количественно измеряемой) оценке цифровизации с различных её аспектов:

- технологическим;
- экономическим;
- социальным;
- экологическим и т. п.

Также реализация мероприятий, представленных в Стратегии, с учетом трансформации методического подхода к отбору мероприятий с позиции анализа их эффективности на основе единого агрегированного показателя, повысит эффективность функционирования ГПО «Белэнерго», качество оказания энергетических услуг, удовлетворенность потребителей и будет способствовать устойчивому энергетическому развитию Республики Беларусь.

Не менее важной для исследования темой служит анализ экономических последствий цифровой трансформации, связанной как с киберпреступлениями, так и с системой управления состоянием энергетического оборудования. Подтверждением актуальности данной темы служат исследования [7, 8].

Список цитированных источников

1. Прусов, С. Г. Оценка эффективности инвестиционных проектов в электроэнергетике : монография / С. Г. Прусов. – Минск : Мисанта, 2016. – 228 с.
2. Прусов, С. Г. Разработка бизнес-плана инвестиционного проекта с учетом анализа рисков / С. Г. Прусов. – Минск : Бестпринт, 2018. – 183 с.
3. Зорина, Т. Г. Формирование стратегии устойчивого энергетического развития : монография / Т. Г. Зорина. – Минск : Мисанта, 2016. – 332 с.
4. Камоцкая, Н. И. Энергетическая безопасность Республики Беларусь в условиях международной интеграции / Н. И. Камоцкая ; под науч. ред. С. С. Полонник ; Белорусский национальный технический университет. – Минск : Право и экономика, 2019. – 180 с.
5. Измерение и оценка результатов и эффектов цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://in.minenergo.gov.ru/upload/iblock/29a/29a0484ea0e4bd272252a486a80f2c32.pdf>. – Дата доступа: 15.04.2021.
6. Cybercrimes in the economic sphere / J. Armin [et al.] [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: (PDF) 2020 Cybercrime Economic Costs: No Measure No Solution (researchgate.net) – Data of access: 17.06.2021.
7. Combating cybercrime: economic and legal aspects / A. V. Sviatun [et al.]. [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/351740010_Combating_Cybercrime_Economic_and_Legal_Aspects – Data of access: 17.06.2021.

References

1. Prusov, S. G. Ocenka effektivnosti investicionnyh projektov v elektroenergetike : monografiya / S. G. Prusov. – Minsk : Misanta, 2016. – 228 s.
2. Prusov, S. G. Razrabotka biznes-plana investicionnogo proekta s uchetom analiza riskov / S. G. Prusov. – Minsk : Bestprint, 2018. – 183 s.
3. Zorina, T. G. Formirovanie strategii ustojchivogo energeticheskogo razvitiya : mo-nografiya / T. G. Zorina. – Minsk : Misanta, 2016. – 332 s.
4. Kamockaya, N. I. Energeticheskaya bezopasnost' Respubliki Belarus' v usloviyah mezhdunarodnoj integracii / N. I. Kamockaya ; pod nauch. red. S. S. Polonnik ; Belorus-skij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2019. – 180 s.
5. Izmerenie i ocenka rezul'tatov i effektov cifrovoj transformacii toplivno-energeticheskogo kompleksa [Elektronnyj resurs]. – 2019. – Rezhim dostupa: <https://in.minenergo.gov.ru/upload/iblock/29a/29a0484ea0e4bd272252a486a80f2c32.pdf>. – Data dostupa: 15.04.2021.
6. Cybercrimes in the economic sphere / J. Armin [et al.] [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: (PDF) 2020 Cybercrime Economic Costs: No Measure No Solution (re-searchgate.net) – Data of access: 17.06.2021.
7. Combating cybercrime: economic and legal aspects / A. V. Sviatun [et al.]. [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/351740010_Combating_Cybercrime_Economic_and_Legal_Aspects – Data of access: 17.06.2021.

Материал поступил в редакцию 17.03.2022

АКТУАЛИЗАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ СТАНДАРТОВ В СФЕРЕ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫМ ТРАНСПОРТОМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

К. В. Синютич

*Магистр технических наук, аспирант кафедры экономики и логистики
Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail : kirylasiniutsich@gmail.com*

Реферат

В статье рассмотрены существующие минимальные социальные стандарты и другие действующие нормативно-правовые акты, определяющие параметры транспортного обслуживания населения Республики Беларусь. Проанализирована возможность выполнимости указанных стандартов на территории страны. В результате проведенного исследования предложены рекомендации по совершенствованию системы минимальных социальных стандартов в сфере общественного транспорта. Практическая значимость работы заключается в возможности совершенствования областными и Минским городским исполнительными комитетами совместно с операторами регулярных пассажирских перевозок существующих стандартов транспортного обслуживания населения.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, общественный транспорт, социальные стандарты, нормативы, обслуживание населения.

UPDATING EXISTING STANDARDS IN THE SPHERE OF TRANSPORT SERVICE OF THE POPULATION BY PUBLIC TRANSPORT OF THE REPUBLIC OF BELARUS

K. V. Siniutsich

Abstract

The article considers the existing minimum social standards and other existing legal acts that determine the parameters of transport services for the population of the Republic of Belarus. The possibility of feasibility of these standards on the territory of the country is analyzed. As a result of the study, recommendations for improving the system of minimum social standards in the field of public transport are proposed. The practical significance of the work lies in the possibility of improving the existing standards of transport services for the population by the regional and Minsk city executive committees, together with operators of regular passenger transportation.

Keywords: passenger traffic, public transport, social standards, regulations, public services.

Введение

Эффективно работающая система общественного транспорта является важным элементом обеспечения мобильности жителей населенных пунктов и предназначена для обеспечения одновременного перемещения большого числа жителей к удаленным от мест проживания рабочим местам, рекреационным зонам, объектам торговли и услуг.

Управление системой перевозок пассажиров общественным транспортом в регулярном сообщении невозможно без определения правил, нормативов, минимального набора параметров, стандартов функционирования системы, сравнивая с которыми, можно сделать вывод о корректности работы общественного транспорта.

В Республике Беларусь параметры и аспекты функционирования организаций общественного транспорта и взаимоотношения между участниками процесса перевозок регламентированы такими нормативными правовыми актами, как законы, кодексы, постановления Совета министров, государственными стандартами (СТБ, ГОСТ), решениями местных исполнительных комитетов.

В данном исследовании акцент сделан на анализе действующих в Беларуси стандартов, затрагивающих сферу общественного транспорта, принятых Советом Министров Республики Беларусь и Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь.

Цель исследования – оценить актуальность действующих стандартов и выработать рекомендации по совершенствованию стандартов транспортного обслуживания населения системой общественного транспорта.

Существующие стандарты в сфере общественного транспорта и предложения по их совершенствованию

Минимальные социальные стандарты в сфере обслуживания населения общественным транспортом представлены в постановлении Совета Министров Республики Беларусь от 30 мая 2003 г. № 724 «О мерах по внедрению системы государственных социальных стандартов по обслуживанию населения республики» [1]. Данным документом в области транспорта определены параметры обслуживания, приведенные в таблице 1.

В соответствии с указанным документом облисполкомы и Минский горисполком установили перечни социальных стандартов по обслуживанию населения для административно-территориальных единиц (области, районы и города областного подчинения) с учетом их специфики и развития инфраструктуры.

Минским горисполкомом определен всего один стандарт в области транспорта, т. е. норматив обслуживания населения в рамках городских перевозок [3]:

один автобус (троллейбус, трамвай, вагон электропоезда метрополитена), работающий на линии, на 1,5 тыс. населения в будние дни;

один автобус (троллейбус, трамвай, вагон электропоезда метрополитена), работающий на линии, на 2 тыс. населения в выходные и праздничные дни.

Решениями Брестского [4], Витебского [5], Гомельского [6], Гродненского [7], Минского [8], Могилевского [9] областных комитетов социальные стандарты в области транспорта закреплены в формулировках, совпадающих с приведенными в таблице 1.

В указанных стандартах зафиксированы показатели по минимальному количеству рейсов в населенные пункты в зависимости от численности населения, при этом временной период, дни недели выполнения рейсов в стандарте не конкретизированы.

Транспортное обслуживание населенных пунктов с численностью населения меньше 20 человек не предусмотрено. Сезонное транспортное обслуживание садовых товариществ стандартами в области транспорта не регламентировано.

Разработчиками стандарта установлено предельное расстояние в 3 км, которое должен преодолеть житель сельского населенного пункта для получения доступа к услугам общественного транспорта. Преодоление такого расстояния для маломобильных категорий граждан, планирующих воспользоваться общественным транспортом, на наш взгляд, затруднительно. При этом в стандарте не определено, каким образом должно быть определено это расстояние (по дорогам или по прямой линии, проведенной между населенным пунктом и местом остановки общественного транспорта).

Таблица 1 – Система государственных социальных стандартов в области транспорта

Наименование социального стандарта	Норматив обслуживания
Норматив наличия пассажирских терминалов для обслуживания пассажиров автобусных маршрутов на основании Закона «Об автомобильном транспорте и автомобильных перевозках» [2]	один-два пассажирских терминала на один район
Охват транспортным обслуживанием*:	
административных центров сельсоветов	100 %, при обязательном выполнении не менее 16 рейсов в неделю
аггородков с численностью населения более 1 тыс. человек	100 %, при обязательном выполнении не менее 28 рейсов в неделю
Охват транспортным обслуживанием* населенных пунктов с численностью населения:	
от 20 до 50 человек	100 % с обязательным выполнением не менее четырех рейсов в неделю
свыше 50 человек	100 % с обязательным выполнением не менее восьми рейсов в неделю
Зона охвата населенных пунктов с численностью населения от 20 человек транспортным обслуживанием*	до 3 км
Норматив обслуживания населения в рамках городских перевозок для городов и городских поселков (норматив определен с учетом перевозки пассажиров в регулярном сообщении в рабочие, выходные и праздничные дни) с численностью населения:	
от 10 до 30 тыс. человек	один автобус на 8 тыс. человек
от 30 до 50 тыс. человек	один автобус на 4 тыс. человек
от 50 до 250 тыс. человек	один автобус (троллейбус, трамвай) на 2 тыс. человек
от 250 до 1000 тыс. человек	один автобус (троллейбус, трамвай) на 1,5 тыс. человек
свыше 1000 тыс. человек	один автобус (троллейбус, трамвай, вагон метрополитена) на 2 тыс. человек
Норматив обслуживания населения на маршрутах междугородных внутриобластных автомобильных перевозок в регулярном сообщении* с учетом перевозки пассажиров в регулярном сообщении в рабочие, выходные и праздничные дни	ежедневно один оборот (два рейса) между районным и областными центрами

Норматив обслуживания населения в рамках городских перевозок для городов и городских поселков также определен в зависимости от численности населения этих населенных пунктов, однако в этом случае норматив указан в виде числа автобусов, троллейбусов, вагонов трамвая и/или метрополитена на определенное число жителей. При этом стандартом не конкретизировано время и/или дни работы, максимальные или минимальные интервалы движения

* С учетом железнодорожного транспорта и внутреннего водного транспорта в навигационный период

рассчитанного числа пассажирских транспортных средств, минимальные требования к этим транспортным средствам. Таким образом, формальным выполнением указанного стандарта для города с численностью населения в 29 000 человек может быть наличие в городе у перевозчиков 3 автобусов категории М2, при этом каждым автобусом может выполняться минимум 1 рейс в неделю, что недостаточно для современного качественного транспортного обслуживания населения.

Минимальные требования к обустройству остановочных пунктов указаны в технической документации. На автомобильных дорогах [10] автобусные остановки должны быть оборудованы остановочными и посадочными площадками со скамьями и урнами для мусора, а также павильонами или навесами для пассажиров с информацией о названии остановки и с устройством для размещения расписания движения автобусов. В населенных пунктах в требованиях [11] к остановочным пунктам конкретизированы расстояния между остановками (от 350 до 600 м для автобусов, троллейбусов, трамваев, от 800 до 1200 м для скоростных автобусов и трамваев), в требованиях по оборудованию остановок наличие укрытий от дождя (остановочных павильонов) конкретно не регламентировано.

В то же время в Правилах автомобильных перевозок пассажиров [12] расстояния между остановочными пунктами регламентировано следующим образом:

- Городские автомобильные перевозки пассажиров в обычном регулярном сообщении должны осуществляться автобусами между основными пассажирообразующими пунктами города и иметь промежуточные остановочные пункты, как правило, с расстоянием между ними при многоэтажной застройке 350–800 м, при малоэтажной – 500–1000 м.
- Пригородные автомобильные перевозки пассажиров в обычном регулярном сообщении должны обеспечивать потребность пассажиров в поездках между пассажирообразующими пунктами (включая дачные поселки, зоны отдыха, поселки городского типа, центры сельских исполнительных комитетов), и на маршрутах таких перевозок расстояния между остановочными пунктами должны быть не более 6000 м (при наличии жилых строений) и не менее 1500 м (для вновь открываемых маршрутов). Строительными нормами [13] определена дальность пешеходных подходов к остановочным пунктам пригородного пассажирского транспорта следует принимать не более 1 км. Дальность пешеходных подходов к ближайшей остановке нескоростных видов пассажирского транспорта приведена в таблице 2. Дальность пешеходных подходов к станциям метрополитена и остановочным пунктам скоростного трамвая следует принимать от 600 до 800 м.

Таблица 2 – Дальность пешеходного подхода к ближайшей остановке общественного транспорта

Функциональные зоны и отдельные объекты	Дальность подходов в городах, м, не более	
	крупных и больших	средних и малых
Жилая застройка:		
многоэтажная	500	350
среднеэтажная, малоэтажная	800	600
Промышленные и коммунально-складские объекты (от проходных предприятий)	400	300
Общественные объекты массового отдыха и спорта (от главного входа)	500	400
Общественные объекты общегородского центра (массового посещения)	250	150

Анализ документов показывает, что отдельные стандарты транспортного обслуживания отличаются между документами, хотя и регламентируют одни и те же аспекты транспортного обслуживания. Параметры качества транспортного обслуживания, например, периодичность рейсов в течение суток или недели, предельные или минимальные интервалы движения общественного транспорта,

допустимый уровень заполненности пассажирских транспортных средств на основании проанализированных документов не могут быть определены.

Параметры качества транспортного обслуживания могут быть установлены облисполкомами (Минским горисполкомом), но на момент проведения исследования администрации исполкомов параметры качества не устанавливали.

Учитывая разрозненность документов, регламентирующих стандарты транспортного обслуживания населения Республики Беларусь, с целью унификации указанных в разных документах стандартов, предлагается реализовать следующие мероприятия:

1. Разработать единый нормативный акт, содержащий все существующие стандарты и нормативы в сфере общественного транспорта.
2. Администрациям областных и Минскому городскому исполнительным комитетам совместно с операторами регулярных пассажирских перевозок предлагается уточнить принятые исполкомами социальные стандарты в области транспорта (в том числе параметры качества транспортного обслуживания), включив в эти стандарты среди прочих следующие аспекты работы общественного транспорта:
 - время начала и окончания работы общественного транспорта в городах;
 - предоставление услуг транспорта общего пользования в ночное время, в праздничные дни;
 - максимально допустимый интервал движения общественного транспорта;
 - рекомендации по выбору вида общественного транспорта при проектировании новых микрорайонов, промышленных предприятий, объектов притяжения (крупных торговых центров, кинотеатров, парков и т. п.);
 - приемлемый или максимальный уровень наполнения автобусов, троллейбусов, трамваев в чел./м² свободной площади пола;
 - минимальные технические требования к оборудованию, цветовому оформлению, доступности транспортных средств общественного транспорта и объектов транспортной инфраструктуры;
 - зону охвата всех сельских населенных пунктов независимо от числа жителей в них с учетом интересов маломобильных категорий граждан;
 - прочие аспекты работы общественного транспорта, связанные с особенностями социально-экономического развития региона.

Заключение

Существующая в Республике Беларусь система социальных стандартов в сфере транспорта регламентирует общие показатели функционирования общественного транспорта. Показатели зафиксированы таким образом, что технически они могут быть выполнены даже при отсутствии надлежащего транспортного обслуживания населения.

Временной период, дни недели обслуживания населения общественным транспортом в минимальных стандартах не конкретизированы. Транспортное обслуживание населенных пунктов с численностью населения меньше 20 человек не предусмотрено.

Установленное предельное расстояние подхода к остановочным пунктам общественного транспорта в пригородной зоне в 3 км может быть преодолимо маломобильными категориями граждан.

Сезонное транспортное обслуживание садовых товариществ стандартами в области транспорта не регламентировано.

Отдельные стандарты транспортного обслуживания населения отличаются между документами разного уровня, хотя и регламентируют одни и те же аспекты.

Предложены мероприятия по унификации стандартов в области транспорта.

Список цитированных источников

1. О мерах по внедрению системы государственных социальных стандартов по обслуживанию населения республики, п. 25–30 [Электронный ресурс] Приложение к постановлению Совета Министров Республики Беларусь 30.05.2003 № 724 : в редакции постановления Совета Министров Республики Беларусь 14.12.2020 № 720 // Национальный центр правовой информации

- Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=C20300724>. – Дата доступа: 21.04.2022.
2. Правила автомобильных перевозок пассажиров [Электронный ресурс] Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30.06.2008 № 972 : в редакции постановления Совета Министров Республики Беларусь 31.08.2018 № 636 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=C20800972>. – Дата доступа: 21.04.2022.
3. Об установлении перечня государственных социальных стандартов по обслуживанию населения города Минска [Электронный ресурс] : Решение Минского городского исполнительного комитета от 26 июня 2003 г. № 1013 в ред. Решения Минского городского исполнительного комитета от 11 марта 2021 г. № 795 Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 07.04.2021, 9/107945// Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r90301013>. – Дата доступа: 21.04.2022.
4. О перечне государственных социальных стандартов по обслуживанию населения Брестской области [Электронный ресурс] : Решение Брестского областного исполнительного комитета от 25 марта 2021 г. № 179 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r921b0108233>. – Дата доступа: 21.04.2022.
5. О перечне государственных социальных стандартов по обслуживанию населения Витебской области [Электронный ресурс] : Решение Витебского областного исполнительного комитета от 25 июля 2011 г. № 464 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r911v0043093>. – Дата доступа: 21.04.2022.
6. О перечне государственных социальных стандартов по обслуживанию населения Гомельской области [Электронный ресурс] : Решение Гомельского областного исполнительного комитета от 20 октября 2017 г. № 973 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r918g0087411>. – Дата доступа: 21.04.2022.
7. О перечне государственных социальных стандартов по обслуживанию населения Гродненской области [Электронный ресурс] : Решение Гродненского областного исполнительного комитета от 29 марта 2021 г. № 156 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r921r0108186>. – Дата доступа: 21.04.2022.
8. Об установлении перечня государственных социальных стандартов по обслуживанию населения Минской области [Электронный ресурс] : Решение Минского областного исполнительного комитета от 30 июня 2003 г. № 486 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r903n0486>. – Дата доступа: 21.04.2022.
9. О перечне государственных социальных стандартов по обслуживанию населения Могилевской области [Электронный ресурс] : Решение Могилевского областного исполнительного комитета от 23 июля 2007 г. № 15-25 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r921r0108186>. – Дата доступа: 21.04.2022.
10. Автомобильные дороги. Нормы проектирования, п. 10. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.03-19-2006 (02250). – Введ. 1.07.2006. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2006.
11. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования, п. 6.1, 13.14. Технический кодекс установившейся практики : ТКП 45-3.03-227-2010 (02250). – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. – 46 с.
12. О некоторых вопросах автомобильных перевозок пассажиров, п. 80, 85 [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 июня 2008 г. № 972 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=c20800972>. – Дата доступа: 21.04.2022.

13. Об утверждении и введении в действие строительных норм СН 3.01.03-2020, 11.2.3, 11.5.3 [Электронный ресурс] : постановление Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 27 ноября 2020 г. № 94 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: https://etalonline.by/document/?regnum=w22136480p&q_id=4671524. – Дата доступа: 21.04.2022.
- References**
1. O merah po vnedreniyu sistemy gosudarstvennyh social'nyh standartov po obsluzhivaniyu naseleniya respubliki, p. 25–30 [Elektronnyj resurs] Prilozhenie k postanovleniyu Soveta Ministrov Respubliki Belarus' 30.05.2003 № 724 : v redakcii postanovleniya Soveta Ministrov Respubliki Belarus' 14.12.2020 № 720 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/-?regnum=C20300724>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 2. Pravila avtomobil'nyh perevozok passazhirov [Elektronnyj resurs] Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 30.06.2008 № 972 : v redakcii postanovleniya Soveta Ministrov Respubliki Belarus' 31.08.2018 № 636 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/?regnum=C20800972>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 3. Ob ustanovlenii perechnya gosudarstvennyh social'nyh standartov po obsluzhivaniyu naseleniya goroda Minska [Elektronnyj resurs] : Reshenie Minskogo gorodskogo ispolnitel'nogo komiteta ot 26 iyunya 2003 g. № 1013 v red. Resheniya Minskogo gorodskogo ispolnitel'nogo komiteta ot 11 marta 2021 g. № 795 Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus', 07.04.2021, 9/107945// Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/?regnum=r90301013>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 4. O perechne gosudarstvennyh social'nyh standartov po obsluzhivaniyu naseleniya Brestskoj oblasti [Elektronnyj resurs] : Reshenie Brestskogo oblastnogo ispolnitel'nogo komiteta ot 25 marta 2021 g. № 179 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/?regnum=r921b0108233>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 5. O perechne gosudarstvennyh social'nyh standartov po obsluzhivaniyu naseleniya Vitebskoj oblasti [Elektronnyj resurs] : Reshenie Vitebskogo oblastnogo ispolnitel'nogo komiteta ot 25 iyulya 2011 g. № 464 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/?regnum=r911v0043093>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 6. O perechne gosudarstvennyh social'nyh standartov po obsluzhivaniyu naseleniya Gomel'skoj oblasti [Elektronnyj resurs] : Reshenie Gomel'skogo oblastnogo ispolnitel'nogo komiteta ot 20 oktyabrya 2017 g. № 973 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/?regnum=r918g0087411>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 7. O perechne gosudarstvennyh social'nyh standartov po obsluzhivaniyu naseleniya Grodnenskoj oblasti [Elektronnyj resurs] : Reshenie Grodnenskogo oblastnogo ispolnitel'nogo komiteta ot 29 marta 2021 g. № 156 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/?regnum=r921r0108186>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 8. Ob ustanovlenii perechnya gosudarstvennyh social'nyh standartov po obsluzhivaniyu naseleniya Minskoy oblasti [Elektronnyj resurs] : Reshenie Minskogo oblastnogo ispolnitel'nogo komiteta ot 30 iyunya 2003 g. № 486 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/document/?regnum=r903n0486>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 9. O perechne gosudarstvennyh social'nyh standartov po obsluzhivaniyu naseleniya Mogilevskoj oblasti [Elektronnyj re-surs] : Reshenie Mogilevskogo oblastnogo ispolnitel'nogo komiteta ot 23 iyulya 2007 g. № 15-25 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/?regnum=r921r0108186>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 10. Avtomobil'nye dorogi. Normy proektirovaniya, p. 10. Tekhnicheskij kodeks ustanovivshejsya praktiki TKP 45-3.03-19-2006 (02250). – Vved. 1.07.2006. – Minsk : Gosudarstvennyj komitet po standartizacii Respubliki Belarus', 2006.
 11. Ulicy naselennyh punktov. Stroitel'nye normy proektirovaniya, p. 6.1, 13.14. Tekhnicheskij kodeks ustanovivshejsya praktiki : TKP 45-3.03-227-2010 (02250). – Minsk : Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 2011. – 46 s.
 12. O nekotoryh voprosah avtomobil'nyh perevozok passazhirov, p. 80, 85 [Elektronnyj resurs] : postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 30 iyunya 2008 g. № 972 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/-document/?regnum=c20800972>. – Data dostupa: 21.04.2022.
 13. Ob utverzhenii i vvedenii v dejstvie stroitel'nyh norm SN 3.01.03-2020, 11.2.3, 11.5.3 [Elektronnyj resurs] : postanovlenie Ministerstva arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' ot 27 noyabrya 2020 g. № 94 // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: https://etalonline.by/document/?regnum=w22136480p&q_id=4671524. – Data dostupa: 21.04.2022.

Материал поступил в редакцию 01.06.2022

ЮБИЛЯРЫ



СЕВЕРЯНИН ВИТАЛИЙ СТЕПАНОВИЧ

(к 85-летию со дня рождения)

Северянин В. С. – известный ученый, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БрГТУ.

Научный вклад Северянина В. С. заключается в разработке и исследовании нового высокоэффективного способа сжигания топлива – так называемого пульсирующего горения: открыт ряд неизвестных ранее физических закономерностей, выявлены их количественные соотношения в виде математических формул, экспериментально показаны новые явления при горении, предложено много конструктивных решений, которые используют указанный метод.

Северянин В. С. – научный руководитель научно-исследовательской лаборатории «Пульсар», которая действует в Брестском государственном техническом университете (БрГТУ). Разработки этой НИЛ успешно используются на предприятиях республики и за рубежом.

Одна из разработок Северянина В. С. с пульсирующим горением – парагазогенератор, который производится на Брестском радиотехническом заводе. Лаборатория ведет исследования и разработки в области как традиционной, так и альтернативной энергетики, основанные на интенсификации физических процессов и новых технических решений. Внедрены устройства для парагазогенерации в технологиях термовлажностной обработки (заводы ЖБК в Гродно, Лунинце, Орше, Бресте).

Является руководителем научной школы. Результативность научной школы: защищены 5 кандидатских диссертаций.

Всего около 400 печатных работ. Является автором более 250 авторских свидетельств и патентов. За 2021 год получил 16 патентов, с начала 2022 года – 12 патентов.

Северянин В. С. – лауреат премии НАН РБ за 1997 год в области технических наук, почетный профессор Брестского государственного технического университета, имеет много дипломов и грамот. В 2016 году он был награжден медалью Франциска Скорины, в 2021 – знаком «Отличник образования».

**Коллектив работников университета, редакционная коллегия журнала «Вестник БрГТУ»
сердечно поздравляют юбиляра и желают ему счастья,
отличного здоровья, оптимизма и творческих успехов.**

Научное издание

ВЕСТНИК БРЕСТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ);
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ
№ 2 (128). 2022 г.

Главный редактор	Баханович А. Г.
Зам. главного редактора	Шалобыта Н. Н.
Ответственный секретарь	Ковальчук Е. Н.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Строительство»	Тур В. В.
Зам. ответственного редактора по разделу «Строительство»	Пойта П. С.
Ответственный редактор по разделу «Машиностроение»	Нерода М. В.
Зам. ответственного редактора по разделу «Машиностроение»	Поддубко С. Н.
Ответственный редактор по разделу «Информационные технологии»	Головко В. А.
Зам. ответственного редактора по разделу «Информационные технологии»	Лебедь С. Ф.
Ответственный редактор по разделу «Геоэкология»	Волчек А. А.
Зам. ответственного редактора по разделу «Геоэкология»	Мешик О. П.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Экономика»	Зазерская В. В.
Зам. ответственного редактора по разделу «Экономика»	Медведева Г. Б.
Технический редактор	Соколюк А. П.
Дизайн	Колб К. С.
Корректор	Дударук С. А.