



ISSN 1818-1112

№ 1(130)

Научно-практический журнал
Scientific and practical journal

ВЕСТНИК

Брестского государственного
технического университета

VESTNIK

Brest State
Technical University

WWW.BSTU.BY

DOI 10.36773/1818-1112-2023-130-1

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

БАХАНОВИЧ АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ

д-р техн. наук, доцент, первый заместитель Министра образования Республики Беларусь

Заместитель главного редактора

ШАЛОБЫТА НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ

канд. техн. наук, доцент, проректор по научной работе БрГТУ

Ответственный секретарь

КОВАЛЬЧУК ЕКАТЕРИНА НИКОЛАЕВНА

инженер-программист БрГТУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Раздел «Строительство»

д-р техн. наук, профессор ТУР ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ (ответственный редактор)

д-р техн. наук, профессор ПОЙТА ПЁТР СТЕПАНОВИЧ (зам. ответственного редактора)

д-р техн. наук, профессор БАТЯНОВСКИЙ ЭДУАРД ИВАНОВИЧ

д-р техн. наук, профессор БОЛТРЫК МИХАИЛ

академик РААСН, д-р техн. наук, профессор КОЛЧУНОВ ВИТАЛИЙ ИВАНОВИЧ

чл.-корр. БАЦМАА, д-р арх., профессор МОРОЗОВА ЕЛЕНА БОРИСОВНА

д-р техн. наук, доцент НАЙЧУК АНАТОЛИЙ ЯКОВЛЕВИЧ

д-р техн. наук, профессор ЛАЗОВСКИЙ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

д-р техн. наук, профессор ЛЕОНОВИЧ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

Раздел «Машиностроение»

канд. техн. наук, доцент НЕРОДА МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ (ответственный редактор)

канд. техн. наук, доцент ПОДДУБКО СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ (зам. ответственного редактора)

д-р техн. наук, профессор ДЕВОЙНО ОЛЕГ ГЕОРГИЕВИЧ

д-р техн. наук, профессор ПОБОЛЬ ИГОРЬ ЛЕОНИДОВИЧ

академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ВИТЯЗЬ ПЁТР АЛЕКСАНДРОВИЧ

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ШЕЛЕГ ВАЛЕРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

канд. техн. наук, доцент ХВИСЕВИЧ ВИТАЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ

Раздел «Геоэкология»

д-р геог. наук, профессор ВОЛЧЕК АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ (ответственный редактор)

канд. техн. наук, доцент МЕШИК ОЛЕГ ПАВЛОВИЧ (зам. ответственного редактора)

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р геол.-минерал. наук, профессор БОГДАСАРОВ МАКСИМ АЛЬБЕРТОВИЧ

д-р техн. наук, профессор ГАВАРДАШВИЛИ ГИВИ ВАЛЕРИАНОВИЧ

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ЛИХАЦЕВИЧ АНАТОЛИЙ ПАВЛОВИЧ

академик НАН Беларуси, д-р геог. наук, профессор ЛОГИНОВ ВЛАДИМИР ФЁДОРОВИЧ

д-р с.-х. наук, профессор МАЖАЙСКИЙ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

канд. экон. наук, доцент КАСПЕРОВИЧ СЕРГЕЙ АНТОНОВИЧ (ответственный редактор)

канд. экон. наук, доцент ЗАЗЕРСКАЯ ВИКТОРИЯ ВАСИЛЬЕВНА (зам. ответственного редактора)

д-р экон. наук, профессор ВЫСОЦКИЙ ОЛЕГ АРСЕНТЬЕВИЧ

д-р экон. наук, доцент БЕЛЯЦКАЯ ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

д-р экон. наук, профессор ТАРАСОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

д-р экон. наук, профессор ХАЦКЕВИЧ ГЕННАДИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

д-р экон. наук, профессор ИВУТЬ РОМАН БОЛЕСЛАВОВИЧ

Регистрационный № 144

Решением коллегии Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь научно-практический журнал «Вестник Брестского государственного технического университета» включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (строительство, машиностроение, геоэкология) и экономическим отраслям науки.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).



ВЕСТНИК

Брестского государственного технического университета

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

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

1₍₁₃₀₎'2023

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО

ГУРИНОВИЧ В. Ю., ЛЕОНОВИЧ С. Н., ПОЗДНЯКОВ Д. А. Производственный потенциал базы индустриального домостроения Республики Беларусь **3**

ДЕРЕЧЕННИК С. С., МЕШЕЧЕК Н. Н. Решение задачи анализа функции состояния на основе приближения хвостовых частей распределений случайных величин нагрузки и сопротивления **7**

ДЕРКАЧ В. Н. Деформационные характеристики каменной кладки из керамических поризованных блоков **10**

ЖЕЛТКОВИЧ А. Е., МОЛОШ В. В., ПАРХОЦ К. Г. Применение нейросети и генетического алгоритма при проектировании монолитных плит на основании **14**

ЖИТЕНЕВ Б. Н. Очистка гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод для технического водоснабжения промышленных предприятий **20**

МАЛКОВ И. Г., ТОЛОЧКО А. В. Анализ объектов визуальной информации на примере города Гомеля **23**

МАЛЮК В. В., МАЛЮК В. Д., ЛЕОНОВИЧ С. Н., КОЛОДЕЙ А. В. Технология долговечного бетона для морских портовых и транспортных сооружений в условиях морозного воздействия **26**

МАРКЕЧКО Е. В., НАЙЧУК А. Я. КЭ-модель узлового соединения элементов деревянных конструкций, выполненного с использованием винтов, работающих на осевое растяжение **33**

МАТВЕЕНКО Н. В., КРИВИЦКИЙ П. В., МАЛИНОВСКИЙ В. Н. Учет конструктивных особенностей элементов ломаного очертания при определении сопротивления срезу **37**

МОРОЗ В. В., УРЕЦКИЙ Е. А., МИХНЕВИЧ Э. И. Исследование, разработка и внедрение малозатратной технологии очистки сточных вод, загрязненных соединениями свинца **40**

МОРОЗ В. В., УРЕЦКИЙ Е. А., МИХНЕВИЧ Э. И. Получение воды повышенного качества, используемой для производства печатных плат на ОАО «БЭМЗ» **45**

НЕВЕЙКОВ А. Н., ДЕДОК В. Н. Необходимость технического нормирования методов контроля сплошности свай в Республике Беларусь **50**

ПОЙТА П. С., ШАЛОБЫТА Н. Н., ШАЛОБЫТА Т. П. Напряженно-деформированное состояние в основании штампов при передаче на грунт равномерно-распределенной нагрузки различной интенсивности **56**

ПУГАЧ Д. В., ДЕРКАЧ В. Н. Причины образования трещин в стенах малоэтажных каменных зданий из силикатного кирпича **60**

ШАЛОБЫТА Н. Н., МАТВЕЕНКО Е. С., ШАЛОБЫТА Т. П., МАТВЕЕНКО Н. В. Оценка методов определения прочности бетона на осевое растяжение **64**

ШУРИН А. Б., ШЕВЧУК В. Л., ДЕРКАЧ В. Н., ТЕРЛЕЦКИЙ В. М. Анализ технического состояния строительных конструкций бывшего монастыря бернардинок на территории Брестской крепости **71**

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ВОРСИН Н. Н., ГЛАДЫЩУК А. А., КУШНЕР Т. Л., ТАРАСЮК Н. П., ЧУГУНОВ С. В. Моделирование и разработка AlGa_N гетеропереходного полевого транзистора **76**

ДОВГЯЛО Д. А., КОРБА К. В., АБРАМЕНКО С. Н. Трехосевой силоизмерительный датчик системы контроля сил резания и процессов, протекающих при высокоскоростной обработке **82**

КИРИЕНКО А. С., ЗАВИСТОВСКИЙ С. Э., ЗАВИСТОВСКИЙ В. Э. Теория и практика управления формированием ориентированных абразивосодержащих рабочих поверхностей в эластичных шлифовальных инструментах **87**

ОРДА А. Н., МИСУН А. Л. Исследование безопасности и эффективности функционирования технологической системы «оператор-комбайн-транспорт» на уборке кормовых культур **91**

ПАТАПАУ У. А., РУСАН С. І., СИВАЧЭНКА Л. А. Мадэліраванне і аналіз сілавага ўзаемадзеяння звянаў у рабочей камеры ланцужага аграгата **95**

СТАРОВОЙТОВ Н. А. Адаптыўнае ўправленне моццю працэса рэзанання на абразывно-отрезных станках с качающейся шпиндельной бабкой **109**

ГЕОЭКОЛОГИЯ

VOLCHAK A. A., PARFOMUK S. I., SHESHKO N. N., SHPENDIK N. N., DASHKEVICH D. N., SIDAK S. V., KUKHAREVICH M. F., ROZUMETS I. N. Environmental problems caused by the extraction of non-metallic building materials from riverbeds **113**

VOLCHAK A. A., SIDAK S. V., PARFOMUK S. I., SHESHKO N. N. The climate change impact on the hydrological regime of the rivers in Belarus **118**

VOLCHAK A. A., SHVEDOVSKYP. V., OBRAZCOVL. V., SRYVKINA L. G., KISEL A. I. Optimal strategy for water protection activity in regions **122**

ЗАЩУК Е. Н., ЖУК А. И., МАХНИСТ Л. П. Использование методов компьютерной алгебры в лекциях «Предел числовой последовательности и функции» **125**

ЧЕПИК А. Г., МАЖАЙСКИЙ Ю. А., ДОРОНКИН Ю. В. Экологическая эффективность в системе ведения сельского хозяйства на мелиорируемых землях **129**

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ГОЛОДОВА Ж. Г., СМИРНОВ П. А., ЛАЗЫРИН М. С. Инновационные формы государственной поддержки малого предпринимательства в странах Евразийского экономического союза в условиях цифровизации **134**

ГУРИНОВИЧ С. А. Организация деятельности и повышение конкурентоспособности предприятий в условиях пандемии и санкций **139**

ДЕМИДОВЕЦ В. П. Методические аспекты оценки устойчивого развития лесхоза на основе сбалансированной системы показателей **142**

ЕРМАКОВА Э. Э., МИШКОВА М. П. Формирование рынка лицензионной торговли в Республике Беларусь **146**

РОМАНОВА Е. С. Оценка экономического потенциала предприятия в условиях цифровой экономики: методический аспект **149**

ЯШЕВА Г. А., ВАЙЛУНОВА Ю. Г. Методические аспекты формирования региональных кластерных стратегий в условиях цифровизации экономики Республики Беларусь **153**

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 69.057.1

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ БАЗЫ
ИНДУСТРИАЛЬНОГО ДОМОСТРОЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬВ. Ю. Гуринович¹, С. Н. Леонович², Д. А. Поздняков³¹ М. т. н., заведующий отделом научно-технической информации и маркетинга филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск, Беларусь, e-mail: gurinovich@bntu.by² Д. т. н., профессор заведующий кафедрой «Строительные материалы и технология строительства» УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: sleonovich@mail.ru³ Главный инженер Республиканского унитарного предприятия «Институт жилища - НИПТИС им. Атаева С. С.», Минск, Беларусь, e-mail: pozddzm@tut.by

Реферат

Развитие жилищного строительства в Республике Беларусь определено государственной политикой, ориентированной на наращивание объемов строительства жилья с минимальными затратами на его возведение. Критериям возведения жилья в кратчайшие сроки и с минимальными затратами в большей степени соответствует индустриальное домостроение.

Актуальным для развития индустриального жилищного строительства в настоящее время является внедрение на предприятиях индустриального домостроения современных производственных линий, разработка организационно-технологических решений управления производством с учетом индивидуальных особенностей предприятий. В результате проведенных исследований освоения производственных мощностей и уровня развития материально-технической базы предприятий индустриального домостроения были выявлены резервы и сформулированы основные причины снижения показателей проектных мощностей после проведения реконструкции основных производств предприятий.

Ключевые слова: индустриальное домостроение, производственная база индустриального домостроения, производственная мощность, реконструкция, производство сборных железобетонных конструкций, организация производства сборных железобетонных конструкций, управление производством.

PRODUCTION POTENTIAL OF THE PREFABRICATED CONSTRUCTION BASE IN THE REPUBLIC OF BELARUS

V. Yu. Gurinovich, S. N. Leonovich, D. A. Pozdniakov

Abstract

The development of housing construction in the Republic of Belarus is determined by the state policy based on increasing the volume of housing construction with minimal costs. The prefabricated construction provides to the construction of housing in the shortest possible time and at minimum cost.

Currently, the introduction of modern production lines at the plants of prefabricated construction, the development of organizational and technological solutions of production management, taking into account the individual characteristics of plants, is urgent for the development of housing construction. As a result of the conducted studies of the production capacities and the level of development of the material and technical base of plants of prefabricated construction the reserves are revealed and the main reasons for the reduction of indicators of design capacities of the after reconstruction of the main production capacities of plants are formulated.

Keywords: Prefabricated construction, production base of prefabricated construction, production capacity, reconstruction, production of prefabricated reinforced concrete structures, organization of production prefabricated reinforced concrete structures, production management.

Введение

Индустриальное домостроение в последнее время является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений исследований в области строительства и строительных технологий в мире. Технология возведения зданий из сборных железобетонных конструкций и элементов в мировой практике известна давно, но только в последнее десятилетие данное направление привлекает все больше внимания ученых и практикующих специалистов [1–3]. Проведенный обзор литературы в международной базе научного цитирования Scopus показывает значительный рост количества публикаций по данной тематике начиная с 2015 года.

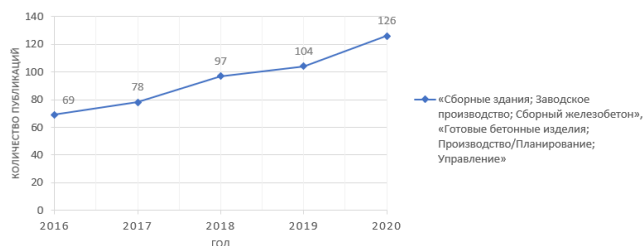


Рисунок 1 – Общее количество публикаций в области индустриального домостроения

многих европейских странах и в последнее время интенсивно развивается в азиатском регионе (Китай, Малайзия, Индия, Южная Корея, Иран и др.). Средняя доля зданий из сборного железобетона в странах Европейского Союза составляет 20–25 %, в странах Северной Европы она достигает 40–50 %, а на долю Китая приходится более 30 % мирового рынка индустриального строительства [4].

Общий объем рынка индустриального домостроения в мире представлен на рисунке 2 [5].



Рисунок 2 – Распределение объема рынка индустриального строительства
* – включая Российскую Федерацию

Возведение зданий и сооружений из сборных железобетонных конструкций является одним из основных методов строительства во

Строительство

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-130-1-3-6>

Среди лидеров современного индустриального домостроения выделяются скандинавские страны, в частности Швеция, а по уровню автоматизации и роботизации промышленного изготовления строительных конструкций мировое лидерство прочно удерживает Япония. Производительность японских домостроительных заводов в 7 раз превышает соответствующие показатели европейских производителей [6].

Несмотря на успехи индустриализации жилищного строительства, в большинстве экономически развитых стран до сих пор преобладают методы строительства без применения сборных железобетонных конструкций. Так, в США и Турции доля зданий из сборного железобетона составляет всего 6 % и 2 % соответственно [4].

Индустриальное строительство в зарубежной практике рассматривается как инструмент оптимизации строительства за счет развития производства строительных изделий вне строительной площадки [4,7], а сборный железобетон как один из методов строительства, использующих принципы индустриализации в строительном процессе. Строительство из сборных конструкций используется в ряде стран в различной терминологии: современный метод строительства (ММС) – в Великобритании; внеплощадочное производство (OSM) – в Великобритании, США и Австралии, индустриализованная строительная система (IBS) – в Малайзии.

Преимущества технологии сборного железобетона представлены в исследованиях [8–13] и определяют прежде всего высокое качество, сокращение продолжительности и стоимости строительства, снижение трудовых и материальных ресурсов, повышение безопасности строительства, а также экологичность строительства, которая обеспечивается сокращением отходов.

Проведенные исследования публикационной активности и тематик публикаций в области индустриального домостроения показал, что интерес к индустриальному домостроению в мире возрастает, но в исследованиях преобладают темы, ориентированные на изучение архитектурных и конструктивных решений зданий, железобетонных конструкций заводского изготовления и их свойств, организации строительства в условиях строительной площадки и пр. В то же время тематикам, связанным с организацией производства железобетонных изделий, управлением производством, исследованием технологий производства изделий в заводских условиях, уделяется меньшее внимание.

В связи с этим большое значение приобрела задача разработки организационно-технологических решений управления производством с учетом индивидуальных особенностей предприятий индустриального домостроения и современных требований к уровню организации производства, оптимизации производства и разработки решений снижения себестоимости выпуска сборных изделий [14, 15].

Анализ состояния производственной базы индустриального домостроения

Выполнение плановых показателей возведения жилья на основе индустриальных методов строительства в республике обеспечивается сетью ДСК и заводов КПД. При этом следует отметить, что уровень развития производственной базы индустриального домостроения определяет возможность проектных и строительных организаций обеспечивать современные требования к жилью, архитектурную выразительность и индивидуальность возводимых зданий, современные потребительские и эксплуатационные качества жилых зданий. В то же время производство сборных железобетонных изделий характеризуется трудоёмкими технологиями и тяжелыми условиями труда.

Производственная база ДСК и заводов КПД в 1990-х – начале 2000 гг. характеризовалась высоким уровнем износа основных фондов, который в среднем составлял 70 % и более, при этом износ активной части достигал 90 %. Уровень обновления основных производственных фондов не превышал 2–3 % в год при оптимальном значении данного показателя 8–10 %. Низкий уровень развития производственной базы стал следствием ухудшения состояния материально-технической базы ДСК и заводов КПД, что привело к снижению конкурентоспособности индустриального домостроения перед другими вариантами возведения жилых домов, в том числе и в монолитном исполнении. В итоге доля возведения жилья в индустриальном исполнении не превышала 29 % от общих объемов построенного жилья в республике.

По данным [16] в Республике Беларусь в 2006 году насчитывалось 14 действующих ДСК и заводов КПД, общая проектная мощность которых составляла 1 616,0 тыс. кв. м жилья в год. Действующие на предприятиях индустриального домостроения морально устаревшие технологии и оборудование не могли обеспечить выпуск продукции, соответствующей современным потребительским и эксплуатационным требованиям, гибкость технологических процессов и достижение проектных показателей мощности предприятия. По этой причине фактические мощности предприятий индустриального домостроения составляли всего около 1 млн кв. метров в год (0,8 млн куб. метров в год), при этом средний уровень освоения производственных мощностей предприятий находился на уровне 63 %, в то время как для 4 предприятий освоение производственных мощностей находилось на уровне 18 % и менее. Данные производственных мощностей ДСК и заводов КПД по состоянию на 01.01.2006 года представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Производственные мощности ДСК и заводов КПД в 2006 году

№ п/п	Наименование организаций	Проектная мощность тыс. кв. м	Фактическая мощность (на 01.01.2006), тыс. кв. м	Коэффициент освоения производственных мощностей
1	КУП «Брестжилстрой»	100	60	0,60
2	КУПП «Ганцевичский завод КПД»	50	6,5	0,13
3	ПП «Витебский ДСК»	140	70	0,50
4	ОАО «Трест № 16», г. Новополоцк	57	10	0,18
5	ОАО «Гомельский ДСК»	140	70	0,50
6	ОАО «Светлогорский ДСК»	50	25	0,50
7	ОАО «Гродножилстрой»	100	160	1,60
8	РУП «Могилевский ДСК»	106	15	0,14
9	ОАО «Бобруйский завод КПД»	100	60	0,60
10	Бобруйское УКПП «КЖИ»	100	12,5	0,13
11	ОАО «Солигорский ДСК»	66	31	0,47
12	ОАО «Борисовжилстрой»	40	11	0,28
13	ОАО «МАПИД»	447	400	0,89
14	ОАО «Минский ДСК»	120	80	0,67
ИТОГО		1616	1011	0,63

Повышение качества строительства и переход на современные технологии возведения жилья в индустриальном исполнении в республике был реализован в рамках Государственной комплексной программы развития материально-технической базы строительной отрасли путем реконструкции и модернизации действующих производственных баз предприятий индустриального домостроения и внедрением современных наукоемких ресурсосберегающих технологий, нового оборудования и оснастки.

Однако следует отметить, что отсутствие передового опыта реализации столь масштабных программ проведения реконструкции и модернизации, недостаточный уровень проработки бизнес-планов инвестиционных проектов, утверждение завышенных показателей проектных мощностей для ДСК и заводов КПД без учета мощностей вспомогательных производственных участков привело к увеличению сроков реализации программы реконструкции и модернизации предприятий индустриального домостроения и росту объемов финансирования программы.

Программа реконструкции и модернизации производственной базы индустриального домостроения была завершена в 2015–2016 гг. Просчеты на стадии разработки программы развития производственных мощностей баз индустриального домостроения и большая кредитная нагрузка стали следствием ухудшения финансового состояния и привели к ликвидации ряда предприятий, а ряд предприятий не обеспечил выпуск продукции на уровне показателей, установленных на стадии проектирования.

Анализ объемов жилищного строительства на современном этапе развития индустриального домостроения в республике после реконструкции и модернизации предприятий показывает большой разброс показателей производственных мощностей и их освоения по областям. На рисунке 2 представлены данные проектных производственных мощностей и загрузки предприятий индустриального домостроения по областям республики в 2020 году.

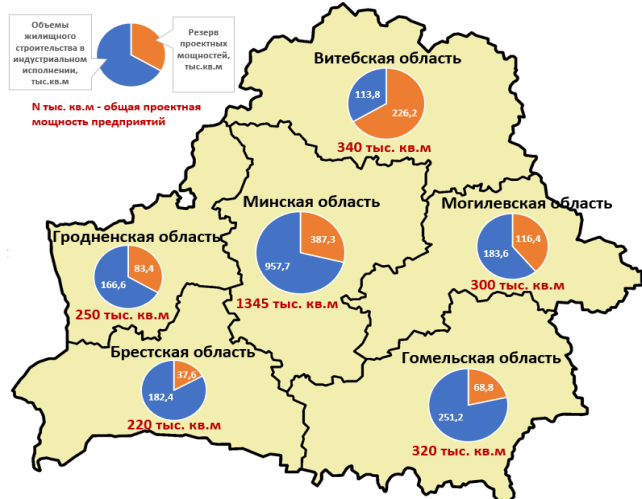


Рисунок 3 – Показатели проектных мощностей производственных баз индустриального домостроения по областям республики

Результаты, представленные на рисунке 3, демонстрируют доминирование Минска и Минской области, при этом основные производственные мощности сосредоточены в городе Минске, где функционируют 3 предприятия государственной формы собственности (ОАО «МАПИД», ОАО «Минский ДСК», КУП «Завод эффективных промышленных конструкций») и одно предприятие частной формы собственности (ООО «Современные бетонные конструкции»), общая проектная мощность которых составляет 995,0 тыс. кв. м. Данные освоения производственных мощностей базы индустриального домостроения и распределение объемов индустриального домостроения по областям республики по состоянию на 2020 год представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели производственной мощности предприятий индустриального домостроения по состоянию на 2020 год

№ п/п	Наименование организаций	Проектная мощность предприятий после реконструкции, тыс. кв. м (при трехсменной работе)	Показатель освоения проектных мощностей предприятий, %	Доля индустриального домостроения в общем объеме жилищного строительства, %	Примечание (выпускаемые серии домов)
Брестская область					
1	КУП «Брестжилстрой»	150	83,0	29,0	90
2	КУП «Ганцевичский завод КПД»	70			90
Витебская область					
3	ГП «Витебский ДСК»	240	34,0	39,0	111-108
4	ОАО «Трест № 16», г. Новополоцк	100			90
Гомельская область					
5	ОАО «Гомельский ДСК»	200	79,0	54,0	152
6	ОАО «Светлогорский ДСК»	50			1.464А-1СВ 92
7	ОАО «Мозырский ДСК»	70			Б2. 111-90-1.08
Гродненская область					
8	ОАО «Гродножилстрой»	250	67,0	42,0	90
Могилевская область					
9	РУП «Могилевский ДСК»	150	61,0	53,0	90-3; Б1.020.1-8 «КУБ»
10	ОАО «Бобруйский завод КПД»	150	Б0.01.02.03.07		
г. Минск и Минская область					
11	ОАО «Минский ДСК»	130	71,0	52,0	3А-ОПБ, система «КУБ»
12	КУП «Завод эффективных промышленных конструкций»	55			24РС-1.19
13	ОАО «МАПИД»	630			М464-У1, М464М, М111-90
14	ООО «Современные бетонные конструкции»	180			-
15	ОАО «Солигорский ДСК»	150			1-464 Д1.3
16	ОАО «Борисовжилстрой»	200			90
ИТОГО		2775	66,9	47,0	

В настоящее время в соответствии с Государственной политикой в области жилищного строительства, направленной на снижение стоимости строительства, особую актуальность приобретает увеличение доли индустриального домостроения, как метода, обеспечивающего строительство жилья с минимальными затратами и в сжатые сроки. С учетом установившейся проектной мощности производственной базы индустриального домостроения на уровне 2,775 млн кв. м одним из основных направлений увеличения доли возведения жилья в индустриальном исполнении является обеспечение 100 % освоения производственных мощностей предприятий индустриального домостроения.

На рисунке 4 представлены данные изменения показателей освоения проектных мощностей предприятий индустриального домостроения за период 2016–2020 гг.



Рисунок 4 – Использование производственных мощностей ДСК и заводов КПД в период 2016–2020 гг. с учетом трехсменной работы предприятий

Анализ данных, представленных на рисунке 4, позволяет установить рост освоения производственной базы индустриального домостроения в последние годы, что можно объяснить увеличением доли возведения жилья в индустриальном исполнении в общем объеме жилищного строительства. В то же время установившейся показатель освоения проектных мощностей свидетельствует о наличии существенных внутренних резервов производственной базы индустриального домостроения.

Таким образом, только за счет оптимизации программ жилищного строительства и разработки организационно-технологических мероприятий по выводу предприятий на проектную мощность можно увеличить возведение жилья в индустриальном исполнении ежегодно на 0,92 млн кв. м общей площади.

Вместе с этим следует отметить, что ряд предприятий индустриального домостроения после реконструкции и модернизации производственных мощностей и ввода в эксплуатацию по ряду причин не смогли выйти на проектные показатели, что наряду с просчетами в программе возведения жилья могут служить причиной невозможности полного освоения проектных мощностей предприятий.

Заключение

Индустриальное домостроение в последнее время является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в мировой практике строительства. Средняя доля зданий из сборного железобетона в странах Европейского Союза составляет 20–25 %, в странах Северной Европы она достигает 40–50 %, а на долю Китая приходится более 30 % мирового рынка индустриального строительства. Проведенный анализ объемов жилищного строительства в Европейских странах показал высокий уровень возведения жилья в Республике Беларусь, при этом доля зданий, возводимых в индустриальном исполнении, составляет 42 %.

Развитие индустриального домостроения требует разработки прогрессивных технологий заводского производства сборных изделий, поскольку архитектурно-конструктивные решения зданий тесно связаны с типом оборудования и способами производства изделий.

В результате проведенных исследований работы предприятий индустриального домостроения после проведения реконструкции и модернизации к основным причинам недоосвоения показателей проектных производственных мощностей можно отнести:

организационные просчеты при планировании проектных мощностей предприятий и программы строительства жилья, что привело к недогрузке производственных мощностей предприятий ввиду отсутствия спроса на продукцию;

увеличение трудозатрат на частую переналадку оснастки вследствие расширения номенклатуры изделий в объеме комплектации каждого жилого дома, что привело к отставанию фактической производственной мощности предприятий от проектной;

отсутствие рекомендательных документов и опыта для оперативно-го принятия организационно-технологических решений управления современным производством, что стало следствием низкого организационно-технологического уровня производства сборных железобетонных изделий (низкая квалификация рабочих кадров, неудовлетворительная эксплуатация оборудования и оснастки и т. п.);

отсутствие методической и нормативной документации, опыта проектирования прогрессивных технологических процессов на основе высокопроизводительного и высокотехнологичного оборудования, оснастки, материалов и химических добавок, что привело к просчетам при выборе отдельного оборудования, комплекта технологических линий на стадии проектных работ реконструкции и модернизации производств.

Список цитированных источников

1. A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings [Electronic resource] / Wenhui Liu [et al.] // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 2021. – Mode of access: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2021/8869315>. – Date of access: 18.02.2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8869315>.
2. Azman, M.N.A. Comparative Study on Prefabrication Construction Process / M.N.A. Azman, M.S.S. Ahamad, W.M.A. Wan Hussin // *International Surveying Research Journal*. – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. 45–58.
3. Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis / M. R. Hosseini [et al.] // *Automation in Construction*. – 2018. – Vol. 87. – P. 235–247.
4. Polat, G. Precast concrete systems in developing vs. industrialized countries / G. Polat // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2010. – Vol. 16, № 1.
5. Research and Markets: The Global Prefabricated Buildings Market - Key Trends and Opportunities to 2017 [Electronic resource] // *Business Wire*. – 2014. – January 23. – Date of access: <http://www.businesswire.com/news/home/20140123005>.
6. Vogler A. *The House as a Product* / A. Vogler. – Amsterdam : IOS Press, 2015. – 198 p.
7. Alinaitwe, H. M. Assessing the degree of industrialisation in construction – A case of Uganda / H. M. Alinaitwe, J. A. Mwakali, B. Hansson // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2006. – Vol. 12, № 3. – P. 221–229.
8. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in china / X. Cao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Vol. 109. – P. 131–143.
9. Precast concrete value engineering accommodates difficult sites / P. Hamill [et al.] // *PCI Journal*. – 2006. – Vol. 51, № 4. – P. 2–25.
10. Case study-based challenges of quality concrete finishing for architecturally complex structures / J. D. Manrique [et al.] // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2007. – Vol. 133, № 3. – P. 208–216.
11. Towards adoption of prefabrication in construction / V.W.Y. Tam [et al.] // *Building and Environment*. – 2007. – Vol. 42, № 10. – P. 3642–3654.
12. VanGeem, M. Achieving sustainability with precast concrete / M. VanGeem // *PCI Journal*. – 2006. – Vol. 51, № 1. – P. 42–61.
13. Application of Sustainable Prefabricated Wall Technology for Energy Efficient Social Housing / R. Chippagiri [et al.] // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13, № 3. – P. 1195.
14. Гуринович, В. Ю. Мониторинг работы и определение оптимальных технологических параметров линий циркуляции паллет / В. Ю. Гуринович, Д. А. Поздняков, С. Н. Леонович // *Строительные материалы*. – 2022. – № 3. – С. 4–9.
15. Леонович, С. Н. Технологическое проектирование реконструкции действующих заводов КРД: проблемы и решения / С. Н. Леонович, В. Ю. Гуринович // *Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 28 мая 2019 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 379–395.*
16. О Государственной комплексной программе развития материально-технической базы строительной отрасли на 2006-2010 годы: государственная комплексная программа развития материально-технической базы строительной отрасли на 2006–2010 годы: утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 1 сентября 2006 г. N 1118: ред. от 23.04.2009.

References

1. A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings [Electronic resource] / Wenhui Liu [et al.] // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 2021. – Mode of access: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2021/8869315>. – Date of access: 18.02.2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8869315>.
2. Azman, M.N.A. Comparative Study on Prefabrication Construction Process / M.N.A. Azman, M.S.S. Ahamad, W.M.A. Wan Hussin // *International Surveying Research Journal*. – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. 45–58.
3. Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis / M. R. Hosseini [et al.] // *Automation in Construction*. – 2018. – Vol. 87. – P. 235–247.
4. Polat, G. Precast concrete systems in developing vs. industrialized countries / G. Polat // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2010. – Vol. 16, № 1.
5. Research and Markets: The Global Prefabricated Buildings Market - Key Trends and Opportunities to 2017 [Electronic resource] // *Business Wire*. – 2014. – January 23. – Date of access: <http://www.businesswire.com/news/home/20140123005>.
6. Vogler A. *The House as a Product* / A. Vogler. – Amsterdam : IOS Press, 2015. – 198 p.
7. Alinaitwe, H. M. Assessing the degree of industrialisation in construction – A case of Uganda / H. M. Alinaitwe, J. A. Mwakali, B. Hansson // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2006. – Vol. 12, № 3. – P. 221–229.
8. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in china / X. Cao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Vol. 109. – P. 131–143.
9. Precast concrete value engineering accommodates difficult sites / P. Hamill [et al.] // *PCI Journal*. – 2006. – Vol. 51, № 4. – P. 2–25.
10. Case study-based challenges of quality concrete finishing for architecturally complex structures / J. D. Manrique [et al.] // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2007. – Vol. 133, № 3. – P. 208–216.
11. Towards adoption of prefabrication in construction / V.W.Y. Tam [et al.] // *Building and Environment*. – 2007. – Vol. 42, № 10. – P. 3642–3654.
12. VanGeem, M. Achieving sustainability with precast concrete / M. VanGeem // *PCI Journal*. – 2006. – Vol. 51, № 1. – P. 42–61.
13. Application of Sustainable Prefabricated Wall Technology for Energy Efficient Social Housing / R. Chippagiri [et al.] // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13, № 3. – P. 1195.
14. Gurinovich, V. Yu. Monitoring raboty i opredelenie optimal'nyh tekhnologicheskikh parametrov linij cirkulyacii pallet / V. Yu. Gurinovich, D. A. Pozdnyakov, S. N. Leonovich // *Stroitel'nye materialy*. – 2022. – № 3. – С. 4–9.
15. Leonovich, S. N. Tekhnologicheskoe proektirovanie rekonstrukcii dejstvuyushchih zavodov KPD: problemy i resheniya / S. N. Leonovich, V. YU. Gurinovich // *Problemy sovremennogo stroitel'stva: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Minsk, 28 maya 2019 g. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet; redkol.: V. F. Zverev, S. M. Koleda. – Minsk : BNTU, 2019. – S. 379–395.*
16. О Государственной комплексной программе развития материально-технической базы строительной отрасли на 2006-2010 годы: государственная комплексная программа развития материально-технической базы строительной отрасли на 2006–2010 годы: утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 1 сентября 2006 г. N 1118: ред. от 23.04.2009.

Материал поступил 28.07.2022, одобрен 06.10.2022, принят к публикации 06.10.2022

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ХВОСТОВЫХ ЧАСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН НАГРУЗКИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ

С. С. Дереченник¹, Н. Н. Мешечек²

¹К. т. н., доцент, заведующий кафедрой электронно-вычислительных машин и систем,
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ssderechennik@gmail.com

²Аспирант, старший преподаватель кафедры электронно-вычислительных машин и систем
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: meshechek88@gmail.com

Реферат

Полувероятностный метод расчета не обеспечивает адекватного проектирования конструкций с точки зрения обоснованного выбора «проектной» (расчетной) точки.

Предлагаемый путь преодоления названной проблемы – решение задачи анализа функции состояния не во всей области ее определения, а лишь для условия $X = R - E < 0$, что соответствует интервалу перекрытия вероятностных функций распределения нагрузки $g(E)$ и сопротивления $g(R)$. Рассматривается увеличенный фрагмент дифференциальных вероятностных распределений случайных величин нагрузки и сопротивления. Дополнительно рассматривается распределение условной вероятности $g(R | X < 0)$, которое соответствует условию отказа.

Положение максимума (моды) вероятностной функции распределения $g(R | X < 0)$ однозначно определяет наиболее вероятную комбинацию случайных величин E и R , таких, что $R < E$, и ее положение наилучшим образом соответствует смыслу расчетной точки конструкции.

Ключевые слова: нагрузка, сопротивление, условие отказа, приближение.

SOLVING THE PROBLEM OF ANALYZING THE STATE FUNCTION BASED ON THE APPROXIMATION OF THE TAIL PARTS OF THE DISTRIBUTIONS OF RANDOM VARIABLES LOADS AND RESISTANCES

S. S. Derechennik, N. N. Meshechek

Abstract

The semi-probabilistic calculation method does not provide an adequate design of structures in terms of a reasonable choice of a “design” (calculated) point.

The proposed way to overcome this problem is to solve the problem of analyzing the state function not in the entire domain of its definition, but only for the condition $X = R - E < 0$, which corresponds to the interval of overlapping of the probabilistic functions of load $g(E)$ and resistance distribution $g(R)$. An enlarged fragment of differential probability distributions of load and resistance random variables is considered. Additionally, the conditional probability distribution is considered $g(R | X < 0)$, which corresponds to the failure condition.

The position of the maximum (mode) of the probability distribution function $g(R | X < 0)$ uniquely determines the most probable combination of random variables E and R , such that $R < E$, and its position in the best way corresponds to the meaning of the calculated design point.

Keywords: load, resistance, failure condition, approximation.

Введение

При проектировании строительных конструкций очень важно установить соответствие расчетной модели действительной работе конструкций в эксплуатации и правильно учитывать изменчивость случайных факторов. Расчет начинается с анализа структурной схемы сооружения и распределений его сопротивления R и внешних нагрузок E . Отсутствие отказов характеризуется тем, что усилия от нагрузок E не превышают несущую способность R .

В силу случайной природы несущей способности и нагрузок условие не может быть выполнено абсолютно точно. Оно соблюдается с некоторой вероятностью, достаточно близкой к единице, в течение срока службы сооружения. По мере развития теории надежности предлагались различные методы расчета надежности строительных конструкций.

Решение задачи анализа функции состояния для условия превышения нагрузкой несущей способности

Большинство исследователей отмечают, что случайные величины E и R , строго говоря, не имеют нормального (гауссова) распределения. Действительно, трудно ожидать, например, что сумма E нормально распределенной нагрузки G со сравнительно небольшой вариацией и переменной нагрузки Q_{50} того же порядка величины, но с распределением Гумбеля и заметно большей вариацией (коэффициент вариации 0,35), будет иметь нормальный (или хотя бы достаточно близкий к нему) закон распределения. Что же касается случайной величины R прочности конструкции, то, во-первых, она формируется не только суммированием, но также и перемножением базовых переменных (размеров сечения колонны b и h с прочностями f_c и f_t бетона и арматуры). Во-вторых, прочности бетона и арматуры, в общем случае, могут иметь различные

функции распределения (например, нормальное и логнормальное). В результате и прочность конструкции также не будет иметь нормального вероятностного распределения.

При этом следует отметить, что полувероятностный метод расчета изначально основывается на предположении о нормальном (либо близком к нему) вероятностном распределении нагрузки, сопротивления и функции состояния конструкции. Поэтому запасы по несущей способности конструкции при расчете полувероятностным методом и при вероятностно-статистическом моделировании являются неизбежным следствием существенного отличия распределений $g(E)$ и $g(R)$, а следовательно, и $g(X)$, от нормального.

Отклонение случайных величин от нормального распределения порождает необходимость введения некоторых калиброванных коэффициентов ($\gamma_G, \gamma_Q, \gamma_S$ и γ_R), гарантирующих за счет создания весьма ощутимых конструктивных запасов достижение целевой надежности (запас по вероятности отказа при этом, как указано выше, также весьма существенен). С другой стороны, несмотря на такие конструктивные запасы, фактически достигаемый индекс надежности ($\beta = 3,87$) почти соответствует заданному значению ($\beta = 3,8$), однако задаваемое значение индекса надежности само по себе явно завышено (для фактического распределения функции состояния) [1].

В итоге полувероятностный метод расчета (метод частных коэффициентов) не обеспечивает адекватного проектирования конструкций с точки зрения обоснованного выбора «проектной» (расчетной) точки: по нагрузке и по сопротивлению. Иными словами, ее положение фактически является неопределенным.

Предлагаемый путь преодоления названных проблем – решение задачи анализа функции состояния не во всей области ее определения, а лишь для условия $X = R - E < 0$, что соответствует интервалу перекрытия функций $g(E)$ и $g(R)$. На рисунке 1 приведен увеличенный фрагмент дифференциальных вероятностных распределений случайных величин нагрузки и сопротивления, а также кумулянта $C_E = 1 - G(E)$ интегральной функции вероятности нагрузки, соответствующие рассматриваемому примеру. Дополнительно на этом рисунке представлено распределение условной вероятности $g(R | X < 0)$, которое соответствует условию отказа (таким комбинациям нагрузки и сопротивления, что $E > R$). Поскольку данное распределение является парциальным (частью) от распределения двух случайных величин E и R (т. е. всех возможных комбинаций нагрузки и сопротивления), оно не является нормированным, а для наглядности оно представлено в существенно увеличенном масштабе в другой (правой) шкале ординат.

Обратим внимание на положение максимума (моды) вероятностной функции $g(R | X < 0)$, которое составляет примерно 4,5...4,6 МН.

Поскольку мода этого распределения определяет наиболее вероятную комбинацию случайных величин E и R , таких, что $E > R$, ее положение наилучшим образом соответствует смыслу «проектной» (расчетной) точки конструкции.

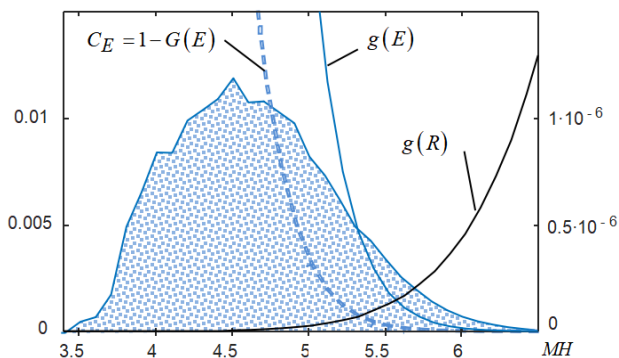


Рисунок 1 — Пример вероятностных функций распределения нагрузки и сопротивления (в области их перекрытия), а также распределение вероятности, соответствующее условию отказа конструкции

Как известно, вероятность отказа конструкции для некоторого значения сопротивления в узком интервале $[r, r + dr]$ составляет $p_f(r) = (1 - G(r)) \cdot f_R(r) = C_E(r) \cdot f_R(r)$, (1) а полная вероятность отказа:

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} p_f(r) dr = \int_{-\infty}^{+\infty} C_E(r) \cdot f_R(r) dr. \quad (2)$$

Заметим, что выражение (1) соответствует вычислению условной вероятности $g(R = r | X < 0)$ как произведения кумулянты $C_E(E)$ и дифференциальной функции $g(R)$. Фактический вид функции $g(R | X < 0)$, которая показана на рисунке 1, позволяет ограничить пределы интегрирования (в области перекрытия перемножаемых функций) некоторыми значениями E_{max} и R_{min} , такими, что $C_E(E > E_{max})$ и $g(R < R_{min})$ будут пренебрежимо малы (например, менее 10^{-4} , тогда $p_f < 10^{-8}$). Тогда приближенное значение полной вероятности отказа определяем как

$$P_f = \int_{R_{min}}^{E_{max}} p_f(r) dr = \int_{R_{min}}^{E_{max}} C_E(r) \cdot f_R(r) dr. \quad (3)$$

С другой стороны, полная вероятность отказа может быть определена как интеграл от произведения дифференциальной функции $g(E)$ и интегральной функции $G(r)$:

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} g_E(r) \cdot G_R(r) dr. \quad (4)$$

Пусть нагрузка на конструкцию (по крайней мере, в области высоких ее значений, т. е. правого хвоста распределения) имеет распределение Гумбеля с интегральной функцией [2]:

$$G_E(r) = \exp\{-\exp(a - b \cdot r)\}. \quad (5)$$

что соответствует линейной зависимости в двойной логарифмической (применительно к вероятности G) шкале, имеющей вид: $a - b \cdot r = -\ln(-\ln G)$, при этом знак «минус» при коэффициенте $b > 0$ означает уменьшение вероятности отказа при увеличении сопротивления. Определим кумулянту распределения нагрузки:

$$C_E(r) = 1 - G_E(r) = 1 - \exp\{-\exp(a - b \cdot r)\}. \quad (6)$$

В области малых значений C_E (на правом хвосте вероятностного распределения нагрузки), а значит, малого показателя степени в правой части (6), воспользуемся известным математическим приближением $e^y; 1 + y$, тогда:

$$G_E^-(r) = 1 - \exp(a - b \cdot r), C_E^-(r) = \exp(a - b \cdot r). \quad (7)$$

Приближение дифференциальной функции распределения:

$$g_E^-(r) = dG_E^-(r) / dr = b \cdot \exp(a - b \cdot r). \quad (8)$$

Пусть также имеется некоторое распределение случайной величины сопротивления, например, распределение Вейбулла (в т. н. «зеркальном» варианте, т. е. для рассмотрения левого хвоста) [2]:

$$G_R(r) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{r - \xi}{\lambda}\right)^\beta\right\}, \quad (9)$$

где ξ и λ – соответственно параметры смещения и масштаба случайной величины ($\xi, \lambda > 0, \beta > 0$).

В области малых значений G_R (на левом хвосте вероятностного распределения сопротивления) воспользуемся аналогичным математическим приближением $\ln(1 + y); y$, тогда

$$\ln(1 - G_R(r)) = -\left(\frac{r - \xi}{\lambda}\right)^\beta = -G_R^-(r). \quad (10)$$

Окончательно приближение интегральной функции распределения сопротивления: $G_R^-(r) = \left(\frac{r - \xi}{\lambda}\right)^\beta$.

Путем дифференцирования выражения (10) найдем приближенное значение функции плотности вероятности для случайной величины сопротивления:

$$g_R^-(r) = \frac{\beta}{\lambda} \cdot \left(\frac{r - \xi}{\lambda}\right)^{\beta-1}. \quad (11)$$

Подставляя (7) и (11) в выражение (1), найдем приближенное значение вероятности отказа конструкции для узкого интервала $[r, r + dr]$:

$$p_f^-(r) = C_E^-(r) \cdot f_R^-(r) = e^{a-b \cdot r} \cdot \frac{\beta}{\lambda^\beta} \cdot (r - \xi)^{\beta-1}. \quad (12)$$

Для нахождения моды вероятностной функции $g(R | X < 0)$ необходимо вычислить абсциссу локального экстремума функции (12) либо некоторой другой функции, монотонно связанной с ней. В данном случае удобно вычислять положение экстремума функции

$\ln p_f^-(r)$:

$$\frac{d[\ln p_f^-(r)]}{dr} = [a - b \cdot r + \ln \beta - \beta \ln \lambda + (\beta - 1) \ln(r - \xi)]'_r = -b + \frac{\beta - 1}{r - \xi} = 0, \quad (13)$$

откуда

$$r^* = \xi + (\beta - 1) / b. \quad (14)$$

С другой стороны,

$$p_f^-(r) = g_{E^-}(r) \cdot G_R^-(r) = b \cdot e^{a-b \cdot r} \cdot \lambda^{-\beta} (r - \xi)^\beta. \quad (15)$$

Экстремум:

$$\frac{d[\ln p_f^-(r)]}{dr} = [\ln b + a - b \cdot r - \beta \ln \lambda + \beta \ln(r - \xi)]'_r = -b + \frac{\beta}{r - \xi} = 0; \quad (16)$$

$$r^{**} = \xi + \beta / b, \Delta r^* = r^{**} - r^* = 1 / b = const.$$

Таким образом, мода распределения вероятностной функции $g(R | X < 0)$, соответствующая наиболее вероятным комбинациям параметров по условию отказа, однозначно определяется параметрами b , ξ и β линейных (в соответствующих логарифмических координатах) приближения (7) правого хвоста интегрального распределения нагрузки и приближения (11) левого хвоста плотности распределения сопротивления конструкции. Найденную величину r^* предлагается считать проектной (расчетной) точкой конструкции.

Обратим внимание, что в выражении (13) отсутствуют параметры a и λ принятых приближений. Однако здесь нет каких-либо противоречий.

Во-первых, как было показано ранее [3] при анализе характеристической прочности бетона в ее взаимосвязи со средней надежностью конструкции, значение параметра a влияет только лишь на абсолютную величину вероятности отказа, на значение же характеристической прочности бетона, обеспечивающей целевую надежность конструкции, влияет только лишь величина коэффициента, аналогичного коэффициенту b .

Во-вторых, параметр масштаба λ , определяющий единицу измерения сопротивления (для приведения к безразмерному показателю степени в (7) – например, 1 МН, 50 кН, или любая иная величина), неявно присутствует в параметре сдвига ξ , измеряемом в тех же единицах [4].

Выполним приближение хвостовых частей распределений на рассматриваемом примере. Для этого по результатам численного моделирования (генерации наборов данных) найдем положение нескольких квантилей распределений $g(E)$ и $g(R)$.

Так, например, квантили уровней 0.90, 0.95, 0.98, 0.99, 0.995 и 0.999 функции $g(E)$ (соответственно, значения 0.10, 0.05, 0.02, 0.01, 0.005, 0.001 кумулянты $C(E) = 1 - g(E)$) составляют 4.19, 4.40, 4.64, 4.81, 4.97 и 5.31 МН. Полученный набор данных аппроксимируется линейной функцией $\ln C_E^-(r) = 15.063 - 4.1102 \cdot r$ (т. е. $a = 15.063$ и $b = 4.1102 \text{ МН}^{-1}$) с достоверностью $R^2 = 0.9951$.

Если взять только квантили уровней 0.1, 0.05, 0.02 и 0.01, то $a = 13.326$ и $b = 3.7207 \text{ МН}^{-1}$.

Для распределения $g(R)$ квантили уровней 0.05, 0.02, 0.01, 0.005, 0.001, 0.0005 и 0.0001 составляют соответственно: 7.66, 7.11, 6.76, 6.45, 5.83, 5.59 и 5.11 МН.

Из выражения (10) находим $r = \xi + \lambda \cdot G_R^-(r)^{1/\beta}$. Примем величину смещения равной минимальному значению случайной величины сопротивления конструкции $\xi = \min E = 3.0 \text{ МН}$, после чего выполним аппроксимацию данных степенной функцией

$r = 3.0 + 6.746 \cdot G_R^-(r)^{0.126}$ (т. е. $\lambda = 6.7457 \text{ МН}$ и $\beta = 7.9365$) с достоверностью $R^2 = 0.9998$.

Если взять только квантили уровней 0.05, 0.02, 0.01, 0.005 и 0.001 – то $\lambda = 6.7491 \text{ МН}$ и $\beta = 7.9051$.

Согласно (14) мода условного распределения функции $g(R | X < 0)$ составляет

$$r^* = 3.0 + (7.9365 - 1) / 4.1102 = 4.688 \text{ МН}$$

и практически соответствует фактическому значению, представленному на рисунке 1.

Значение функции $g(R | X < 0)$ в точке моды вычисляем:

$$\max p_f^- = p_f^-(r = r^*) = 1/1765 \cdot 10^{-6}$$

что также с приемлемой точностью соответствует рисунку 1.

Для нахождения полной вероятности отказа по (2) необходимо интегрировать выражение (12), однако точное вычисление такого интеграла сопряжено с определенными трудностями (сводится к рекуррентному интегрированию по частям). Тем не менее, можно вычислить величину P_f в первом приближении, используя, например, формулу Симпсона для определенного (на отрезке $[R_{\min}, E_{\max}]$) интеграла:

$$P_f = \frac{E_{\max} - R_{\min}}{3} \int_{R_{\min}}^{E_{\max}} p_f^-(r) dr, \quad (17)$$

выбирая при этом E_{\max} и R_{\min} так, чтобы $p_f^-(R_{\min})$ и $p_f^-(E_{\max})$ были пренебрежимо малыми величинами по сравнению со значением $\max p_f^-$. Обратим внимание, что мода распределения

$g(R | X < 0)$ расположена примерно посередине интервала $[R_{\min}, E_{\max}]$, тогда

$$P_f = \frac{2}{3} (E_{\max} - R_{\min}) \cdot \max p_f^- \quad (18)$$

Задаваясь (по рисунку 1, на уровне $p_f^- \geq 10^{-7}$) интервалом $[R_{\min}, E_{\max}] = [3.6 \text{ МН}, 5.9 \text{ МН}]$, получаем:

$$P_f = \frac{2}{3} (5.9 - 3.6) \cdot 1.28 \cdot 10^{-6} = 1.96 \cdot 10^{-6},$$

а именно: совпадающую с результатами численного моделирования величину полной вероятности отказа анализируемой конструкции.

Значения E_{\max} и R_{\min} можно вычислить из трансцендентного уравнения, вытекающего из (12), вида

$p_f^-(R_{\min}) = p_f^-(E_{\max}) = 0.1 \max p_f^- = 1.18 \cdot 10^{-7}$, путем его решения относительно r .

В рассматриваемом примере такое уравнение будет иметь два решения: $r_1 = R_{\min} = 3.66 \text{ МН}$ и $r_2 = E_{\max} = 6.46 \text{ МН}$.

При этом $P_f = 2.20 \cdot 10^{-6}$, что на 12.25 % превышает (т. е. отклоняется в сторону запаса надежности) значение, полученное в результате численного моделирования.

Заключение

В результате решения задачи анализа функции состояния для условия $X = R - E < 0$ что соответствует приближению хвостовых частей распределений случайных величин нагрузки и сопротивления, получили значение вероятности отказа конструкции, почти совпадающее со значением, полученным вероятно-статистическим моделированием [1]. Можно сделать вывод, что предложенный метод решения задачи также дает верный результат.

Список цитированных источников

1. Мешечек, Н. Н. Анализ вероятности отказа конструкции на основе приближения хвостовых частей распределений случайных величин нагрузки и сопротивления / Н. Н. Мешечек, С. С. Дереченник // Цифровая среда: технологии и перспективы: сборник материалов Международной научно-практической конференции; Брест, 31 октября 2022 года / Редкол. : Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 57–60.
2. Шпете, Г. Надежность несущих строительных конструкций / Г. Шпете; перевод с нем. О. О. Андреева. – М. : Стройиздат, 1994. – 288 с.
3. Derechennik, S. S. Adaptive Estimation of the In Situ Characteristic Concrete Strength / S. S. Derechennik, V. V. Tur. // Solid State Phenomena. – 2019. Vol. 292. – P. 257–263.
4. Tur, V. V. Non-parametric evaluation of the characteristic in-situ concrete compressive strength / V. V. Tur, S. S. Derechennik // Journal of Building Engineering. – 2019. – Vol. 27. – P. 1–11.

References

1. Meshechek, N. N. Analiz veroyatnosti otkaaza konstrukcii na osnove priblizheniya hvostovykh chastej raspredelenij sluchajnykh velichin nagruzki i soprotivleniya / N. N. Meshechek, S. S. Derechennik // Cifrovaya sreda: tekhnologii i perspektivy: sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii; Brest, 31 oktyabrya 2022 goda / Redkol. : N. N. Shalobyta [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2022. – С. 57–60.
2. Shpete, G. Nadezhnost' nesushchih stroitel'nykh konstrukcij / G. Shpete; perevod s nem. O. O. Andreeva. – M. : Strojizdat, 1994. – 288 s.
3. Derechennik, S. S. Adaptive Estimation of the In Situ Characteristic Concrete Strength / S. S. Derechennik, V. V. Tur. // Solid State Phenomena. – 2019. Vol. 292. – P. 257–263.
4. Tur, V. V. Non-parametric evaluation of the characteristic in-situ concrete compressive strength / V. V. Tur, S. S. Derechennik // Journal of Building Engineering. – 2019. – Vol. 27. – P. 1–11.

Материал поступил 22.01.2023, одобрен 21.02.2023, принят к публикации 21.02.2023

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРИЗОВАННЫХ БЛОКОВ

В. Н. Деркач

Д. т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет»,
директор филиала РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.by

Реферат

В статье приведены результаты экспериментальных исследований деформационных характеристик каменных кладок из поризованных керамических блоков с пазогребневым соединением вертикальных швов. Исследования модуля упругости и модуля сдвига выполнялись на образцах каменной кладки, вертикальные швы которой были выполнены без заполнения и с заполнением раствором. Установлено, что отношение модуля сдвига к модулю упругости исследованных каменных кладок ниже значения, приведенного в нормах по проектированию каменных конструкций. Заполнении клеевым раствором вертикальных швов каменной кладки приводит к возрастанию модуля сдвига. Указано на необходимость корректировки положения нормативных документов, касающиеся деформационных характеристик каменных кладок из поризованных керамических блоков.

Ключевые слова: каменная кладка, керамические поризованные блоки, модуль сдвига, модуль упругости.

DEFORMATION CHARACTERISTICS OF MASONRY MADE OF CERAMIC POROUS BLOCKS

V. N. Derkach

Abstract

The article presents the results of experimental studies of the deformation characteristics of masonry made of porous ceramic blocks with groove connection system of vertical joints. Studies of the elastic modulus and shear modulus were carried out on specimens of masonry, the vertical joints of which were made without filling and with filling with mortar. It is established that the ratio of the shear modulus to the modulus of elasticity of the studied masonry is lower than the value given in the design codes of masonry structures. Filling the vertical joints of masonry with mortar leads to an increase in the shear modulus. It is indicated that it is necessary to adjust the provisions of the design codes concerning the deformation characteristics of masonry made of porous ceramic blocks.

Keywords: masonry, porous ceramic blocks, shear modulus, elastic modulus.

Введение

В инженерных расчетах каменная кладка обычно рассматривается как изотропный материал, модуль сдвига которого определяется по зависимости (1):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости каменной кладки;
 ν – коэффициент поперечной деформации.

Еврокод 6, а также отечественные нормы СП 5.01.02, устанавливающие требования к проектированию каменных и армокаменных конструкций, допускают принимать модуль сдвига G , равным 40 % кратковременного модуля упругости E . Последний определяют путем испытания образцов каменной на сжатии согласно стандарту СТБ EN 1052-1.

Кратковременный модуль упругости неармированной каменной кладки E является секущим модулем, его величина равна тангенсу угла наклона прямой, проходящей через точки диаграммы деформирования кладки, соответствующие ординатам $\sigma = 0$ и $\sigma = 0,33f$ (f – прочность на сжатие каменной кладки).

При отсутствии результатов испытаний кратковременный модуль упругости E каменной кладки при расчете каменных конструкций допускается определять умножением значения характеристической прочности на сжатие f_k на коэффициент K_E , принимаемый равным:

- для кладки, выполненной на кладочном растворе, прочностью на сжатие $f_m \geq 5$ МПа (за исключением кладки из кладочных изделий из автоклавного ячеистого бетона) – $K_E = 1000$;
- для кладки из кладочных изделий из автоклавного ячеистого бетона, а также кладки из других видов кладочных изделий на кладочном растворе прочностью на сжатие $f_m < 5$ МПа – $K_E = 600$.

Необходимо иметь в виду, что оценка модуля упругости каменной кладки по ее прочности на сжатие, без учета вида растворных

швов и качества выполнения каменной кладки, может приводить к значительным погрешностям.

В последнее время при возведении стенового ограждения широкое распространение получили каменные кладки из керамических поризованных блоков с профилированными боковыми гранями, образующими при возведении каменной кладки стыковое соединение «паз-гребень». При возведении таких кладок кладочным раствором заполняют только горизонтальные швы кладки, что существенно повышает производительность труда и снижает расход материалов. Известно, что отсутствие кладочного раствора в вертикальных швах кладки снижает ее прочность на сдвиг и растяжение, а также отражается на деформационных характеристиках кладки при сдвиге [1–5]. При этом нормы по проектированию каменных и армокаменных конструкций при определении модуля сдвига не делают различия между кладками с «сухими» пазогребневыми стыковыми соединениями кладочных изделий и кладками с вертикальными швами, заполненными кладочным раствором. Указанное обстоятельство определило необходимость проведения настоящих исследований.

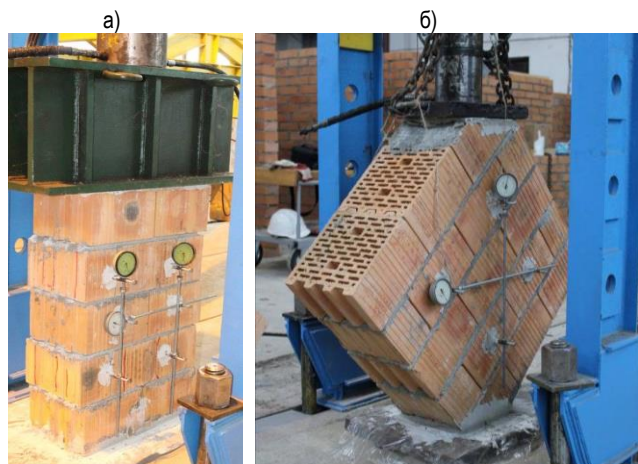
Методика экспериментальных исследований

С целью определения кратковременного модуля упругости E и модуля сдвига G были изготовлены и испытаны три серии опытных образцов каменной кладки из поризованных пустотелых пазогребневых керамических блоков размерами 250x250x138 мм на стандартных растворных швах.

Серия С-1 включала четыре образца каменной кладки, которые испытывались на сжатие перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов, согласно СТБ EN 1052-1, а серии ДС-1 и ДС-2 по три образца, испытываемых на диагональное сжатие в соответствии с RILEM TC [6]. Образцы серии С-1 и ДС-1 изготавливались со стыковым соединением керамических блоков «паз-гребень» без заполнения вертикальных швов раствором. В образцах серии ДС-2 стыковые соединения блоков были заполнены клеевым раствором для тонкослойных швов каменной кладки. Установленное в соответствии с СТБ EN 772-1 нормализованное значение прочности на сжатие

керамических блоков составило 13,0 МПа, а среднее значение прочности на сжатие затвердевшего кладочного раствора согласно СТБ EN 1015-11 – 15,3 МПа. После изготовления к каждому испытываемому образцу прикладывали предварительную вертикальную равномерно распределенную сжимающую нагрузку таким образом, чтобы сжимающие напряжения в сечении образца составляли около $2,5 \cdot 10^{-3}$ МПа. В нагруженном состоянии укрытые полиэтиленовой пленкой образцы хранились до испытания в течении 28 суток при температуре +15...20 °С и влажности воздуха 60...70 %.

Общий вид опытных образцов каменной кладки с установленными измерительными приборами показан на рисунке 1.



а) испытание на сжатие перпендикулярно плоскости горизонтальных швов;
б) испытание на диагональное сжатие

Рисунок 1 – Общий вид опытных образцов каменной кладки

Образцы, приведенные на рисунке 1а, испытывались осевой сжимающей нагрузкой, действующей перпендикулярно направлению горизонтальных растворных швов, и доводились до разрушения.

Прочность на сжатие отдельного испытываемого образца рассчитывалась по формуле (5):

$$f_{obs,i} = \frac{F_{i,max}}{A_i}, \quad (2)$$

где $F_{i,max}$ – максимальная нагрузка воспринимаемая образцом каменной кладки;

A_i – площадь поперечного сечения образца.

Кратковременный модуль упругости E_i определялся по формуле (3) как секущий модуль при среднем значении относительной деформации ε_i , измеренной в двух точках и нагрузке, равной одной трети разрушающей нагрузки $F_{i,max}$.

$$E_i = \frac{F_{i,max}}{3\varepsilon_{yi} A_i}, \quad (3)$$

где $F_{i,max}$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая образцом каменной кладки;

A_i – площадь поперечного сечения образца;

ε_{yi} – относительные продольные деформации.

Модуль сдвига G определялся на образцах кладки, подвергнутых сжатию сосредоточенной силой, приложенной под углом 45° к горизонтальным растворным швам (рисунок 1б). На основании испытаний определялись разрушающие касательные напряжения τ_s (МПа) по формуле (4):

$$\tau_s = \frac{0,707P}{A_s}, \quad (4)$$

где P – разрушающая нагрузка (Н);

A_s – площадь образца (мм²), определяемая по формуле (5):

$$A_s = \left(\frac{w+h}{2} \right) \cdot t \cdot n, \quad (5)$$

где w – ширина образца (мм),

h – высота образца (мм),

t – суммарная толщина образца (мм),

n – коэффициент, учитывающий пустотность кладочных элементов.

Относительные деформации сдвига γ рассчитывались по формуле (6), модуль сдвига G (МПа) – по формуле (7):

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g}, \quad (6)$$

где ΔV – деформации сжатия по вертикали (мм);

ΔH – деформации растяжения по горизонтали (мм);

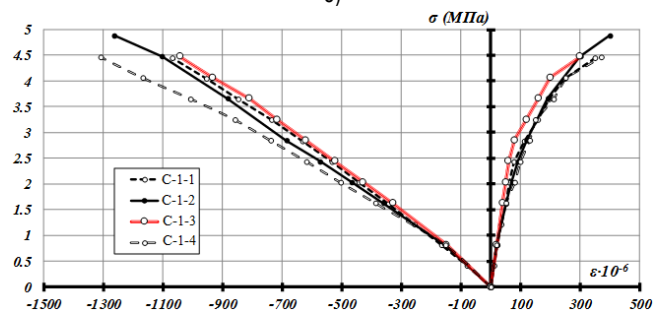
g – расстояние по вертикали между индикаторами перемещений (мм).

$$G = \frac{\tau_s}{\gamma}. \quad (7)$$

Результаты экспериментальных исследований

При нагружении образцов серии С-1 первые трещины возникали при нагрузках F_{crs} , составляющих 45–60 % от разрушающей нагрузки F_{max} . На лицевой поверхности трещины в блоках образовывались в местах их пересечения стыковыми швами. При увеличении нагрузки происходило образование и развитие трещин в вертикальном направлении как на лицевой, так и на боковых гранях образцов. Разрушение образцов каменной кладки происходило хрупко вследствие раздробления керамических блоков.

Характер разрушения и диаграммы деформирования опытных образцов каменной кладки серии С-1 показаны на рисунке 2.



а) характер разрушения опытных образцов;

б) графики зависимости « $\sigma_{obs} - \varepsilon_{obs}$ »

Рисунок 2 – Результаты испытаний образцов серии С-1

По результатам испытаний среднее характеристическое значение прочности на сжатие каменной кладки f_k составило 5,3 МПа, а среднее значение кратковременного модуля упругости $E - 4400$ МПа. Соответственно, экспериментальное значение коэффициента $K_{E,obs} = E/f_k = 4400/5,3 = 850$, что несколько ниже значения K_E , установленного в нормативных документах. Среднее значение коэффициента поперечных деформаций каменной кладки ν_{obs} при уровне сжимающих напряжений $\sigma = 1/3f$ составило 0,14. Согласно действующим нормам по проектированию каменных конструкций при $G = 0,4E$ значение коэффициента поперечных деформаций должно быть равным 0,25.

Значения деформационных характеристик каменной кладки, полученные по результатам испытаний опытных образцов серии С-1, приведены в таблице 1.

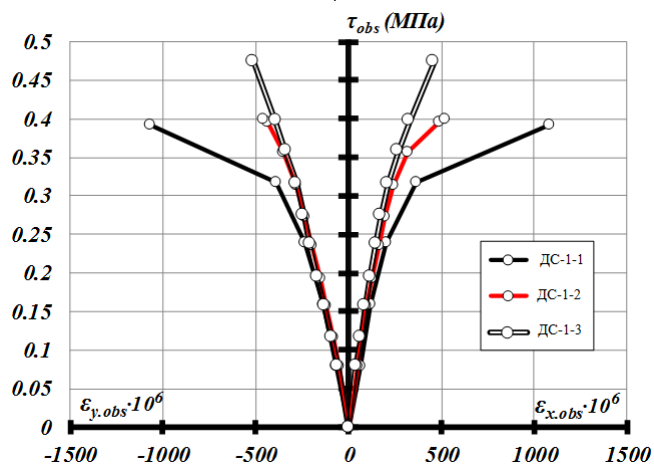
Таблица 1 – Деформационные характеристики каменной кладки образцов серии С-1

№ серии	№ образца	Модуль упругости $E_{obs,i}$ МПа	Коэффициент Пуассона $\nu_{obs,i}$	$K_{E_{obs,i}}$
С-1	С-1-1	4600	0,14	850
	С-1-2	4400	0,15	910
	С-1-3	4700	0,12	830
	С-1-4	4000	0,16	790
Среднее арифметическое		4400	0,14	850

Разрушение образцов каменной кладки серии ДС-1 имело пластический характер и происходило в результате их раскалывания по зигзагообразной траектории, проходящей по вертикальным и горизонтальным швам при значениях касательных напряжений $\tau_{max} = 0,39-0,47$ МПа. Характер разрушения опытных образцов и графики зависимости «касательные напряжения τ_{obs} – относительные деформации в горизонтальном $\epsilon_{x,obs}$ и вертикальном направлениях $\epsilon_{y,obs}$ » приведены на рисунке 3.



а)



а) характер разрушения опытных образцов;
б) графики зависимости « $\tau_{obs} - \epsilon_{obs}$ »

Рисунок 3 – Результаты испытаний образцов серии ДС-1

Анализ диаграмм деформирования каменной кладки (рисунок 3б) показывает, при увеличении касательных напряжений τ_{obs} до уровня примерно $0,7\tau_{max}$ каменная кладка работала практически упруго как в направлении линии действия сжимающей нагрузки, так и в ортогональном к ней направлении. При этом предельные значения угла сдвиговых деформаций γ_{max} составило около 1 мм/м. Среднее значение модуля сдвига G_{obs} при $\tau_{obs} = 0,3\tau_{max}$ было равно 620 МПа.

Значения деформационных характеристик каменной кладки, полученные по результатам испытаний опытных образцов серии ДС-1, приведены в таблице 2.

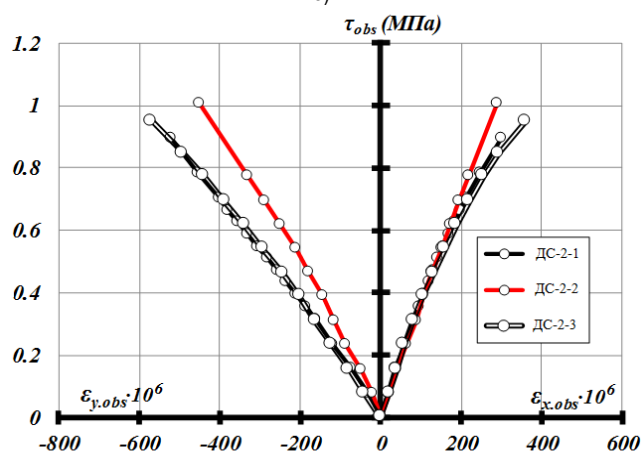
Таблица 2 – Деформационные характеристики каменной кладки образцов серии ДС-2

№ серии	№ образца	Предельные значения угла сдвиговых деформаций, $\gamma_{obs,i}$ (мм/м)	Модуль сдвига при $\tau_{obs}=0,3\tau_{max}$, $G_{obs,i}$ (МПа)
ДС-1	ДС-1-1	-	543
	ДС-1-2	0,98	650
	ДС-1-2	0,97	656
Среднее арифметическое		0,975	620

Разрушение образцов серии ДС-2 происходило хрупко в результате их раскалывания по диагонали при значениях касательных напряжений, в два раза превышающих значения τ_{max} образцов серии ДС-1. При этом вплоть до разрушения опытных образцов сохранялась пропорциональность между приращением касательных напряжений и относительных деформаций в каменной кладке. Характер разрушения и диаграммы деформирования образцов каменной кладки серии ДС-2 приведены на рисунке 4.



а)



а) характер разрушения опытных образцов;
б) графики зависимости « $\tau_{obs} - \epsilon_{obs}$ »

Рисунок 4 – Результаты испытаний образцов серии ДС-2

Среднее значение модуля сдвига G_{obs} при $\tau_{obs} = 0,3\tau_{max}$ образцов серии ДС-2 оказалось в два раза выше, чем образцов серии ДС-1. При этом среднее значение предельного угла сдвиговых деформаций каменной кладки γ_{max} образцов серии ДС-2 составило 0,83 мм/м, что на 15 % ниже, чем образцов серии ДС-1. Экспериментальные значения деформационных характеристик каменной кладки образцов серии ДС-2 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Деформационные характеристики каменной кладки образцов серии ДС-2

№ серии	№ образца	Предельные значения угла сдвиговых деформаций, $\gamma_{obs,i}$ (мм/м)	Модуль сдвига при $\tau_{obs} = 0,3\tau_{max}$, $G_{obs,i}$ (МПа)
ДС-2	ДС-2-1	0,82	1194
	ДС-2-2	0,74	1475
	ДС-2-2	0,93	1184
Среднее арифметическое		0,83	1280

Из таблиц 1, 2, 3 следует, что отношение модуля сдвига G к модулю упругости E каменной кладки со стыковым соединением керамических блоков «паз-гребень» ниже значения 0,4, установленного в нормативных документах. Если стыковые соединения керамических блоков не заполнены раствором, то $G/E = 0,14$. В случае заполнения стыковых соединений блоков клеевым раствором $G/E = 0,29$.

Заключение

На основании изложенного можно заключить, что положения нормативных документов, касающиеся деформационных характеристик каменных кладок, требуют корректировки в части определения модуля сдвига кладок из керамических поризованных пазогребневых блоков. По результатам экспериментальных исследований отношение G/E для указанных кладок оказалось на 185 % ниже нормируемого значения при незаполненных раствором стыковых соединениях между блоками и на 40 % ниже в случае заполнения стыковых соединений клеевым раствором. Неучет данного фактора может приводить к ошибкам при проверке предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности работающего на сдвиг стенового ограждения.

Список цитированных источников

1. Грановский, А. В. О применении крупноформатных керамических многоспустотных камней при возведении зданий в различных регионах, включая сейсмоопасные / А. В. Грановский [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 4. – С. 52–55.
2. Деркач, В. Н. Деформационные характеристики каменной кладки в условиях плоского напряженного состояния / В. Н. Деркач // Строительство и реконструкция. – Орел: ОрелГТУ, 2012. – № 2 (40). – С. 3–11.
3. Kubica, J. Mechanika muru obciążonego w swej płaszczyźnie. Monografie Politechniki Śląskiej / J. Kubica. – Gliwice, 2011. – 382 p.
4. Семенцов, С. А. Теория расчета каменной кладки на изгиб при работе по неперевязанным сечениям / С. А. Семенцов // Исследования по каменным конструкциям: сб. науч. ст. / ЦНИПС; под науч. ред. Л. И. Онищика. – М., 1949. – С. 105–125.
5. Drobiec, L. Mury poddane zginaniu w ujęciu normy PN-EN 1996-1-1:2006 / Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk // Materiały budowlane. – 2009. – № 440. – S. 1–5.
6. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM: RILEM LUMB6 1991. – Bruxelles: TC76-LUM, 1991. – 5 p.

References

1. Granovskij, A. V. O primenenii krupnoformatnyh kera-micheskikh mnogopustotnyh kamnej pri vozvedenii zdaniy v razlichnyh regionah, vključaya sejsmoopasnye / A. V. Granovskij [i dr.] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – № 4. – S. 52–55.
2. Derkach, V. N. Deformacionnye harakteristiki kamennoj kladki v usloviyah ploskogo napryazhennogo sostoyaniya / V. N. Derkach // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – Orël: OrëlGTU, 2012. – № 2 (40). – S. 3–11.
3. Kubica, J. Mechanika muru obciążonego w swej płaszczyźnie. Monografie Politechniki Śląskiej / J. Kubica. – Gliwice, 2011. – 382 p.
4. Semencov, S. A. Teoriya rascheta kamennoj kladki na izgib pri rabote po neperevyazannym secheniyam / S. A. Semencov // Issledovaniya po kamennym konstrukciyam: sb. nauch. st. / CNIPS; pod nauch. red. L. I. Onishchika. – M., 1949. – S. 105–125.
5. Drobiec, L. Mury poddane zginaniu w ujęciu normy PN-EN 1996-1-1:2006 / Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk // Materiały budowlane. – 2009. – № 440. – S. 1–5.
6. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM: RILEM LUMB6 1991. – Bruxelles: TC76-LUM, 1991. – 5 p.

Материал поступил 23.01.2023, одобрен 23.01.2023, принят к публикации 23.01.2023

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТИ И ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОНОЛИТНЫХ ПЛИТ НА ОСНОВАНИИ

А. Е. Желткович¹, В. В. Молош², К. Г. Пархоц³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры прикладной механики
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gelpek@mail.ru

² К. т. н., доцент, доцент кафедры прикладной механики
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: m.vic@rambler.ru

³ Инженер-программист, Беларусь, e-mail: konstantinparhoc@gmail.com

Реферат

В статье проиллюстрирована возможность конвергенции механики, нейротехнологии и биоподобных технологий. Показана возможность применения мягких вычислений (soft-computing) в задачах, связанных с проектированием. В работе представлены результаты самонапряжений в плите, на основании полученных данных с помощью нейросети, объединённой в систему с генетическим алгоритмом. Рассмотрена возможность оптимизации геометрических параметров плиты при заданных или изменяемых входных данных (прочность, самонапряжение, и др.) путем включения/отключения искусственных генетических признаков. Показано, что для описания состояния конструкции, где кинетика формирования бетонной структуры подчиняется нелинейным зависимостям, применение нейротехнологий и генетических алгоритмов наиболее оправдано.

В статье описан процесс разработки нейронной сети и генетического алгоритма, обсуждается вопрос качества полученных решений.

Ключевые слова: генетический алгоритм, мягкие вычисления, хромосомы, гены, функция приспособленности, самонапряженный бетон, нейронные сети.

APPLICATION OF A NEURAL NETWORK AND GENETIC ALGORITHM IN THE DESIGN OF MONOLITHIC SLABS ON A BASE

A. E. Zheltkovich, V. V. Molosh, K. G. Parchotz

Abstract

The article illustrates the possibility of convergence of mechanics, neurotechnology, and biosimilar technologies. The possibility of applying soft-computing to design-related tasks is shown. The work presents the results of self-stresses in the slab on ground obtained using a neural network combined into a system with a genetic algorithm. The possibility of optimizing the geometric parameters of the slab at the given or variable input parameters (strength, self-stress, etc.) by turning on/off artificial genetic features is considered. It has been shown that to describe the state of the structure, where the kinetics of the formation of the concrete structure obeys nonlinear behaviors, the use of neurotechnologies and genetic algorithms is most justified. The article describes the process of developing a neural network and a genetic algorithm, discusses the quality of the solutions obtained.

Keywords: genetic algorithm, soft computing, chromosomes, genes, fitness function, self-stressed concrete, neural networks.

Мягкие или жесткие решения?

На протяжении многих лет в инженерной науке жёсткие вычисления (hard-computing) находили самое широкое применение. Среди многих инженеров по сей день существует устойчивый стереотип, что метод классических вычислений столь надёжен и эффективен, что преждевременно даже обсуждать альтернативы. Но так ли он безальтернативен с позиции эффективности? В таблице 1 [1] приведен краткий перечень основных характеристик жестких и получающих всё более широкое применение мягких методов вычислений.

Таблица 1 – Перечень характеристик мягких и жёстких методов вычислений

Мягкие вычисления*	Жесткие вычисления
свободны от неточностей, неопределенностей, частичной истины и приближения	нуждаются в модели анализа состояний
опираются на формальную логику и вероятностные подходы	полагаются на двоичную логику «false-true» и четкую систему
имеют стохастический характер	детерминированы
работают с неоднозначными и зашумленными данными	работают с точными данными
могут выполнять параллельные вычисления	выполняют последовательные вычисления
дают приближительные результаты	дают точные результаты
вырабатывают свои собственные программы	требуют написания программ
*Мягкие вычисления (Soft Computing) – термин, введенный Лотфи Заде в 1994 году [2]	

«Жесткие вычисления – это тот древний подход, используемый в вычислениях, который требует от младшего [...] персонала точно заявленной аналитической модели. Результатом жесткого вычислительного подхода является гарантированный, установленный, правильный

результат (получаемый – ред.) [...] с использованием математической модели или алгоритмического правила [...]. Жесткие вычисления не способны найти решение реальной проблемы» [1]. Отметим, что применение соответствующих критериев соответствия обеспечит нахождение решения для некоторой абстрактной, математически идеализированной модели реальности, но не для самой реальности.

Традиционные методы вычислений, к которым, несомненно, относятся жесткие вычисления, подходят для решения многих прикладных задач, но их основной недостаток заключается в том, что они требуют большого количества времени и затрат на вычисления [3]. По этой причине мягкие вычисления являются лучшей альтернативой.

Согласно сложившемуся подходу, можно выделить следующие направления мягких вычислений:

1. Задачи с нечёткой логикой.
2. Задачи, решаемые при помощи нейронных сетей.
3. Эволюционное моделирование – использование теории Дарвина для построения интеллектуальных систем.
4. Задачи, решаемые с использованием теории хаоса или аппарата, описывающего поведение некоторых нелинейных динамических систем, подверженных при определённых условиях явлению, известному как хаос. Поведение такой системы кажется случайным, даже если модель, описывающая систему, является детерминированной [4]. Примерами подобных систем являются турбулентность в атмосфере, потоки плазмы, биологические процессы и другие. Сложные системы чрезвычайно зависимы от первоначальных условий, и небольшие изменения приводят к бифуркациям и фрактальным ветвлениям. При применении классических вычислений это ведёт к потере контроля над процессом.

В исследовании [5] указывается, что сущность мягких вычислений состоит в том, что, в отличие от традиционных, они нацелены на приспособление к всеобъемлющей неточности реального мира. Руководящим принципом мягких вычислений является: «терпимость к неточности, неопределенности и частичной истинности для достижения [...] лучшего согласия с реальностью».

Исследователям, работающим с нагружающими бетонами, вообще с конструкциями из искусственных материалов, к коим без сомнения относится бетон, должна быть хорошо понятна фраза: «Поведение [...] системы кажется случайным, даже если модель, описывающая систему, является детерминированной». По этой причине при исследовании нагружающего бетона, а затем в процессе проектирования плиты на основании с оптимальной высотой бетонного слоя были применены некоторые «soft-computing» методы (нейронная сеть, объединённая в систему с генетическим алгоритмом).

Если говорить о выборе оптимизационных алгоритмов при решении нелинейных задач, к коим относятся задачи, связанные с определением напряжённо-деформированного состояния (НДС) в конструкциях на нагружающем бетоне, то по эффективности работы генетический алгоритм (ГА) является достаточно универсальным (рисунк 1).

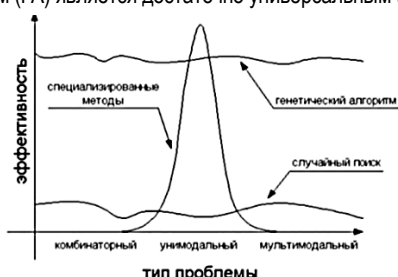


Рисунок 1 – Сравнительная эффективность алгоритмов оптимизации

1 Мягкие вычисления. Искусственная нейросеть

Подход, который использует вычислительные модели, имитирующие архитектурные, структурные или функциональные аспекты биологических нейронных сетей, таких как человеческий мозг, известны с середины XX века.

Искусственные нейронные сети (ИНС или НС), также известные как Neural Networks (NN) или Connection Models – алгоритмические математические модели, имитирующие поведенческие характеристики нервных сетей животных и выполняющие распределённую, параллельную обработку информации. Эти сети полагаются на особую систему обработки информации путем корректировки взаимосвязей между большим количеством внутренних узлов. НС, состоящая из нескольких слоёв связанных нейронов, называется глубокой. Глубокие нейронные сети включают в себя входной слой, скрытые слои и выходной слой; ИНС может соединять узлы нейронов левого уровня с узлами правого уровня [2, 11] (см. рисунок 2б).

Структурно в НС можно выделить два основных способа улучшения работоспособности нейронной сети, а именно горизонтальное расширение за счет увеличения числа нейронных узлов в каждом слое и вертикальное расширение за счет увеличения количества слоев нейронной сети [6].

Полносвязные НС имеют несколько основных особенностей:

1. Нейроны в одном слое не связаны друг с другом.
2. Каждый нейрон в слое N соединен со всеми нейронами в слое N-1 (при полном соединении), а выход нейронов в слое N-1 является входом в нейроны в слое N.
3. Каждое соединение (синапс) имеет вес.

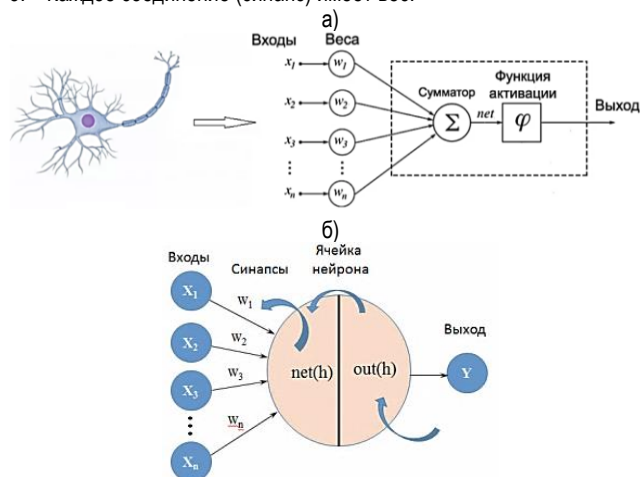


Рисунок 2 – Принципиальная схема нейрона (а), метод обратного распространения ошибки при обновлении весов синапсов (б)

Структура НС для прогнозирования НДС

НС играет роль экстрактора признаков в алгоритме обнаружения цели. Эта схема позволяет НС автономно улавливать зависимости из огромных объемов данных. НС может преобразовывать сигналы от входа к выходу с помощью простой операции сложения и умножения. Таким образом, хорошо обученная сеть может быстро реагировать без громоздких операций вычислений, в отличие от программ, использующих методы жестких вычислений (например, метод конечных элементов). Чтобы уточнить характеристики НДС, была разработана и обучена искусственная нейронная сеть полносвязной архитектуры с семью входящими нейронами, двумя скрытыми слоями и десятью нейронами выходного слоя. Каждый из десяти нейронов выходного слоя учился «видеть» самонапряжение в соответствующей координате плиты. На входной слой НС подавались следующие **исходные данные**, полученные в ходе лабораторных экспериментов [7]: L, B, H – соответственно длина, ширина и высота плиты; $f_{c, cube}^m$ – средняя гарантированная прочность на сжатие бетона нормального веса; $\tau_{1,R(t)}$ – предельные касательные напряжения в контакте плиты и основания; $u_{1,R(t)}$ – смещение плиты, соответствующее максимальному касательному напряжению в контакте плиты и основания; ε_0 – относительная деформация свободного расширения бетона; σ_{CE} – самонапряжение в бетоне при однопроцентном ограничении.

Формирование матриц входных и выходных исходных данных

Поскольку количество параметров НС велико, необходим эффективный метод записи исходных данных (обычно поступающие на вход и извлекаемые на выходе данные представлены в виде матриц или векторов). Для этого создавалась матрица входных и выходных данных для 149 различных временных интервалов. Для данных был создан специальный файл с расширением .csv. Во второй части матрицы (данные для выходного слоя ИНС) помещены напряжения, предварительно сгенерированные при помощи базовой физ.-мат. модели (для десяти точек плиты) на базе экспериментальных наблюдений за перемещениями в соответствующих координатах.

Механизм работы ИНС

Каждый нейрон может рассматриваться как оператор, который изменяет входные данные [8]. На вход он получает некую взвешенную сумму от всех нейронов предыдущего слоя, сигнал же на выходе из нейрона может быть определен следующим образом:

$$y_i = \sum x_i \cdot w_i + b, \quad (1)$$

где x и y – входной и выходной сигналы НС,

w – весовой параметр синапса,

b – смещение (рисунок 2а).

Критерии качества работы ИНС

При тестировании нейросети на тестовой выборке использовалась среднеквадратическая (MSE метод) и относительная ошибки, поскольку эти метрики достаточно достоверно отражают точность результата прогнозирования как для пакета из нескольких образцов, так и для единичного образца. Функция потерь (losses) предлагается для оценки разрыва между истинным результатом (целью) и предсказанием, формируемым нейронной сетью. Таким образом, процесс обучения нейронной сети становится задачей оптимизации, целью которой является минимизация потерь. Функция потерь определяется как

$$E = \frac{1}{n} \sum (Y_{target} - Y_{predicted})^2, \quad (2)$$

где n – количество выборок,

Y_{target} – фактические исходные данные,

$Y_{predicted}$ – предсказанные величины самонапряжений.

Параметрическая оптимизация, алгоритм градиентного спуска

Целью оптимизации параметров являлось нахождение минимального значения функции E на гиперповерхности потерь. На каждой итерации алгоритм обновляет весовые параметры w в нейронах. Чтобы

найти минимум функции потерь, необходимо взять отрицательный градиент. В модели использовался оптимизатор Adam [9]. Минимум функции потерь определялся как частная производная потери, по весу:

$$\frac{\partial E}{\partial w_i} = \frac{\partial E}{\partial out(h)} \cdot \frac{\partial out(h)}{\partial net(h)} \cdot \frac{\partial net(h)}{\partial w_i}, \quad (3)$$

где $net(h) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$ – значение взвешенной суммы от нейронов слоя N-1 приходящей на вход некоторого нейрона в слое N (рисунок 2б),

$out(h) = f(net(h))$ – значение преобразованной (при помощи оператора «ReLU») функции (1) на выходе из нейрона,

$f(net(h)) = \text{« Re Lu »}$ – функция активации нейрона (это наиболее распространённая функция активации, в особенности, если решается не классификационная задача, а задача регрессии [10]).

После вычисления потерь информация антиградиента передается от выходного слоя к предыдущим, слой за слоем – обратно к входному слою, обновляя все веса синапсов. Этот метод поиска глобального минимума получил название – метод обратного распространения ошибки (back propagation algorithm – BP) [8, 11, 12]. Уравнение для итерации обновления веса формулируется следующим образом:

$$w_{i+1} = w_i - \alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial w_i}, \quad (4)$$

где α – параметр скорости обучения.

Таким образом, с помощью градиентной информации НС может искать относительно оптимальные спуски на гиперповерхности потерь.

Обучение ИНС

Следующим шагом являлось обучение нейросети. Все этапы создания НС, обучения и проверки реализованы на программном языке Python в рамках среды Tensorflow [13]. Количество эпох устанавливалось равным 250. В процессе регуляризации случайным образом отбрасывались 90 % исходных данных назначались в качестве тренировочной выборки (training dataset) и 10 % данных было оставлено для проверки (validation) качества работы модели. Поскольку разработанная нейросеть легкая, ей требовалось примерно 10–15 секунд для обучения.

2 Мягкие вычисления. Генетический алгоритм

Методы оптимизации в общих чертах можно разделить на две категории: метод на основе градиентного спуска и метод без градиента. Метод на основе градиента, такой как метод Ньютона [14] (метод обратного распространения ошибки) или метод сопряженного градиента [15], трудно кодировать в сложной проблеме, в частности связанной с поиском оптимальных топологий, геометрий, и т. д. Генетический алгоритм (ГА), использующий метод оптимизации без градиента, может быть наиболее рационален.

Проектирование плиты на основании является, по сути, задачей выбора оптимальных геометрических параметров плиты при необходимости обеспечения определённого уровня самонапряжения (например, в центре плиты/заданных координатах). С другой стороны, это и задача подбора оптимального состава бетона при известных (или «плавающих») параметрах, описывающих контактные характеристики плиты и основания. На первом этапе работы нейросети была получена реакция плиты (НДС) в зависимости от воздействия входных параметров, которые указаны выше. На этапе 2 данные весов для наиболее оптимальной архитектуры (в частности, это была сеть с 7x10x10x10 нейронами) помещались в код ГА для решения уже обратной оптимизационной задачи. При оптимальных весовых значениях (синапсов) подобранных НС, для определения напряжений в плите размером 4x4 м ставилась задача получить оптимальную толщину плиты H , прочность бетона, значение самонапряжения в кондукторе (при однопроцентном ограничении расширению), контактные характеристики плиты с основанием, свободное расширение. Уровень самонапряжения назначался – 0,55 МПа, для удобства сравнения с результатами расчётов полученных по базовой физ.-мат. модели.

Механизм ГА

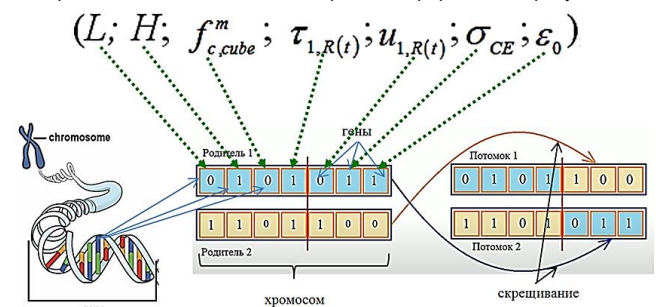
Генетический алгоритм – это своего рода эвристический подход к поиску наиболее оптимального решения, имитирующий процесс эволюции в природе [16]. Поскольку ГА был построен по аналогии эволюции в живой природе, он использует биологические термины [17]. ГА использует принцип «генетического» хранения информации, принцип «размножения» (crossing over), принцип «мутации» (mutation) и «естественного/искусственного отбора» (natural selection).

Основная идея ГА состоит в том, чтобы генерировать несколько решений случайным образом, а затем оценивать оптимальность решений, используя функцию приспособленности (fitness function) [16].

Назначение параметров при проектировании с использованием ГА

В ГА группа параметров с определёнными признаками записывается в виде вектора, называемого хромосомой. Как и в биологии, в искусственной хромосоме содержится «генетическая» информация. В данной работе хромосома представлена вектором параметров, который сохраняет информацию о новом решении в процессе работы оптимизационного алгоритма. Каждая хромосома содержит семь ген-параметров ($L; H; f_{c.cube}^m; \tau_{1,R(t)}; u_{1,R(t)}; \sigma_{CE}; \varepsilon_0$), что означает, что вектор параметров имеет размерность 1x7 исходных значений. Генетический алгоритм генерирует множество хромосом за один раз, используя алгоритм случайных чисел и назначенный диапазон вакантных значений для параметров. Интервал возможной изменчивости гена, например, отвечавшего за среднюю прочность на сжатие бетона нормального веса, назначался в пределах от нуля до 40 МПа, толщина проектируемой плиты от нуля до 0,3 м, и т. д. Таким образом, каждая хромосома с ген-параметрами отличалась одна от другой. Группа параметров в одном поколении носит название популяции. В данном исследовании в силу небольшого числа ген-параметров в ГА устанавливалось 60 поколений-эволюции.

Чтобы генерировать следующую популяцию хромосом, группа параметров взаимодействует друг с другом определённым образом. При моделировании создавалось 40 хромосом, из которых 2 пары наделялись возможностью взаимодействовать (crossing over) [17]. Не взаимодействовавшие хромосомы переходили в следующее поколение без изменений. При небинарном кодировании новый ген (значение физического параметра) случайным образом отбирался из определённого интервала значений и передавался от поколения к поколению. После взаимодействия (crossing over) получался соответствующий ген родительской генерации. Упрощённая схема получения хромосомы нового поколения проиллюстрирована на рисунок 3.



а) – хромосом и ген в ГА, б) – скрещивание между хромосомами
Рисунок 3 – Упрощённая схема получения хромосомы нового поколения

Оптимизация при помощи ГА

В ГА известно несколько подходов отбора оптимального решения: колесо рулетки, турнирный метод, ранговый метод, комбинированный метод, др. От этого зависит с какой скоростью и будет ли вообще популяция двигаться к глобальному оптимуму или останется в локальном экстремуме.

Хромосом с высоким уровнем приспособленности имеет большую вероятность быть выбранным. Хромосом с наименьшей приспособленностью отсеивается с наибольшей вероятностью. В данной работе использовался алгоритм наиболее устойчивого состояния (steady-state selection) для выбора особи, переходящей в новое поколение [18]. Блок-схема генетического алгоритма показана на рисунке 4а.

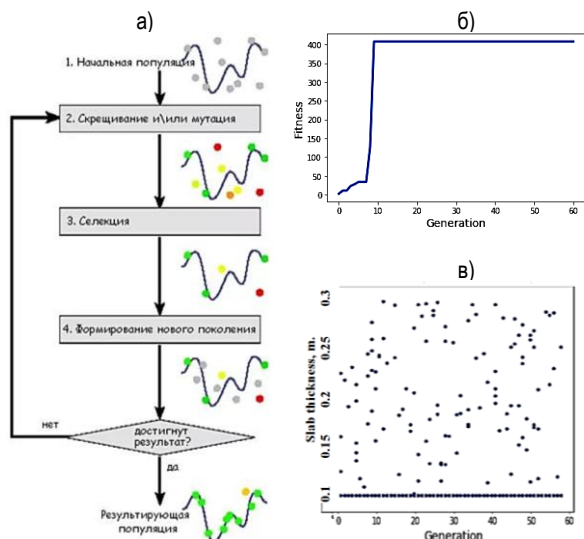
При вычислении оптимальных признаков хромосомы следующей популяции, чтобы избежать преждевременной сходимости алгоритма, вводилась мутация, вероятность которой принималась равной 0,05.

Включение/выключение генетических признаков

Важным преимуществом ГА является возможность управлять вариативностью требуемых ген. При необходимости определённые ген-параметры могут быть заблокированы для эволюционной изменчивости. Например, в данной работе блокировались ген-параметры, отвечавшие за длину плиты и за свободное расширение бетона. И наоборот, другим ген-параметрам обеспечивалась возможность изменяться, например, параметрам, ответственным за прочность бетона, самоупрочнение, толщину плиты и др.

Функция приспособленности

Функция приспособленности (fitness function) [16] важная при запуске оптимизатора ГА (рисунок 4б). Функция приспособленности представляет собой разрыв (степень приближения) между реакцией на входное воздействие хромосомы предыдущего поколения к реакции хромосомы текущего поколения на то же воздействие. На основе оценки приспособленности алгоритм выбирает некоторое выдающееся решение. Когда (после определённого количества итераций) показатель fitness function стабилизируется (выходит на минимальную изменчивость), считается, что популяция достигла оптимальности.



а) блок-схема генетического алгоритма, б) уровень приспособленности, достигнутый в процессе оптимизации, в) эволюция ген-параметра ответственного за толщину плиты

Рисунок 4 – Блок-схема ГА и результаты эволюционной оптимизации

Нормализация

Для того чтобы скрещивать особи между собой или манипулировать генами (нейронами) любым другим образом, гены (нейроны) должны быть выражены через безразмерный статистический показатель (используемый, как правило, для сравнения значений разной размерности). В математической статистике известен ряд методов: десятичное масштабирование, минимальная нормализация, нормализация средним (Z-нормализация). В работе была применена нормализация средним (в том числе и на первом этапе, для работы нейросети). Z-нормализация устанавливает среднее значение (математическое ожидание) и дисперсию для каждого гена (нейрона) и представляется формулой

$$z = (x - \mu) / \sigma, \tag{7}$$

где μ и σ – математическое ожидание (mean) и стандартное отклонение (standard deviation) соответственно.

Z-оценка (Z-scores) соответствует количеству стандартных отклонений конкретного параметра до среднего значения [19]. Нормализация для любого параметра z может быть представлена графически, как показано на рисунке 5.

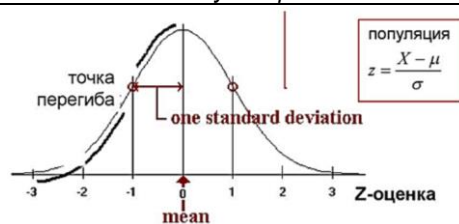
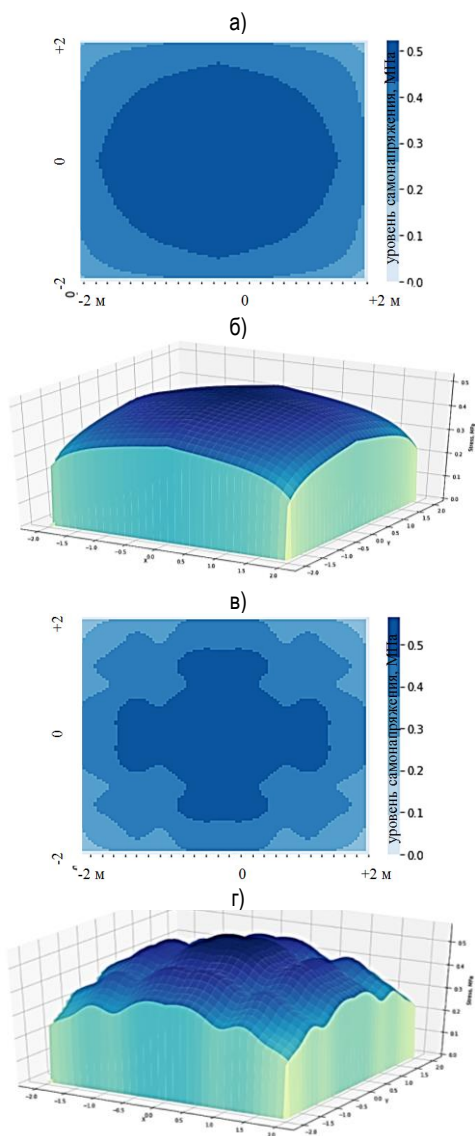


Рисунок 5 – Нормализация данных

Результаты проектирования

На рисунке 6 представлены результаты самоупрочнений, полученные при помощи НС (а, б) и ГА (в, г), в плите 4x4x0,1 м, для времени – 80 часов от затворения бетона.

Затем ГА сгенерировал плиту 4x4 м, толщиной 0,100286 м (при этом геометрические размеры реальной [7] полосы-плиты составляли – 4x0,1 м). В процессе проектирования полосы-плиты ГА подобрал самоупрочнение при одноосном ограничении – 1,17 МПа (при этом в образцах-кондукторах самоупрочнение на 80 час от затворения составляло – 0,81 МПа). Прочность бетона на сжатие при ГА проектировании – 12,9 МПа (в экспериментах на сжатие на 80 час – 10,6 МПа). Пиковое напряжение на контакте – 0,7 МПа (экспериментальное значение – 0,545 МПа), перемещение, соответствующее этому напряжению – 19 мкм (в эксперименте – 18 мкм).

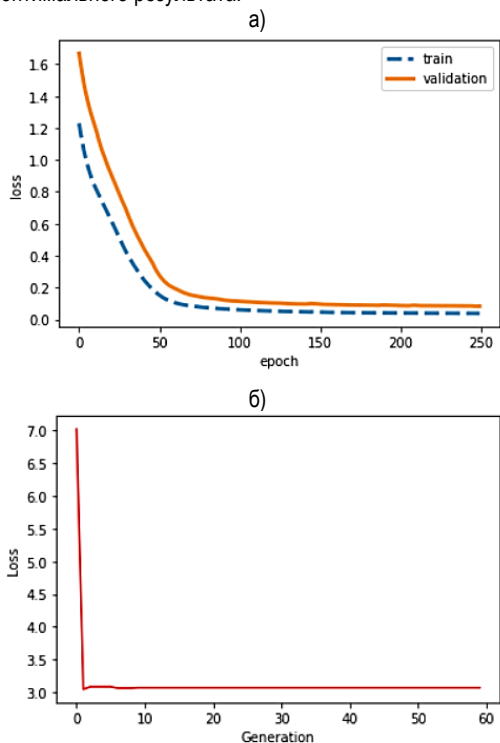


а, б) – полученное при помощи нейросети; в, г) – полученное при помощи генетического алгоритма
Рисунок 6 – Самоупрочнение в плите 4x4x0,1 м

Оценка точности

В ходе работы с нейросетью формировался отдельный файл .csv для тестовой выборки данных. Было установлено, что наибольшая сходимость достигается при обучении нейросети с архитектурой 7x10x10x10 нейронов (функции потерь на тренировочной и валидационной выборках представлены на рисунке 7а). По мере увеличения нейронов в промежуточных слоях потери в тестовой выборке непрерывно уменьшались и для сети 7x10x10x10 достигли значения $E = 0,011$. Более того, для оценки точности прогнозирования напряжений с использованием НС дополнительно рассчитывалась относительная ошибка тестовой выборки. Относительная ошибка составила – 1,9 %.

В процессе ГА-оптимизации потери от поколения к поколению уменьшались, приближаясь к нулю (рисунок 7б). Из графика потерь можно сделать вывод, что уже к третьему поколению модель достигла оптимального результата.



а) при обучении НС, б) при оптимизации с помощью ГА
Рисунок 7 – Функции минимизации ошибок

На рисунке 8 представлены результаты моделирования напряжений в плите 4x4x0,1 м при помощи базовой физ.-мат. модели (на базе экспериментальных данных), нейросети с архитектурой 7x10x10x10 нейронов и с использованием генетического алгоритма.

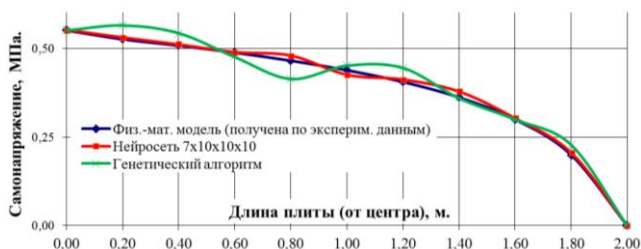


Рисунок 8 – Самонапряжение на 80 час от момента затворения

Заключение

1. В настоящий момент жесткие вычисления являются практически безальтернативным средством описания процессов и явлений, они проверены практикой и чрезвычайно эффективны и, тем не менее, они не описывают непосредственно саму реальность. В случае несложных и линейных процессов жесткие вычисления

достигают порой почти 100 % сходимостью с экспериментом, однако сама реальность для классических моделей продолжает оставаться «вещью в себе». Мягкие вычисления (основанные на методах нечёткой логики, нейросетевых моделях, ГА), хоть и не раскрывают сути физических явлений, но воспринимая поток данных поступающих непосредственно из окружающей среды (при помощи датчиков, сенсоров, и т. д.), как бы нащупывают связь между ними. При этом, если увеличивать плотность потока данных или иметь достаточно времени для наблюдений, то мягкие вычисления (НС, ГА) могут быть подстроены практически под любую задачу (имитируя работу нейронов и/или эволюцию в природе), при этом точность прогнозирования может превысить точность традиционных алгоритмов (особенно в области моделирования нелинейных процессов). Вместе с тем, на определённом этапе (при недостатке экспериментальных данных, этапе предварительной настройки параметров), нейросеть и ГА могут тестироваться и на данных, сгенерированных при помощи традиционных физико-механических моделей.

- Для определения самонапряжения в плитах на основании была разработана и обучена полносвязная нейросеть с архитектурой 7x10x10x10 нейронов в слоях. На тестирующей выборке для плиты 4x4x0,1 м. была достигнута высокая сходимость с физ.-мат. моделью. Среднеквадратичная ошибка составила – 0,011. Относительная ошибка составила – 1,9 %.
- При проектировании плиты, при заявленном требовании обеспечения самонапряжения в центре плиты на уровне 0,55 МПа (как в плите, из тестовой выборки НС) при помощи ГА была сгенерирована плита размерами 4x4x0,100286 м. Самонапряжение в центре плиты составило – 0,549 МПа, при этом максимальная приспособленность генетических признаков была достигнута уже к десятому поколению. Это свидетельствует, что для данного класса задач, изначально назначенные 60 поколений для оптимизации решения несколько избыточны и в дальнейшем могут быть пересмотрены в сторону уменьшения без существенной потери точности для решения.

Список цитированных источников

- Разница между мягкими и жесткими вычислениями. Progler. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://progler.ru/blog>. – Дата доступа: 10.11.2022.
- Zadeh, Lotfi A. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing / Lotfi A. Zadeh – Communications of the ACM. – March 1994. – Vol. 37, No. 3. –P 77–84.
- Разница между мягкими и жесткими вычислениями. Surveillance-packages. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru1.surveillancpackages.com/difference-between-soft-computing-and-hard-computing-4b2a>. – Дата доступа: 11.11.2022.
- Игорь Н. фон Бекман / Нелинейная динамика сложных систем: теория и практика. Метанаука. Эволюция систем. Материалы к курсу лекций и учебнику / Игорь Н. фон Бекман. – Москва : МГУ. – 2018. – С. 613
- Применение интеллектуальной обработки информации Soft Computing в физике. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://spacelab.mininuniver.ru>. – Дата доступа: 12.11.2022.
- Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning / Shin H. C. [et al.] // IEEE transactions on medical imaging. – 2016. – 35(5). – P. 1285–1298.
- Желткович, А.Е. Расчёт вынужденных перемещений и напряжений от усадки в монолитных бетонных плитах, взаимодействующих с основанием / А. Е. Желткович, В. В. Тур // Строительная наука и техника. – 2011. – № 2 (35) : – С. 120–125.
- Chen H, Lu F, He B. Topographic property of backpropagation artificial neural network: From human functional connectivity network to artificial neural network [J]. Neurocomputing. – 2020. – 418. – P. 200–210.
- Adam: A Method for Stochastic Optimization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>. – Дата доступа: 14.11.2022.

10. Функции активации нейронов сети: сигмоида, линейная, ступенчатая, ReLu [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/activation-functions>. – Дата доступа: 14.11.2022.
11. Галушкин А. И. Синтез многослойных систем распознавания образов / А. И. Галушкин. – М.: «Энергия», 1974.
12. Werbos, P. J. Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences / P. J. Werbos. – Cambridge: Harvard University, 1974.
13. Citing TensorFlow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/about/bib>. – Дата доступа: 16.11.2022.
14. Polyak B T. Newton's method and its use in optimization [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(3): pp. 1.086–1.096.
15. Nazareth, J. L. Conjugate gradient method / J. L. Nazareth. – Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2009. – Vol 1(3). – P. 348–353.
16. Katoch, S., Chauhan, S.S., Kumar, V.A. Review on genetic algorithm: past, present, and future / S. Katoch, S.S. Chauhan, V. A. Kumar // Multimedia Tools and Applications. – 2021. – Vol 80(5). – P. 8091–8126.
17. Safitri, A. R., Muslim, M. A. Improved accuracy of naive bayes classifier for determination of customer churn uses smote and genetic algorithms / A .R. Safitri, M. A. Muslim // Journal of Soft Computing Exploration. – 2020. – Vol 1(1). – P. 70–75.
18. Differential evolution algorithm with multiple mutation strategies based on roulette wheel selection / Qian W, Chai J, Xu Z [et al.] // Applied Intelligence. – 2018. – Vol 48(10). – P. 3612–3629.
19. Нормализация данных (Data normalization) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wiki.loginom.ru/articles/data-normalization>. – Дата доступа: 15.11.2022.
6. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning / Shin H. C. [et al.] // IEEE transactions on medical imaging. – 2016. – 35(5). – R. 1285–1298.
7. Zheltkovich, A.E. Raschyot vyzhizhennykh peremeshchenij i napryazhenij ot usadki v monolitnykh betonnykh plitah, vzaimodejstvuyushchih s osnovaniem / A. E. Zheltkovich, V. V. Tur // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2011. – № 2 (35) : – S. 120–125.
8. Chen H, Lu F, He B. Topographic property of backpropagation artificial neural network: From human functional connectivity network to artificial neural network [J]. Neurocomputing. – 2020. – 418. – R. 200–210.
9. Adam: A Method for Stochastic Optimization [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>. – Data dostupa: 14.11.2022.
10. Funkcii aktivacii neironov seti: sigmoida, linejnaya, stupenchataya, ReLu [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/activation-functions>. – Data dostupa: 14.11.2022.
11. Galushkin A. I. Sintez mnogoslujnyh sistem raspoznavaniya obrazov / A. I. Galushkin. – M.: «Energija», 1974.
12. Werbos, P. J. Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences / P. J. Werbos. – Cambridge: Harvard University, 1974.
13. Citing TensorFlow [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.tensorflow.org/about/bib>. – Data dostupa: 16.11.2022.
14. Polyak B T. Newton's method and its use in optimization [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(3): pp. 1.086–1.096.
15. Nazareth, J. L. Conjugate gradient method / J. L. Nazareth. – Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2009. – Vol 1(3). – R. 348–353.
16. Katoch, S., Chauhan, S.S., Kumar, V.A. Review on genetic algorithm: past, present, and future / S. Katoch, S.S. Chauhan, V. A. Kumar // Multimedia Tools and Applications. – 2021. – Vol 80(5). – R. 8091–8126.
17. Safitri, A. R., Muslim, M. A. Improved accuracy of naive bayes classifier for determination of customer churn uses smote and genetic algorithms / A .R. Safitri, M. A. Muslim // Journal of Soft Computing Exploration. – 2020. – Vol 1(1). – R. 70–75.
18. Differential evolution algorithm with multiple mutation strategies based on roulette wheel selection / Qian W, Chai J, Xu Z [et al.] // Applied Intelligence. – 2018. – Vol 48(10). – R. 3612–3629.
19. Normalizaciya dannyh (Data normalization) [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://wiki.loginom.ru/articles/data-normalization>. – Data dostupa: 15.11.2022.

References

Материал поступил 18.01.2023, одобрен 27.02.2023, принят к публикации 28.02.2023

ОЧИСТКА ГУМУСОВО-ГИДРОКАРБОНАТНО-КАЛЬЦИЕВЫХ ВОД ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Б. Н. Житенев

*К. т. н., доцент, профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов,
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gitenev@tut.by*

Реферат

Отмечается, что с 90-х годов прошлого века в республике прослеживается тенденция к снижению объемов забора воды из поверхностных источников. Наблюдается увеличение использования подземной воды питьевого качества для производственных целей. Широкому применению поверхностных вод для технического водоснабжения препятствуют присутствующие в них органические и минеральные загрязнения. В статье рассматриваются усовершенствованные технологии очистки гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых поверхностных вод для технического водоснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: поверхностные источники водоснабжения, стойкие примеси, гуминовые, фульвовые кислоты, металлоорганические комплексы, технологии очистки воды, озонирование, коагулирование, флотация.

PURIFICATION OF HUMUS HYDROCARBONATE-CALCIUM WATER FOR TECHNICAL WATER SUPPLY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

B. N. Zhytsianiou

Abstract

It is noted that since the 90s of the last century, there has been a tendency in the republic to reduce the volume of water intake from surface sources. There is a tendency to increase the use of drinking quality underground water for industrial purposes. The widespread use of surface water for technical water supply is hindered by organic and mineral pollution present in them. The article discusses improved technologies for the treatment of humus-hydrocarbonate-calcium surface water for technical water supply of industrial enterprises.

Keywords: surface water sources, persistent impurities, humic, fulvic acids, organometallic complexes, water treatment technologies, ozonation, coagulation, flotation.

Введение

С 90-х годов прошлого века в республике прослеживается тенденция к снижению объемов забора воды из поверхностных источников. Наибольшее сокращение характерно для забора поверхностных вод, за счет которых в основном обеспечиваются нужды промышленности и теплоэнергетики. Величина забора воды из поверхностных источников по сравнению с 1990 годом уменьшилась в 3,2 раза и составила в 2015 году 572 млн м³ [1]. Широкому использованию поверхностных вод для технического водоснабжения препятствуют присутствующие в них органические и минеральные загрязнения. Например, к воде, используемой в теплоэнергетике, предъявляются повышенные требования по жесткости, серосодержанию, корректировка которых на практике осуществляется в основном ионным обменом. Однако вода, поступающая на ионообменные фильтры, должна иметь содержание взвешенных веществ не более 8 мг/дм³, цветность не более 30 градусов и перманганатную окисляемость не более 7 мг О₂/дм³. Такие требования обусловлены тем, что органические примеси способны быстро загрязнять дорогостоящие ионообменные смолы и эти процессы часто оказываются необратимыми, происходит так называемое «отравление смол». Таким образом, совершенствование технологических приемов удаления из природных вод органических загрязнений природного и техногенного происхождения позволит более широко использовать поверхностные источники для водоснабжения, в частности для водоснабжения промышленных предприятий. По составу растворенных в воде минеральных солей реки Брестской области относятся к гидрокарбонатно-кальциевому классу. Общая минерализация характеризуется средней степенью и изменяется в пределах 200–400 мг/дм³. Более низкая минерализация характерна для рек, протекающих по заболоченным и залесенным территориям, где максимальные показатели цветности составляют до 220 градусов и минимальные величины водородного показателя рН = 6,5 [2]. Цветность поверхностных вод обусловлена присутствием водного гумуса, состоящего в основном из гуминовых и фульвовых кислот, а также их металлоорганических комплексов. Гуминовые кислоты – это фракция гуминового вещества, нерастворимая в воде при кислотном рН (меньше 2) и растворимая при более высоких значениях рН. Гуминовые кислоты – это главный экстрагируемый компонент почвенного гумусового вещества, окрашены от темно-коричневого до черного цвета. Фульвокислоты – это фракция гуминового вещества, растворимая в воде при любых

значениях рН. Они окрашены от светло-желтого до желто-коричневого цвета [3]. Гуминовые и фульвокислоты, взятые вместе, называют «гумусовыми кислотами». Это наиболее подвижная и реакционноспособная компонента гуминовых веществ, активно участвующая в природных химических процессах [4]. Гуминовые и фульвокислоты, объединяемые под названием гумусовые кислоты, нередко составляют значительную долю органического вещества природных вод и представляют собой сложные смеси биохимически устойчивых высокомолекулярных соединений. Главным источником поступления гумусовых кислот в природные воды являются почвы и торфяники, из которых они вымываются дождевыми и болотными водами. Значительная часть гумусовых кислот вносится в водоемы вместе с пылью и образуется непосредственно в водоеме в процессе трансформации «органического вещества». Гумусовые кислоты в поверхностных водах находятся в растворенном, взвешенном и коллоидном состояниях, соотношения между которыми определяются химическим составом вод, рН, биологической ситуацией в водоеме и другими факторами [5]. Содержание гуминовых кислот в поверхностных водах обычно составляет десятки и сотни микрограммов в 1 дм³ по углероду, достигая нескольких миллиграммов в 1 дм³ в природных водах лесных и болотистых местностей, придавая им характерный бурый цвет. В воде многих рек гуминовые кислоты не обнаруживаются. Фульвокислоты являются частью гумусовых кислот, не осаждающихся при нейтрализации из раствора органических веществ, извлеченных из торфов и бурых углей обработкой щелочью. Фульвокислоты представляют соединения типа оксикарбоновых кислот с меньшим относительным содержанием углерода и более выраженными кислотными свойствами. Хорошая растворимость фульвокислот по сравнению с гуминовыми кислотами является причиной их более высоких концентраций и распространения в поверхностных водах. Содержание фульвокислот, как правило, превышает содержание гуминовых кислот в 10 раз и более [5].

На кафедре водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет» были проведены многочисленные эксперименты по очистке гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод от органических примесей [6–15]. На основании этих исследований разработаны экспериментально подтвержденные технологии очистки поверхностных вод и определены области их применения (рисунок 1–4).

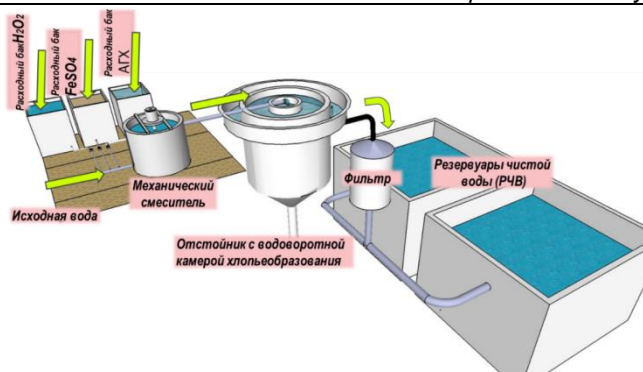


Рисунок 1 – Технология очистки воды от ГК и ФК пероксидом водорода в присутствии металла с переменной валентностью

Состав сооружений: реагентное хозяйство, дозаторы, смеситель, камера хлопьеобразования, отстойник, фильтр, РЧВ.

Область применения: очистка гумусовых гидрокарбонатно-кальциевых вод для производственного водоснабжения. Цветность: любая. Мутность – до 1500 мг/дм³. Цветность обусловлена преимущественно гуминовыми соединениями.

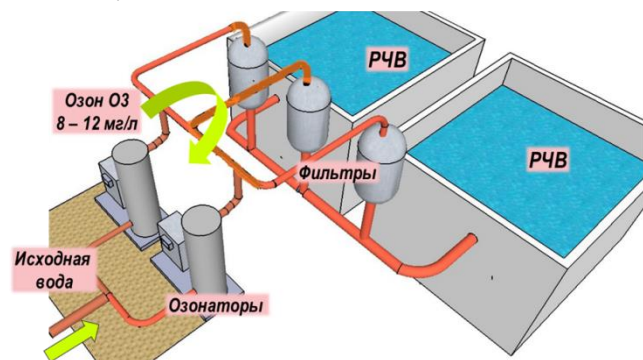


Рисунок 2 – Технология очистки воды от гуминовых и фульвовых кислот прямым озонированием

Состав сооружений: механические префильтры грубой очистки, озонаторы, фильтры, РЧВ.

Область применения: очистка гумусовых гидрокарбонатно-кальциевых вод для производственного водоснабжения. Цветность: любая. Мутность – до 50 мг/дм³. Цветность обусловлена преимущественно фульватами, наличие устойчивых комплексов $FeFR(OH)_2$ для деструкции которых требуется обработка окислителями.

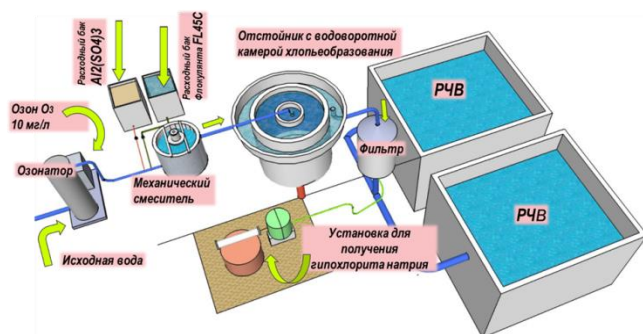


Рисунок 3 – Технология очистки воды от ГК и ФК озонированием с последующей двухступенчатой реагентной обработкой

Состав сооружений: озонаторы, реагентное хозяйство, дозаторы, смеситель, камера хлопьеобразования, отстойник, фильтр, РЧВ.

Область применения: очистка гумусовых гидрокарбонатно-кальциевых вод для производственного водоснабжения. Цветность: любая. Мутность – до 1500 мг/дм³, наличие устойчивых комплексов $FeFR(OH)_2$ для деструкции которых требуется обработка окислителями.

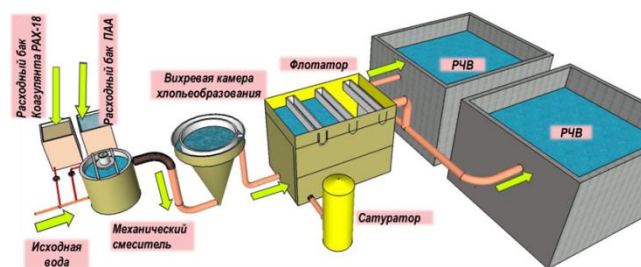


Рисунок 4 – Технология очистки воды от ГК и ФК напорной реагентной флотацией

Состав сооружений: реагентное хозяйство, дозаторы, смеситель, камера хлопьеобразования, флотатор, сатуратор, РЧВ.

Область применения: очистка гумусовых гидрокарбонатно-кальциевых вод для производственного водоснабжения. Цветность: любая. Мутность – до 50 мг/дм³. Цветность обусловлена преимущественно гуминовыми соединениями.

Заклучение

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что очистка природных вод от органических примесей является весьма актуальной проблемой, о чем свидетельствует количество публикаций по данной теме. Вместе с тем отсутствуют достаточные сведения по очистке гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод, которыми представлены большинство поверхностных вод Республики Беларусь.

Органические примеси, содержащиеся в гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых водах представлены стойкими примесями: гумусовыми кислотами: гуминовыми (ГК), фульвовыми кислотами (ФК), металлоорганическими комплексами.

Присутствие стойких органических примесей является проблемой использования воды для технического водоснабжения, поскольку оказывает негативное влияние на водоподготовку методом ионного обмена, который наиболее распространен в теплоэнергетике, машино-, приборостроении.

Разработана технология очистки воды коагулированием с предварительной обработкой пероксидом водорода в присутствии металлов переменной валентности, интенсифицирующая процесс обесцвечивания природных гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод. Введение 45 мг/дм³ пероксида водорода позволяет снизить дозу алюминий гидроксид хлорида с 20 до 10 мг/дм³ для достижения остаточной цветности 20 градусов, а введение 17 мг/дм³ сульфата железа (II) позволяет уменьшить остаточную цветность с 30 до 15 градусов при дозе алюминий гидроксид хлорида 10 мг/дм³. Эффект обесцвечивания увеличивается в два раза при той же дозе коагулянта.

Обесцвечивание воды двухступенчатым озонированием с коагуляцией повышает эффективность коагуляции на 30–40 % за счет предварительного введения озона с дозой 5–15 мг/дм³ и разрушения стабилизирующих гидратных оболочек, а также позволяет снизить остаточную после коагулирования цветность на 40–60 % за счет озонирования на второй ступени с дозой 5–15 мг/дм³.

Эффективность обесцвечивания поверхностных вод достигается 95–100 % путём применения технологии напорной реагентной флотации при 10 %-м соотношении расходов обрабатываемой воды и водовоздушного раствора с концентрацией воздуха 90–110 мг/дм³ за 8–10 минут, что позволяет отказаться от осветлителей и отстойников.

Список цитированных источников

1. Состояние природной среды Республики Беларусь // Экол. бюл. 2003–2015 гг. / Под ред. В. Ф. Логинова. – Минск : Минсктиппроект, 2004. – 2016.
2. Гидрохимический состав речных вод Брестской области / А. А. Волчек [и др.] // Брестский географический вестник. – Том 2, выпуск 2. – 2002. – С. 85–71.
3. Weber, J. Properties of humic substances (tutorial materials) / J. Weber // Agricultural University of Wroclaw [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: <http://karnet.up.wroc.pl>. – Date of access: 29.08.2010.

4. Перминова, И. В. Гуминовые вещества — вызов химикам XXI века / И. В. Перминова // *Химия и жизнь*. — 2008. — № 1. — С. 143–150.
5. Гуминовые вещества в контексте зеленой химии / И. В. Перминова [и др.] // *Зеленая химия в России*. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — Том V. — С. 146–162.
6. Житенев, Б. Н. Теоретические предпосылки интенсификации обесцвечивания поверхностных вод Белорусского Полесья / Б. Н. Житенев, Т. П. Лычук // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2004. — № 2 (26): Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. — С. 85–87.
7. Житенев, Б. Н. Повышение эффективности обесцвечивания и обезжелезивания поверхностных вод Беларуси для технического водоснабжения / Б. Н. Житенев, Т. П. Лычук // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2005. — № 3 (33): Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. — С. 60–62.
8. Житенев, Б. Н. Кинетика удаления гуминовых кислот фотохимическим окислением, УФ излучением и пероксидом водорода / Б. Н. Житенев, Т. П. Лычук // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2006. — № 2 (38): Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. — С. 56–59.
9. Бульская, И. В. Доочистка природных гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых поверхностных вод от органических примесей окислением / И. В. Бульская, Б. Н. Житенев // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2011. — № 2 (68): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. — С. 69–73.
10. Житенев, Б. Н. Экспериментальные исследования удаления органических примесей природных гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод коагулированием и каталитическим окислением в целях технического водоснабжения / Б. Н. Житенев, С. В. Андреек // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2012. — № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. — С. 32–36.
11. Житенёв, Б. Н. Характеристика окислителей, применяемых при очистке природных гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод в целях технического водоснабжения / Б. Н. Житенёв, С. В. Андреек // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2013. — № 2 (74): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. — С. 33–35.
12. Житенёв, Б. Н. Удаление органических загрязнений поверхностных вод для производственного водоснабжения / Б. Н. Житенёв, М. А. Таратенкова // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2015. — № 2 (92): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. — С. 55–58.
13. Житенёв, Б. Н. Удаление железоорганических комплексов из воды поверхностных источников для водоснабжения / Б. Н. Житенёв, Е. В. Сук // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2016. — № 2 (98): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. — С. 65–67.
14. Житенёв, Б. Н. Обесцвечивание поверхностных вод коагулированием с предварительным озонированием для производственного водоснабжения / Б. Н. Житенёв, М. А. Таратенкова // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2016. — № 2 (98): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. — С. 67–70.
15. Житенёв, Б. Н. Обесцвечивание поверхностных вод напорной реагентной флотацией для предприятий энергетики / Б. Н. Житенёв, М. А. Таратенкова // *Вестник Брестского государственного технического университета*. — 2017. — № 2 (104): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. — С. 123–125.
3. Weber, J. Properties of humic substances (tutorial materials) / J. Weber // *Agricultural University of Wroclaw* [Electronic resource]. — 2009. — Mode of access: <http://karnet.up.wroc.pl>. — Date of access: 29.08.2010.
4. Perminova, I. V. Guminovye veshchestva — vyzov himikam XXI veka / I. V. Perminova // *Himiya i zhizn'*. — 2008. — № 1. — S. 143–150.
5. Guminovye veshchestva v kontekste zelenoj himii / I. V. Perminova [i dr.] // *Zelenaya himiya v Rossii*. — M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2004. — Tom V. — S. 146–1626. Zhitenev, B. N. Teoreticheskie predposylki intensifikacii obescvachivaniya poverhnostnyh vod Belorusskogo Poles'ya / B. N. Zhitenev, T. P. Lychuk // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2004. — № 2 (26): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. — S. 85–87.
7. Zhitenev, B. N. Povyshenie effektivnosti obescvachivaniya i bez-zhelezivaniya poverhnostnyh vod Belarusi dlya tekhnicheskogo vodosnabzheniya / B. N. Zhitenev, T. P. Lychuk // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2005. — № 3 (33): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. — S. 60–62.
8. Zhitenev, B. N. Kinetika udaleniya guminovyh kislot fotohimicheskim okisleniem, UF izlucheniem i peroksidom vodoroda / B. N. Zhitenev, T. P. Lychuk // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2006. — № 2 (38): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. — S. 56–59.
9. Bul'skaya, I. V. Doochistka prirodnyh gumusovo-gidrokarbonatno-kal'cievyh poverhnostnyh vod ot organicheskikh primesej okisleniem / I. V. Bul'skaya, B. N. Zhitenev // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2011. — № 2 (68): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. — S. 69–73.
10. Zhitenev, B. N. Eksperimental'nye issledovaniya udaleniya organicheskikh primesej prirodnyh gumusovo-gidrokarbonatno-kal'cievyh vod koagulirovaniem i kataliticheskim okisleniem v celyah tekhnicheskogo vodosnabzheniya / B. N. Zhitenev, S. V. Andreyuk // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2012. — № 2: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. — S. 32–36.
11. Zhitenyov, B. N. Harakteristika okislitelej, primenyayemyh pri ochildke prirodnyh gumusovo-gidrokarbonatno-kal'cievyh vod v celyah tekhnicheskogo vodosnabzheniya / B. N. Zhitenyov, S. V. Andreyuk // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2013. — № 2 (74): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, geoekologiya. — S. 33–35.
12. Zhitenyov, B. N. Udalenie organicheskikh zagryaznenij poverhnostnyh vod dlya proizvodstvennogo vodosnabzheniya / B. N. Zhitenyov, M. A. Taratenkova // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2015. — № 2 (92): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, geoekologiya. — S. 55–58.
13. Zhitenyov, B. N. Udalenie zhelezoorganicheskikh kompleksov iz vody poverhnostnyh istochnikov dlya vodosnabzheniya / B. N. Zhitenyov, E. V. Suk // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2016. — № 2 (98): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, geoekologiya. — S. 65–67.
14. Zhitenyov, B. N. Obescvachivanie poverhnostnyh vod koagulirovaniem s predvaritel'nym ozonirovaniem dlya proizvodstvennogo vodosnabzheniya / B. N. Zhitenyov, M. A. Taratenkova // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2016. — № 2 (98): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, geoekologiya. — S. 67–70.
15. Zhitenyov, B. N. Obescvachivanie poverhnostnyh vod napornoj reagentnoj flotaciej dlya predpriyatij energetiki / B. N. Zhitenyov, M. A. Taratenkova // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. — 2017. — № 2 (104): Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, geoekologiya. — S. 123–125.

References

1. Sostoyanie prirodnoj sredy Respubliki Belarus' // *Ekol. byul.* 2003–2015 gg. / Pod red. V. F. Loginova. — Minsk : Minsktipproekt, 2004. — 2016.
2. Gidrohimicheskij sostav rechnyh vod Brestskoj oblasti / A. A. Volchek [i dr.] // *Brestskij geograficheskij vestnik*. 2002. —Tom 2, vypusk 2. — Brest,— S. 85–71.

Материал поступил 18.09.2022, одобрен 15.10.2022, принят к публикации 28.10.2022

АНАЛИЗ ОБЪЕКТОВ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ГОМЕЛЯ

И. Г. Малков¹, А. В. Толочко²¹ Доктор архитектуры, профессор кафедры «Архитектура и строительство»
УО «Белорусский государственный университет транспорта»² Магистр архитектуры, аспирант кафедры «Архитектура и строительство»
УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь, e-mail: tolochkoalesya@gmail.com**Реферат**

Сегодня создать объекты визуальной информации не составляет труда, и возможно поэтому их становится слишком много в жизни человека. Новые технологии, реклама и бизнес – важные моменты, но при этом они не всегда положительно сказываются на архитектуре, мешают адекватно воспринимать городские виды, нарушают облик города. Объектом исследования и анализа в данной статье является то насыщение города, которое несет в себе различного рода информацию. Такие объекты не должны нарушать структуру и восприятие города, а лишь дополнять городской фон, декорировать его. На примере города Гомеля показаны как негативные, так и положительные примеры использования такой визуальной информации. Даны предложения по их гармонизации и выбора места размещения.

Ключевые слова: визуальная информация, объекты информации, рекламные объекты, городская среда, рекламные конструкции, вывески.

ANALYSIS OF OBJECTS OF VISUAL INFORMATION ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF GOMEL

I. G. Malkov, A. V. Tolochko

Abstract

It is not difficult to create objects of visual information today, and perhaps that is why there are too many of them in a person's life. New technologies, advertising and business are important points, but at the same time they do not always have a positive effect on architecture, interfere with adequate perception of city views, and disrupt the city's appearance. The object of research and analysis in this article is the saturation of the city, which carries various kinds of information. Such objects should not violate the structure and perception of the city, but only complement the urban background, decorate it. On the example of the city of Gomel, both negative and positive examples of the use of such visual information are shown. Proposals for their harmonization and choice of location are given.

Keywords: visual information, information objects, advertising objects, urban environment, advertising constructions, signboards.

Введение

Городская среда состоит не только из пространства, но и имеет огромное количество различного предметного насыщения, несущего в себе визуальную информацию. Сейчас довольно сложно представить себе город только со зданиями и дорогами, без какой-либо дополнительной визуальной информации. Такая информация состоит из комплекса специальных указателей, вывесок, рекламных щитов, помогающих человеку ориентироваться в пространстве и узнавать новости благодаря своему содержанию.

Вопросы визуальной среды рассматривали с различных сторон большое количество авторов. Со стороны эстетики и проблем восприятия объектов и открытого пространства эту тему изучали М. Бархин, В. Глазычев, А. Иконников, К. Линч и др. [1] Организацию знаков и указателей рассматривали К. Бергер, Р. Лассини. Теоретик архитектуры и градостроительства К. Линч считает, что городская среда должна быть очевидна и легка в распознавании, а архитектор Х. Херинг говорил, что у коммерческих зданий исчезает архитектурный фасад, он становится местом для рекламы. Я. Гейл рассматривает город как живой организм, где все со всем взаимодействует и друг на друга влияет, он глубоко понимает городские проблемы и предлагает подходы к улучшению качества жизни.

Однако необходимо отметить, что развитие и изменение объектов визуальной информации идет непрерывно. И споры между «рекламщиками», которые зарабатывают на размещении рекламных носителей, и архитекторами, которые заинтересованы в сохранении эстетического и целостного облика городской среды, идут постоянно. Целью данной статьи является попытка проанализировать эстетические требования к содержанию, цветовым решениям, размерам, размещению объектов визуальной информации на примере города Гомеля. В статье рассматриваются все виды объектов визуальной информации, но акцент делается на объекты рекламного характера, так как они наиболее ярко раскрывают данную тему.

Основная часть. Анализ объектов визуальной информации на примере города Гомеля

Современный человек нуждается в утолении своего информационного голода, но часто насыщение визуальной информацией города переходит границы эстетики и гармонии восприятия. А значит

необходимо структурировать эти объекты, вносить четкость в их объем, количество и места размещения, чтобы городская среда была в меру очевидна, интересна и легка в распознавании. По нашему мнению, на сегодняшний день для ограничения хаотичного распространения визуальной информации в городе должна быть создана структура сосредоточения таких объектов. Для этого нами выделены три основных места размещения визуальной информации, приведены примеры и сделан их анализ.

Отдельно стоящие крупные конструкции. Вдоль крупных дорог, соединяющих городские районы, вокруг транспортных развязок и в местах с большим пространством можно видеть билборды. Такие конструкции заметны издали и могут нести абсолютно любую информацию, не только рекламного характера. Но, на наш взгляд, размещение таких конструкций в центральной части города не совсем правильно. В центре города в основном не высокие здания, а такие конструкции имеют большие размеры и создают препятствие для визуального восприятия объектов и деталей, расположенных за ними. Так, например, билборд на улице Интернациональная в г. Гомеле (рисунок 1а), на наш взгляд, слишком большой и закрывает собой сквер, который при должном внимании и реконструкции, находясь в центре города, мог бы выполнять гораздо более важные функции. Также по этой улице находятся и другие отдельно стоящие рекламные конструкции, которые, на наш взгляд, засоряют город, являются лишними, непродуманно поставленными (рисунок 1б). При размещении рекламной конструкции, особенно если это большой красочный щит, необходимо учитывать прилегающие рядом предметы, здания, улицы, другие рекламные конструкции. В этом один из парадоксов наружной рекламы – она должна сочетаться с окружающей обстановкой и в тоже время бросаться в глаза.

Самой современной на сегодняшний день отдельно стоящей конструкцией являются электронные экраны. Их располагают на определенном расстоянии от мест больших скоплений людей, обычно это площади, крупные остановочные пункты, места с хорошим обзором и большим потоком людей. Такие экраны позволяют размещать не только торговую рекламу, но и информировать о событиях, мероприятиях, напоминать о технике безопасности, иметь политическое назначение. За счет быстрой сменяемости кадров такие экраны позволяют нести множество разнообразной информации, от чего отпадает нужда в установках большого количества конструкций. Все получается компактно и в то

же время информативно, современно и легко в эксплуатации, а эти критерии очень важны при создании визуальных объектов в центре города. Всего в нашем городе на сегодняшний день три подобных экрана. Хочется отметить, что месторасположения их выбрано правильно и достаточно продумано. Они хорошо обозреваются большим количеством людей и расположены так, чтобы не закрывать городские пространства.



Рисунок 1а, б – Билборды на ул. Интернациональная в г. Гомеле

Большое количество билбордов в нашем городе сосредоточено в районе рынков. Такие места имеют большое количество торговых точек, а соответственно и большое количество рекламных объектов. Наверное, будет сложно и не совсем правильно пытаться с этим бороться. Наша же задача – не превратить весь город в рынок. Поэтому мы считаем, что сосредоточение большого количества рекламы в таких местах вполне может быть.

Крупные торговые, общественные и офисные здания. Сложно представить крупное здание, особенно торгово-развлекательного характера, без вывесок, логотипов, названий магазинов. Это все необходимо для демонстрации их содержания, это важно, как и для маркетинга компаний, так и для удобства потребителей. Для того чтобы информация хорошо читалась, важным будет фон, на котором она располагается. Так, при проектировании новых торговых или офисных зданий уже заранее предусматриваются места для рекламы, и соответственно фасады в этих местах делают нейтральными, без мелких деталей, однотонными. Примером может быть торговый центр «Секрет» в г. Гомеле (рисунок 2а). На таких зданиях, где выделяется место для рекламы уже на этапе проектирования, она уместна и хорошо читаема. В то время, как хаотично размещенные объекты на заранее не предназначенном для этого здании выглядят невнятно, создают ощущение запутанности и неаккуратности (рисунок 2б). Здание на рисунке 2б, на наш взгляд, нуждается в реконструкции. Оно находится в самом центре города, но имеет мрачный, темный внешний вид, что портит облик города. А размещенные на таком здании вывески не только ощущаются информационным мусором в общей картине улицы, но и не привлекают внимание должным образом. А огромная красная вывеска на крыше второго этажа, на наш взгляд, нарушает саму архитектурную задумку здания.



Рисунок 2а, б – Вывески на крупных торговых зданиях в г. Гомеле

Рассмотрим два примера зданий с магазинами в первых этажах (рисунок 3). И в одном, и во втором случае сделаны попытки оформить разные магазины, расположенные на одном фасаде в одинаковом стиле. Однако на рисунке 3а, не смотря на использование одинаковой плитки на фасаде, одного материала для цоколя, здание выглядит

грязным и неаккуратным. Все дело в фоне, на котором расположены вывески. Вокруг объектов визуальной информации располагается пространство, которое является своеобразным фоном, – это сам каркас и силуэт города или фасад здания. Этот фон играет немаловажную роль для восприятия и анализа информации, подобно странице в книге, на которой напечатан текст, или стене, на которой висят картины [2]. От фона зависит многое, а зачастую он и сам несет в себе нечто важное и ценное. На втором примере сделан общий фон для всех магазинов, а витрины и вывески у каждого свои (рисунок 3б). Таким образом, получилось сделать цельный фасад, с четким пониманием того, что размещено внутри.



Рисунок 3а, б – Оформление магазинов в первых этажах в г. Гомеле

Первые этажи крупных городских улиц. В городе Гомеле, как и в других городах нашей страны, наибольшую популярность получили рекламные вывески над небольшими магазинами в первых этажах крупных улиц. Примерами могут быть: ул. Советская, пр. Победы, пр. Ленина. В центре города располагается большое количество памятников архитектуры. Для сохранения внешнего облика таких зданий необходимо оставлять их в такой задумке, как их видел автор. Такая информация обычно направлена на пешеходов. Здесь должно быть приятно прогуливаться, рассматривать архитектуру и антураж. С каждым годом на этих улицах появляется все больше летних кафе, оформленных витрин и новых вывесок. Можно отметить, что здесь легко перестараться. В первых этажах центральных улиц г. Гомеля, как и во многих других городах, располагаются магазины, кафе, банки, почтовые отделения и др. Но здания в большинстве своем старые и несут историко-культурную ценность, а значит вся красота фасадов, лепнины, цветового решения не должна быть утеряна. Старые постройки не предполагают размещение на себе рекламы. Они уже сами по себе являются носителями информации, но информации другого характера, они несут в себе историю, память, чувства, возможно, ностальгию. И здесь нужно постараться повесить вывеску кафе или магазина так, чтобы она читалась, но не был нарушен облик здания. На это будет влиять и размеры, и место размещения, и цвет вывески.

Здесь важно отметить, что рекламно-информационные вывески на первых этажах зданий не могут выглядеть исключительно так, как задумал дизайнер вывески. Здесь важна общая картина здания, и все элементы должны быть увязаны между собой [3]. Так, например, недопустимо располагать на одном фасаде нескольких вывесок в разных уровнях. Горазда гармоничнее будут смотреться вывески, расположенные в одну линию. Также такие конструкции не должны перекрывать собой декоративные элементы зданий, должны сочетаться с ним по цвету и иметь размеры, уместно смотрящиеся на фасаде. Важным критерием при разработке дизайна объекта визуальной информации будет его цветовое решение. Цвет вывесок, табличек, указателей должен гармонировать с цветовой гаммой архитектуры. Адресные таблички обычно стандартизированы, имеют четкие очертания и неяркие цвета. С рекламными же вывесками все гораздо сложнее. Для выполнения своей основной функции они должны быть яркими и бросающимися, но необходимо руководствоваться принципом цветового сочетания с фасадом здания, на котором вывеска находится. Для лучшей читаемости важно делать такие объекты на несколько тонов темнее или светлее фона. Неплохие результаты достигаются при использовании на зданиях, являющихся историко-культурной ценностью, монохромных вывесок, табличек, логотипов. Черно-белые цвета не так часто используют в рекламе и на сегодняшний день они способны обратить на себя внимание. Натуральные материалы, а соответствен-

но и цвета, будут также гармонично смотреться на зданиях, имеющих историческую ценность.

Часто бывает так, что бренд уже популярен и узнаваем, но цвет его логотипа не сочетается с цветом фасада. Здесь, на наш взгляд, нужно обратить внимание на размер и месторасположение вывески на фасаде. В первую очередь она не должна быть огромной, а во-вторую – ее следует расположить в свободной от декора плоскости. Если это надпись, то лучше оставить только буквы без подложки. Шрифт, конечно, тоже имеет значение. Так, для вывесок организаций, которые не имеют своего зарегистрированного логотипа, нужно подбирать шрифты в соответствии со стилистикой здания. На рисунке 4 приведены, на наш взгляд, удачные примеры размещения вывесок, которые не нарушают архитектуру построек, а даже напротив дополняют и улучшают внешний вид.



Рисунок 4 а, б, в – Вывески в центре г. Гомеля

Для придания лучшей видимости черно-белой вывеске, состоящей только из букв, добавляется подсветка. В темное время суток наше зрение не способно уловить цветовые нюансы, поэтому цвет подсветки нужно подбирать не под здание, а под освещение всей улицы. Тогда создается целостная структура уличного освещения, уютная атмосфера, гармония. Но, конечно же, уровень освещения не может быть одинаковым в разное время года, а также в разных местах и районах города. Он должен регулироваться и оговариваться в соответствующих разрешениях. Например, чрезмерно яркая подсветка рекламной конструкции в спальном районе может мешать жителям, в то время как на центральных улицах такое освещение будет еще больше оживлять вечерний город.

Хочется еще обратить внимание на витрины магазинов. Далее приведены примеры двух магазинов одежды (рисунок 5а, б). Конечно, более привлекательной выглядит оформленная витрина, нежели заклеенная пленкой. А когда все здание имеет заклеенные пленкой окна, то какая бы реклама и информация на них не находилась, создается ощущение, что здание заброшено, нет света, движения, жизни. Более того, оформленная витрина может менять свое содержание в зависимости от сезона. Такой вариант будет более разумным как с маркетинговой точки зрения, так и для общей картины города. Хочется сказать, что хорошо оформленный, красивый город заставляет людей выходить на улицы, гулять, общаться, посещать заведения, а это неплохой способ развития экономики города. Также визуальная привлекательность важна не только для рекламы и маркетинга, но для эстетической удовлетворенности горожан.



Рисунок 5а, б – Оформление витрин в г. Гомеле

Городские жители настолько привыкли к потреблению различной информации, что даже стали испытывать информационный

голод, находясь в местах, где эту информацию невозможно получить. Нам уже будет сложно жить в пустом городе. Он будет казаться нам скучным, неинтересным, будет создаваться ощущение, что чего-то не хватает. Без вывесок мы не понимаем, что находится за стенами зданий, и от этого здания нам кажутся пустыми, неиспользуемыми. На рисунке 6 нам удалось запечатлеть город с прекрасной архитектурой, но с отсутствием дополнительной визуальной информации. Мы не уверены, что современный человек смог бы жить в такой обстановке. Отсюда вытекает один из выводов данной статьи. Всего должно быть в меру, полное отсутствие или чрезмерное присутствие дополнительной информации одинаково сложно воспринимается нашим взглядом. Чувство тревоги может возникать как в пустоте, так и в перенасыщении.



Рисунок 6а, б, в – Улицы без дополнительной визуальной информации в г. Гомеле

Заключение

Анализируя город Гомель с точки зрения насыщения его объектами визуальной информации, можно сказать, что город не находится в критической ситуации и данной теме уделяется внимание. Однако встречаются не совсем приятные для глаза места. Это все поправимо, если придерживаться определенных правил, которые, на наш взгляд, должны быть отдельными для каждой рассмотренной в данной статье группы объектов. Нами предложены три основных места концентрации информации, но это не означает, что в отдельных случаях она не может находиться в других местах. Но когда есть структура – появляется понимание, четкость и ясность. Все это важно в современном мире, где технологии позволяют создать любые макеты, любого цвета, любого размера. Очень важно, чтобы, гуляя по улицам города, мы чувствовали себя в безопасности, а это возможно лишь в гармоничной среде, целостной, стилистически единой. И на нас лежит огромная ответственность за сохранение облика города, не смотря на насыщение визуальной информацией.

Список цитированных источников

1. Глазычев, В. Л. Урбанистика / В. Л. Глазычев. – М. : Европа; Новая площадь, 2008. – 218 с.
2. Малков, И. Г. Классификация объектов архитектурно-визуальной информации и условия их размещения / И. Г. Малков, А. В. Толочко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8. – С. 89–95.
3. Малков, И. Г. Архитектура Гомеля: монография / И. Г. Малков, И. И. Малков, А. В. Евстратенко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 176 с.

References

1. Glazychev V. L. Urbanistika / V.L. Glazychev. – M.: Evropa; Novaya ploshchad', 2008. — 218 s. — ISBN 978-5-9739-0148-6.
2. Malkov, I. G. Klassifikaciya ob"ektov arhitekturno-vizual'noj informacii i usloviya ih razmeshcheniya / I. G. Malkov, A. V. Tolochko // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2022. — № 8. – S. 89–95.
3. Malkov, I. G. Arhitektura Gomelya: monogr. / I. G. Malkov, I. I. Malkov, A. V. Evstratenko. – Gomel': BelGUT, 2021. – 176 s.

Материал поступил 17.01.2023, одобрен 08.02.2023, принят к публикации 10.02.2023

ТЕХНОЛОГИЯ ДОЛГОВЕЧНОГО БЕТОНА ДЛЯ МОРСКИХ ПОРТОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МОРОЗНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. В. Малюк¹, В. Д. Малюк², С. Н. Леонович³, А. В. Колодей⁴

¹ Генеральный директор ООО «Трансстрой-Трест», e-mail: tstest@bk.ru

² К. т. н., научный директор ООО «Трансстрой-Трест», e-mail: tstest@bk.ru

³ Д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Строительные материалы и технология строительства»
УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: leonovichsn@tut.by

⁴ Инженер кафедры «Строительные материалы и технология строительства»
УО «Белорусский национальный технический университет», e-mail: zhuravskaya.alin@yandex.by

Реферат

Несмотря на то, что принципиально проблема долговечности бетона для морских и транспортных сооружений в суровых климатических условиях решена, случаи преждевременного разрушения конструкций наблюдаются и в настоящее время. Результаты натурных обследований показывают, что разрушения бетона в конструкциях могут носить как локальный, так и глобальный характер. Установлено, что при соответствии свойств бетона внешним воздействиям безремонтный срок эксплуатации может составить не менее 100 лет. Примеры строительства и эксплуатации морских портовых сооружений на Сахалине являются этому подтверждением. Изучение механизмов замораживания и разрушения бетона при морозном воздействии с учетом реальных показателей качества бетона показало, что в технологии бетона есть значительные резервы, которые можно использовать для повышения долговечности бетона, не прибегая к ее усложнению. Однако в условиях строительной площадки эти резервы должным образом не реализуются в силу объективных и субъективных причин. Поэтому основная цель технологии долговечного бетона – организовать в условиях строительной площадки изготовление конструкций с показателями качества бетона, которые соответствуют проектным показателям.

Ключевые слова: морозное воздействие, технология долговечного бетона, морские портовые и транспортные сооружения, уровень критической зрелости структуры бетона, прогноз срока службы.

DURABLE CONCRETE TECHNOLOGY FOR SEAPORT AND TRANSPORT FACILITIES IN FROSTY ENVIRONMENTS

V. V. Malyuk, V. D. Malyuk, S. N. Leonovich, A. V. Kolodey

Abstract

Despite the fact that in principle the problem of durability of concrete for marine and transport structures in harsh climatic conditions has been solved, cases of premature destruction of structures are observed at the present time. The results of field surveys show that the destruction of concrete in structures can be both local and global. It is established that if the properties of concrete correspond to external influences, the maintenance-free service life can be at least 100 years. Examples of the construction and operation of seaport facilities on Sakhalin are a confirmation of this. The study of the mechanisms of freezing and destruction of concrete under frost exposure, taking into account the real indicators of the quality of concrete, showed that there are significant reserves in concrete technology that can be used to increase the durability of concrete without resorting to its complication. However, in the conditions of the construction site, these reserves are not properly realized due to objective and subjective reasons. Therefore, the main goal of durable concrete technology is to organize the manufacture of structures with concrete quality indicators that meet the design indicators in the conditions of the construction site.

Keywords: frost exposure, long-lasting concrete technology, sea port and transport facilities, the level of critical maturity of the concrete structure, service life forecast.

Введение. Состояние вопроса

Исследование показателей качества бетона в сооружениях показывает, что за счет оптимизации технологического процесса бетонных работ можно обеспечить безремонтный срок службы конструкций в зоне переменного уровня воды не менее 100 лет, используя традиционную технологию бетона. Для практики важно определить минимальный набор параметров, необходимых для контроля технологического процесса производства. Безусловно, оптимальное решение находится путем выбора определяющего критического параметра, который влияет на долговечность бетона в конкретных условиях эксплуатации, поскольку это позволит реально управлять технологией для получения долговечных конструкций [1–24].

Выполненные исследования показали, что критическим периодом для долговечности бетона является первый зимний период эксплуатации, в течение которого продолжает формироваться структура бетона. Есть основания считать, что существует уровень критической зрелости структуры бетона, который позволяет обеспечить сохранность параметров поровой структуры бетона в первый зимний период и создать условия для совершенствования ее в дальнейшем.

Критическая зрелость бетона

Даны предложения по оценке критической зрелости бетона и рассмотрены факторы, от которых зависит этот показатель. В качестве критической (эталонной) зрелости (S_{α}) целесообразно рассматривать структурные характеристики бетона, формирование

которых происходит при нормальных условиях твердения. Исходя из этого, косвенными параметрами критической зрелости структуры бетона являются основные параметры режима твердения в соответствии с действующими нормативными документами: продолжительность твердения 28 суток (T_{28}), температура среды плюс 15 °C (t_{15}) и влажность среды не менее 95 % (P_{95}), т. е. $S_{\alpha} = f(T_{28}; t_{15}; P_{95})$.

Реальная технология бетона на строительной площадке не всегда способна обеспечить нормативные параметры режима твердения, поэтому случаи преждевременного разрушения бетона следует связывать с тем, что уровень фактической зрелости структуры (S_f) не соответствует уровню критической зрелости, т. е. ($S_f < S_{\alpha}$). Уровень зрелости структуры бетона влияет на развитие процессов в период инициации и деградации. В процессе твердения бетона из трех выделенных параметров режима: (T_{28}), (t_{15}) и (P_{95}) любой может иметь определенное несоответствие. При нормативных условиях твердения показатель S_{α} можно оценить количественно, например, $S_{\alpha} = 1$. Для практики важно знать последствия этих несоответствий. Поэтому важно установить следующее:

- значимость параметров режима твердения для формирования структурных характеристик, влияющих на кинетику водонасыщения;
- граничные значения каждого параметра для водонасыщения в реальных условиях эксплуатации;
- технологические мероприятия, позволяющие снизить чувствительность морозостойкости бетона к параметрам режима твердения.

Прогноз срока службы

Проведенные исследования показывают, что модели прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия должны строиться исходя из того, что процесс коррозии бетона в этих условиях имеет две характерные стадии, которые имеют также характерные этапы. Организация технологии бетонных работ должна строиться исходя из поставленной цели. В одном случае целью может являться получение долговечного бетона, в другом – получение бетона с требуемыми эксплуатационными показателями в нормируемый срок конструкции.

Срок службы долговечного бетона определяется условием $S_{ACT} < S_{CR}$. Проведенные исследования показывают, что долговечные бетоны со сроком службы более 100 лет реально получить в условиях строительной площадки. Определяющим требованием при этом является создание структурных параметров бетона, которые соответствуют условиям эксплуатации, т. е. способны обеспечить условие $S_{ACT} < S_{CR}$ в первый зимний период, т. е. на этапе ($T_{ИН}^1$). Поэтому выбор технологических решений для изготовления долговечных конструкций должен быть основан на гарантированном обеспечении условия $S_{ACT} < S_{CR}$ в первый зимний сезон. Исходя из сложности ремонта поврежденных конструкций портовых и транспортных сооружений, проектирование бетона и технология бетона должны учитывать эту особенность. Поэтому есть все основания принимать решения по проектированию состава бетона и назначению технологических режимов изготовления конструкций на основании получения долговечного бетона.

Принципы совершенствования бетонных работ

Практический интерес для технологии бетона представляют факторы, позволяющие за счет качественных показателей бетона обеспечить на первом этапе ($T_{ИН}^1$) условие $S_{ACT} < S_{CR}$. В связи с этим принципы совершенствования технологии бетонных работ должны быть основаны на возможности снижения чувствительности структуры бетона к морозному воздействию на этапе $T_{ИН}^1$. Для этого необходимо знать закономерность кинетики водонасыщения бетона от морозного воздействия на этапе $T_{ИН}^1$. Анализ многочисленных литературных данных показывает, что вопрос развития процессов коррозии на пе $T_{ИН}^1$ наименее исследован в проблеме морозостойкости бетона. Как правило, коррозия бетона исследуется в период деградации или на бетонах, условия твердения которых были нормальные.

Лабораторный подбор составов бетона можно отнести к первому этапу технологии бетонных работ, поскольку рабочий состав бетона, принятый на основании лабораторных подборов, в дальнейшем используется для отработки технологических режимов. Результаты проведенных исследований показывают, что в лабораторных условиях, применяя предписывающий принцип проектирования долговечности бетона, можно получить бетон с маркой по морозостойкости F_21000 и выше. Однако необходимо иметь в виду, что повышение требований к показателям качества усложняет технологию на строительной площадке. Поэтому важно принять обоснованное сбалансированное техническое решение на этапе строительства и эксплуатации сооружения.

Роль воздуховлечения на морозостойкость бетона

Установлено, что за счет применения воздуховлекающих добавок ВВД в бетоне можно существенно увеличить стадию инициации. Считают, что ВВД снижают чувствительность бетона к морозному воздействию за счет возможности перераспределения влаги из полностью насыщенных капиллярных пор в условно замкнутые воздушные поры.

Имеются результаты исследований, которые свидетельствуют о важной роли воздуховлечения на морозостойкость бетона при стандартных испытаниях, т. е. когда обеспечена критическая зрелость структуры бетона (S_{cr}). Установлен факт, что с увеличением в бетоне воздуховлечения может наблюдаться увеличение морозостойкости бетона. Это дает основание считать, что в реальных условиях такая же тенденция будет проявляться для долговечности бетона. Имеются немногочисленные исследования, которые показывают, что ВВД позволяют снижать чувствительность бетона к морозному воздействию на ранних сроках твердения, т. е. когда $S_f < S_{cr}$. Например, считают, что за счет ВВД можно сократить срок выдерживания бетона до воздействия мороза после пропаривания. Следовательно, воздуховлечение может положительно влиять на процессы формирования структуры бетона на этапе $T_{ИН}^1$. Это дает основание рассматривать возможность применение ВВД для снижения

требований к критической зрелости бетона при морозном воздействии, когда преобладающим видом воздействия являются циклы замораживания-оттаивания. Поэтому важно оценить роль воздуховлечения на процессы водонасыщения пор на этапе $T_{ИН}^1$. Значимость влияния воздуховлечения для этапов $T_{ИН}^1$ и $T_{ИН}^2$ может быть различной. Результаты исследований показывают, что роль ВВД может зависеть от механизма замораживания бетона.

Для рассматриваемого случая, т. е. при $S_{ACT} = f(t_f, N_{FT})$, наиболее изучен вопрос влияния воздуховлечения для этапа $T_{ИН}^2$, когда бетон твердел в нормальных условиях. Предполагая, что морозостойкость бетона косвенно характеризует процессы его водонасыщения при многократных циклах ПЗО, очевидно, можно прогнозировать по морозостойкости кинетику водонасыщения пор бетона с воздуховлекающими добавками.

В условиях строительной площадки часто возникают вопросы по обеспечению нормативных требований по воздуховлечению бетонной смеси. Как уже отмечалось, основная проблема заключается в том, что вовлеченный воздух не дозируется непосредственно в бетонную смесь как остальные составляющие, а является производной от многих факторов, которые в условиях строительной площадки трудно учитывать. Многофакторность зависимости морозостойкости не позволяет установить четкой количественной связи между морозостойкостью и воздуховлечением, поскольку эффект повышения морозостойкости также зависит от других факторов: В/Ц, минералогического состава цемента, качественных показателей мелкого и крупного заполнителей и др., которые влияют на формирование параметров порового пространства. Недостаточная изученность роли искусственного воздуховлечения для морозостойкости бетона проявляется в том, что нормативные требования к воздуховлечению существенно различаются. Например, для бортовых камней диапазон воздуховлечения установлен от 4 до 5 %, для дорожных и аэродромных покрытий – от 5 до 7 %. При эксплуатации конструкций в морской воде величина воздуховлечения нормируется в зависимости от размера крупного заполнителя и В/Ц бетонной смеси и имеет однозначную величину без каких-либо отклонений. Например, при В/Ц = (0,41 – 0,50) и наибольшем размере крупного заполнителя 20 мм воздуховлечение должно быть 4 %.

Данный подход к нормированию воздуховлечения ставит перед производителями бетонной смеси сложную задачу, когда заказчик устанавливает требования к параметрам воздуховлечения при доставке бетонной смеси на удаленные строительные объекты.

Морозостойкость бетона в основном зависит от обеспеченности нижнего предела искусственного воздуховлечения. Оптимальное значение содержания воздуха определяют в 4,0 %, но минимальное значение, которое обеспечивает морозостойкость, может быть 1,5–2,0 %.

Сценарии на строительной площадке

На строительной площадке ситуация может развиваться по двум сценариям:

Сценарий 1 – показатели качества бетонной смеси в момент укладки в конструкцию не соответствуют заявленным требованиям. В частности, если номинальное значение воздуховлечения не обеспечены, следует предполагать, что не будут обеспечены требования по морозостойкости бетона. В дальнейшем это может негативно отразиться на долговечности и сроке службы конструкции.

Сценарий 2 – смесь при несоответствии качественных показателей не допускается к укладке в конструкцию, т. е. смесь будет забракована. В этом случае у поставщика продукции возникает проблема с реализацией или утилизацией некачественной продукции. Этот сценарий в отечественной практике рассматривается очень редко, но опыт строительства инфраструктуры на нефтегазовых шельфовых объектах Сахалина показал, что это вполне реальный случай. Для устройства дорожного покрытия на морском причале завода сжиженного природного газа (СПГ) в п. Пригородное (о. Сахалин) для подящика были установлены требования к показателям качества бетонной смеси на строительной площадке: воздуховлечение- 4 ± 1 % абс.; подвижность – марка ПЗ (ОК 10–15 см).

Входной контроль на объекте предусматривал приемку каждого автобетоносмесителя.

Материалы экспериментального исследования

Проектные требования к бетонной смеси: БСТ В35 ПЗ F200 W6 ГОСТ 7473-2010. Номинальный состав бетона по результатам лабораторного подбора был принят следующий:

цемент (Спасский, ПЦ-500 ДОН) – 500 кг/м³;
 песок (кварцевый, Мкр 2,5) – 710 кг/м³;
 щебень (амфиболит, фракция 5-20 мм, Мдр-1200) – 1140 кг/м³;
 добавки: ПФМ-НЛК (ТУ 5745-022-58042865-2007) – 0,5 % сухого вещества от массы цемента;
 СНВ (ТУ 14-00281074-75-98) – 0,01 % сухого вещества от массы цемента.

Водоцементное отношение (В/Ц) составляло 0,35.
 Добавка (ПФМ-НЛК) – полифункциональный модификатор бетона, относится к классу сильнопластифицирующих добавок, повышающих показатели долговечности бетона – морозостойкость, водонепроницаемость и коррозионную стойкость. Одним из физико-химических показателей добавки является повышение воздухововлечения.

Добавка СНВ (смола нейтрализованная воздухововлекающая) – относится к воздухововлекающим добавкам. Высокая эффективность действия добавки СНВ проявляется при использовании в комплексе с пластифицирующими и суперпластифицирующими добавками.

В лабораторных условиях в процессе подбора состава бетона было установлено, что максимальное воздухововлечение с добавкой (ПФМ-НЛК) составляет 4 %, которое может снижаться до 2 % в течение 60 минут. Показатели качества бетонной смеси и бетона определяли стандартными методами.

Производственные испытания показали, что с помощью добавки (ПФМ-НЛК) нельзя обеспечить требуемые показатели по воздухововлечению при длительной транспортировке смеси. В течение 120 минут транспортировки происходило снижение воздухововлечения на 2–3 % абс. и на месте укладки оно могло быть в пределах 1,5–2,5 %, что не соответствовало требованиям заказчика. С целью обеспечения требуемого воздухововлечения специалисты ООО «Трансстрой-Тест» предложили применить комплексную добавку СНВ + (ПФМ-НЛК), что позволило за счет дозирования добавки СНВ получать необходимое воздухововлечение на выходе из бетоносмесителя. Опыт показал, что регулировать воздухововлечение добавкой (ПФМ-НЛК) за счет дозирования и увеличения продолжительности перемешивания неэффективно, поскольку отсутствует тесная корреляционная связь между воздухововлечением (далее – ВВ) и продолжительностью перемешивания.



Рисунок 1 – Процесс подготовки (а) и испытание (б) бетонной смеси на объекте

На объекте и на бетоносмесительном узле (БСУ) было проведено по 40 контрольных испытаний, что позволило объективно оценить качественные показатели бетона и бетонной смеси.

Таблица 1 – Сравнительные показатели качества бетонной смеси и бетона на БСУ и объекте

Статистические показатели	Технологические показатели бетонной смеси				Прочность при сжатии бетона, МПа	
	БСУ		Объект		БСУ	Объект
	ОК, см	ВВ, %	ОК, см	ВВ, %		
Среднее значение	22,8	6,1	8,7	4,2	42,7	42,1
Коэффициент вариации	5,4	9,2	17,0	16,9	12,7	15,4

Примечание – прочность бетона определена на образцах, твердевших в нормальных условиях.

Испытания проводились параллельно на заводе и строительной площадке. Результаты испытаний бетонной смеси и бетона, приведенные в таблице 1, показывают, что при транспортировании бетонной смеси в течение 100–150 минут подвижность бетонной смеси по ОК с 23 см снижалась до 9 см. При этом существенно снижается стабильность подвижности. В связи с этим было принято решение применять двухэтапное дозирование добавки ПФМ-НЛК. Основная часть добавки СНВ + (ПФМ-НЛК) вводилась в процессе приготовления бетонной смеси на БСУ, а часть добавки (ПФМ-НЛК) вводилась на объекте после проверки подвижности и содержания воздуха. После введения добавки бетонной смеси перемешивалась в автобетоносмесителе в течение 5 минут, а затем повторно проводилась проверка воздухововлечения и подвижности. Это позволило обеспечить требуемую марку подвижности ПЗ – среднее значение подвижности смеси поднялось с 9 до 11 см, и повысить однородность подвижности – коэффициент вариации снизился с 17 до 14 %. Фактически осуществлялось ручное регулирование технологического процесса. Однако это позволило на 100 % обеспечить требуемую марку подвижности ПЗ.

Воздухововлечение бетонной смеси за период перевозки изменялось незначительно и соответствовало требуемым параметрам. Минимальное требуемое значение искусственного воздуха 3 % на объекте обеспечивалось на 100 % при среднем значении 4,2 % и коэффициенте вариации 16,9 % (таблица 1). Стабильность воздухововлечения смеси на БСУ завода более высокая – коэффициент вариации составил 9,2 % против 16,9 % на объекте. Испытания бетонной смеси показали, что применение комплексной добавки СНВ + (ПФМ-НЛК) позволяет надежно обеспечить минимальное содержание воздуха 3 %.

Вопрос о необходимости жесткого ограничения воздухововлечения в настоящее время остается открытым. Отмечают, что для придания высокой морозостойкости может быть достаточно 1,5 % воздуха. Эффективность воздухововлечения зависит как от количества вовлеченного воздуха, так и от его качества. Следует отметить, что после виброуплотнения содержание воздуха в бетонной смеси в конструкции может меняться как в большую, так и в меньшую сторону, поскольку на объекте этот процесс не контролируется. Отсутствие оперативных методов оценки воздухововлечения в конструкциях не позволяет надежно оценивать соответствие качества бетона в конструкции по содержанию воздуха.

Установлено, что высокая морозостойкость может обеспечиваться при воздухововлечении в диапазоне от 2 до 11 %. В этом диапазоне нет проблем обеспечения нормативной морозостойкости, однако это может существенно влиять на прочностные показатели бетона. А. М. Невилль приводит данные о том, что общая потеря прочности на сжатие может составлять 3–6 % на каждый процент содержания воздуха. Высокая неоднородность по воздухововлечению рассматривается в качестве одной из причин высокой неоднородности бетона по прочности при использовании воздухововлекающих добавок.

В нашем случае отмечена более высокая неоднородность прочности бетона на объекте (см. таблицу 1). При равной средней прочности бетона на объекте отмечена более высокая неоднородность прочности: класс В35 при коэффициенте вариации 15,4 % и средней прочности 42,1 МПа обеспечен лишь на 86 %. Следовательно, у заказчика возникает вопрос о соответствии бетона требуемым показателям качества. Как видно, подрядчику приходится решать много вопросов по оценке качественных показателей и оценке соответствия бетонной смеси и бетона.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты проведенной работы показывают, что при значительной удаленности объекта от производственных баз обеспечить технологические показатели бетонной смеси можно при высоком уровне лабораторного и строительного контроля. Практика показывает, что применение комплексной добавки СНВ + ПФМ-НЛК позволяют надежно обеспечивать требования по ВВ. Несмотря на технологичность применения полифункциональных добавок, надежное регулирование ВВ и обеспечение нормативных требований по ВВ возможно за счет применения комплексных добавок ПАВ. Отсутствие практических расчетных методов, основанных на зависимости морозостойкости бетона от воздухоовлечения, не позволяет принимать оптимальные экономические решения по составам и технологии бетона. Это предопределяет необходимость дальнейшего изучения стойкости бетона от морозных воздействий с воздухоовлекающими добавками с учетом опыта строительства и эксплуатации сооружений в конкретных природно-климатических условиях.

Следует отметить, многообразие предлагаемых добавок часто ставит перед строителями вопрос о критериях выбора. На практике применение новых добавок часто основано не на эффективности их действия, а на ценовой составляющей добавки. Профессионально на этот вопрос можно ответить только после лабораторных сравнительных испытаний, которые в настоящее время отличаются сложностью и большой продолжительностью. В связи с этим актуальным является вопрос разработки простых методов и приборов для оценки соответствия бетонной смеси и бетона в конструкциях.

Исследование морозостойкости бетона с различными добавками, выполненные для оптимизации режимов технологии бетона для конкретного объекта, позволили установить возможность получения нормативной морозостойкости F_{200} при различном содержании воздуха в бетоне. Результаты исследований дают основания судить о кинетике водонасыщения бетона с воздухоовлечением. Оптимальным вариантом для производства является вариант применения бетонной смеси с минимальным содержанием воздуха, поскольку это связано с прочностными показателями бетона. Сочетание воздухоовлекающих гидрофобизирующих ПАВ типа СНВ с пластифицирующими гидрофилизующими добавками типа СДБ обеспечивает более стабильное, менее подверженное влиянию изменяющихся технологических факторов повышение морозостойкости.

Результаты сравнительных стандартных испытаний на морозостойкость позволяют в определенной степени прогнозировать влияние воздухоовлечения на долговечность бетона в конструкциях. Однако оптимизация технологии бетона должна строиться на основе реальной работы конструкций в сооружении с учетом механизма замораживания бетона. Пример эксплуатации сооружения К1 показывает, что обычные бетоны могут обеспечивать срок службы не менее 100 лет. Исходя из этого, срок службы бетона с воздухоовлекающими добавками должен быть значительно больше, т. е. это срок с практической точки зрения можно принять как бесконечный. Опыт эксплуатации на Сахалине портовых сооружений показывает, что конструкции из бетона с воздухоовлекающими добавками имеют срок службы не менее 50 лет. Поэтому возникает вопрос о назначении рациональной величины воздухоовлечения с учетом реальных условий эксплуатации и нормируемого срока службы сооружения.

Факторы, влияющие на период инициации

Как отмечалось выше, продолжительность периода инициации определяется качеством структуры бетона, которая формируется на двух этапах. Период $(0 - T_1)$ представляет первый из двух этапов периода инициации, который должен характеризовать способность пор бетона к водонасыщению в период $T_{1\text{ин}}$. Результаты выполненных исследований дают основания полагать, что эта способность определяется двумя факторами: уровнем начальной зрелости структуры бетона и условиями морозного воздействия, при этом второй фактор может быть решающим в условиях, когда $S_\alpha < 1$. Пример эксплуатации конструкций оградительного сооружения КЗ-1 показывает, что при $S_\alpha < 1$ в зоне действия прилива, даже при оттаивании в морской воде, температура которой в зимний период находится в пределах $+1^\circ\text{C} \dots -2^\circ\text{C}$, условия могут быть благоприятными для последующей гидратации

цемента. Как отмечено ранее, при замораживании бетона на воздухе может происходить осушение пор бетона, т. е. приводить к снижению водонасыщения пор в поверхностном слое. Следовательно, при морозных воздействиях на бетон в зоне переменного уровня воды, когда преобладающими факторами являются t_f и N_{Ft} , реально существуют благоприятные условия для дальнейшего формирования структуры при зрелости структуры ниже критической. Исследования показывают, что в условиях эксплуатации морских портовых сооружений высокая стойкость бетона к морозному воздействию может обеспечиваться методами традиционной технологии бетона без применения современных методов, основанных на применении воздухоовлекающих добавок.

Особенности морозной деструкции транспортных сооружений

Результаты исследований бетона транспортных сооружений при работе в условиях применения ПГМ показывают, что бетон в зимний период подвержен более суровым морозным нагрузкам, чем бетон конструкций портовых сооружений. При этом составляющими морозной нагрузки, которые определяют ее значения, являются температура воздуха в районе строительства и число циклов ПЗО при этой температуре замораживания, т. е. бетон подвержен действию нагрузки вида $R_{F1} = f(t_f, N_{Ft})$. Высокая суровость воздействий определяется и тем, что замораживание бетона может происходить в растворе солей, а не на воздухе, как это имеет место в зоне отлива-прилива портовых сооружений. Результаты исследований показывают, что стандартные испытания бетона на морозостойкость методом ускоренных испытаний при замораживании образцов в соляном растворе до температуры -50°C в наибольшей степени эмитируют реальную работу бетона в конструкциях транспортных сооружений. Поэтому технология бетонных работ и методы прогнозирования бетона для этих условий должны отрабатываться с учетом испытаний на морозостойкость по этой методике стандартных испытаний.

Результаты проведенных исследований дают основания считать, что при механизме замораживания бетона, в котором преобладающими факторами являются температура замораживания бетона (t_f) и длительность (T_f), т. е. при нагрузке вида R_{F2} , преобладающий механизм разрушения бетона обусловлен процессами влагопереноса внутри бетона. Характер и вид разрушений бетона в конструкциях подтверждает это. Поэтому требования к технологии бетона для обеспечения долговечности при морозной нагрузке вида R_{F2} в сочетании с обледенением должны учитывать работу механизма разрушения от этой нагрузки. Особенность эксплуатации конструкций в условиях длительного обледенения принципиально меняет механизм замораживания бетона и механизм водонасыщения пор. Формирование структура бетона в условиях длительного замораживания, исходя из теории структурообразования и гипотез механизмов разрушения бетона при воздействии мороза, связаны с процессами тепло- и влагообмена. За счет этих процессов, очевидно, возможно перераспределение влаги и насыщение пор бетона в определенных слоях бетона до критической степени. Данный процесс не моделируется при стандартных испытаниях, т. к. образцы представляют замкнутую систему, в которой практически исключаются процессы тепло- и влагообмена, характерные для массивных конструкций. Есть основания полагать, что разрушение бетона в конструкциях сооружений КЗ-1 и КЗ-2 обусловлено этими процессами. Поэтому для исключения разрушений бетона должны разрабатываться технологические приемы, позволяющие снизить чувствительность бетона к этим условиям эксплуатации, т. е. ограничить процессы влагопереноса на этапе $T_{1\text{ин}}$. Классический прием в технологии бетона, исключающий разрушение бетона при различных механизмах замораживания, это организация технологии бетона в соответствии с регламентами, действующих нормативных документов. Как было отмечено выше, на строительной площадке основные проблемы возникают на переле обеспечения нормативных требований к условиям твердения, т. е. к созданию условий для формирования критической зрелости структуры. Для случая, когда в условиях обледенения водонасыщение пор определяется зависимостью $S_{ACT} = f(t_f, T_f)$, на этапе $T_{1\text{ин}}$ отсутствуют благоприятные внешние условия для снижения водонасыщения пор при замораживании, которые возникают при замораживании бетона на воздухе.

Целесообразные технологические приёмы

Целесообразно использовать технологические приемы, за счет которых можно интенсифицировать процессы гидратации цемента в условиях, когда водонасыщения определяется зависимостью $S_{ACT} = f(t_F, T_F)$, а уровень фактической зрелости структуры бетона (S_t) ниже уровня критической зрелости, т. е. ($S_t < S_{cr}$). Опыт эксплуатации портовых сооружений показывает, что глобальные разрушения бетона могут быть после первого зимнего периода, несмотря на организацию бетонных работ, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Характер разрушения бетона в конструкциях дает основание считать, что это происходит по следующим причинам:

- не обеспечены условия для формирования критической зрелости структуры бетона;
- применяли бетонную смесь с повышенной подвижностью.

Эти причины являются преобладающими в перечне других, которые влияют на стойкость бетона в условиях морозного воздействия. Безусловно, эти причины являются устранимыми при организации бетонных работ в соответствии с установленными правилами. Однако, поскольку эти причины являются характерным для строительной площадки, целесообразно устранение этих причин осуществлять на основе совершенствования технологии бетона.

Исходя из положений структурной теории бетона и влияния добавок разных классов на формирование структуры цементного камня в бетоне, имеет смысл для совершенствования технологии исследовать влияние комплексных добавок электролитов и ПАВ на долговечность бетона в зоне переменного уровня, когда преобладающим факторами морозного воздействия является температура (t_F) и длительность (N_{FT}) замораживания бетона. Полагают, что введение добавок электролитов приводит к увеличению микропористости цементного камня и понижает содержание льда в том же направлении, что и снижение В/Ц в бетоне. Введение добавок электролитов, остающихся в заметных количествах в поровой жидкости цементного камня, уменьшает коэффициент объемного расширения воды, изменяет температуру кристаллизации льда, ухудшает структурно-механические характеристики (прочность и чешуйчатость) льда. В результате в бетоне не происходит заметных деструктивных явлений, отражающихся на его прочности. Данный подход к повышению морозостойкости бетона практического применения пока не нашел.

Есть основание считать, что технологический прием, позволяющий обеспечить достаточное содержание в цементном камне резервных пор при одновременной минимизации объема капиллярных пор и длительное сохранение в жидкой фазе введенных веществ, может существенно повысить долговечность и обеспеченность стойкости бетона в зоне переменного уровня воды. Малая изученность этого вопроса дает основание считать, что исследования в данном направлении являются перспективными и могут найти широкое практическое применение.

Срок службы бетона может оцениваться по долговечности и работоспособности. В данной работе исследованы факторы, определяющие срок службы бетона 100 лет и более, не затрагивая работу бетона при снижении нормативных показателей бетона по прочности.

Выводы

1. В настоящее время проектирование бетона по предписываемому принципу решает проблему долговечности бетона в агрессивных средах класса XF 4. Случаи разрушения новых конструкций в зоне переменного уровня после первого зимнего сезона, т. е. через 3...4 месяца эксплуатации, необходимо связывать не с методами проектирования бетона, а с применением в условиях строительной площадки технологии бетонных работ, не позволяющей обеспечить нормируемые требования к бетону. Поэтому решение проблемы долговечности портовых сооружений на основе повышения морозостойкости и усложнения технологии бетона не всегда являются экономически целесообразными. На данном этапе проблема долговечности бетона морских портовых и транспортных сооружений заключается не в получении бетонов высокой морозостойкости, а в технологии, позволяющей надежно обеспечивать нормируемые показателями бетона по долговечности в конструкциях. В настоящее время случаи пре-

временного разрушения конструкций связаны в основном с нарушением Правил ухода за твердением бетона. В результате не обеспечиваются условия для формирования поровой структуры с параметрами, необходимыми для морозостойкого бетона. Это связано как субъективными, так и объективными причинами. В условиях строительной площадки не всегда можно на раннем этапе обеспечить нормируемые условия твердения. Однако и для заводского изготовления конструкций наблюдаются это несоответствие. В последнее время стремление максимально сократить сроки строительства приводит к нарушению требований к условиям твердения бетона в конструкциях. Это является основной причиной снижения реального срока службы конструкций. Наблюдаются не только деградационные отказы, которые характеризуются длительностью процесса разрушения, происходят внезапные отказы, для которых характерно разрушение после первого зимнего сезона. В последнем случае наблюдаются глобальные разрушения бетона в конструкциях.

Характер и вид разрушений бетона в конструкциях дает основание считать, что преобладающими причинами разрушения бетона в условиях морозного воздействия являются следующие:

- условия твердения бетона в начальный период формирования структуры бетона не соответствует нормируемым;
 - применяются бетонные смеси с повышенной подвижностью, а следовательно, с высоким водосодержанием.
2. Гипотеза, принятая для исследований, в основе которой процесс коррозии бетона при морозном воздействии рассматривается как двухстадийный, подтверждается результатами как лабораторных, так и натуральных исследований, основанных на обследовании сооружений со сроком службы от 1 года до 100 лет. Двухстадийная модель коррозии предполагает наличие стадии инициации и деградации, поэтому срок службы следует рассматривать как интегральную характеристику, которая включает период инициации и деградации. Стадия инициации характеризует период, в течение которого показатели качества бетона должны повышаться в соответствии с положениями структурной теории цементных бетонов. Исходя из предложенной концепции прогнозирования срока службы, модели прогноза срока службы сооружений в агрессивных средах XF 4 целесообразно рассматривать из условий долговечности и работоспособности. Стадия деградации обусловлена процессами образованием микротрещин в структуре бетона и может использоваться для прогноза срока службы при проектировании по эксплуатационной пригодности конструкции. В настоящее время известные модели прогноза, предложенные G. Fagerlund, E. Vesikari, рассматривают срок службы исходя из оценки только одной стадии – стадии инициации или деградации.
 3. Долговечность бетона формируется в ранний период структурообразования и определяется двумя критическими показателями: видом системы капиллярных пор и наличием свободной воды, способной к влагопереносу к зонам промерзания.

В бетоне морских портовых и транспортных сооружений эффект действия этих показателей определяется механизмом замораживания бетона. В условиях, когда преобладающим фактором в механизме замораживания являются циклы попеременного замораживания и оттаивание определяющим фактором является дискретность системы капиллярных пор. В условиях длительного замораживания с обледенением определяющим показателем является наличие свободной воды в порах бетона к моменту замораживания, поскольку механизм разрушения бетона будет обусловлен процессами влагопереноса внутри бетона. Особенность эксплуатации конструкций в условиях длительного обледенения принципиально меняет механизм замораживания бетона и механизм водонасыщения пор. Поэтому при расчете состава бетонной смеси необходимо ограничить водосодержание, т. к. этот показатель к началу морозного воздействия будет определять наличие свободной воды в бетоне, способной к миграции при градиенте температур.

В конструкциях транспортных сооружений трудно выделить преобладающий механизм замораживания бетона, поскольку в течение зимнего периода они могут действовать совместно. Характер и вид разрушений бетона в этих конструкциях дает основание считать, что может проявляться синергетический эффект от действия этих

механизмов, в результате морозная нагрузка на бетон может существенно увеличиваться по сравнению с морозной нагрузкой на бетон в морских портовых сооружениях.

4. Стойкость бетона в агрессивных средах класса XF 4 зависит от максимальной морозной нагрузки, которая возникает в результате неблагоприятного сочетания факторов ее определяющих. Агрессивная среда в виде морской воды и химических противогололедных материалов не оказывает влияние на долговечность бетона, когда процесс коррозии протекает на стадии инициации. Поэтому при проектировании составов бетона для морских сооружений основное внимание следует уделять обеспечению стойкости бетона к морозному воздействию на ранних этапах твердения бетона.
5. Совершенствование технологии бетонных работ необходимо строить исходя из того, что при первом загрузке максимальной морозной нагрузкой не допускается повреждение поровой структура бетона. Проектирование долговечности бетона по эксплуатационным характеристикам для агрессивных сред класса XF 4 целесообразно учитывать следующее:
 - преобладающий механизм замораживания бетона в конструкция;
 - максимальную морозную нагрузку на бетон в сооружении;
 - уровень структурной зрелости бетона, необходимый для максимальной морозной нагрузки.
6. Технологические прием, позволяющий обеспечить достаточное содержание в цементном камне резервных пор при одновременной минимизации объема капиллярных пор и длительное сохранение в жидкой фазе веществ, понижающих температуру льдообразования, может существенно повысить долговечность и обеспеченность стойкости бетона в зоне переменного уровня воды. Малая изученность «достаточности», т.е. оптимальности, существующих технологических приемов, свидетельствует о необходимости дальнейшего исследования в этом направлении, поскольку это является перспективными для практического применения. В частности, отсутствие практических расчетных методов, основанных на зависимости морозостойкости бетона от воздухоувлечения, не позволяет принимать оптимальные экономические решения по составам и технологии бетона.
7. Классический подход к обеспечению долговечности бетона за счет повышения морозостойкости путем применения воздуховлекающих добавок не решает одной из важных проблем для практики – обеспечение стойкости бетона в первый зимний период при недостаточной зрелости структуры бетона к началу морозного воздействия. Наиболее высокая чувствительность к зрелости структуры бетона проявляются в условиях длительного замораживания. В связи с этим совершенствование технологии бетона для повышения долговечности бетона и ее обеспеченности должно проводиться в направлении создания условий для снижения температуры льдообразования в первый зимний период, т. е. на первом этапе периода инициации. Исходя из положений структурной теории бетона и влияния добавок разных классов на формирование структуры цементного камня в бетоне, когда преобладающим факторами морозного воздействия является температура и длительность замораживания бетона, имеет смысл для совершенствования технологии бетона исследовать влияние комплексных добавок электролитов и ПАВ на долговечность бетона в зоне переменного уровня.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении разработки модели прогноза долговечности в соответствии с предложенной концепцией о двухстадийности процесса коррозии бетона в условиях морозного воздействия. Для получения исходных данных для разработки модели прогноза долговечности необходимо установить:

- значимость факторов, влияющих на стойкость бетона в начальный период твердения бетона при различных видах морозной нагрузки;
- количественно оценить показатель структурной зрелости бетона и определить его влияние на морозостойкость в ранние периоды твердения в зависимости от вида морозной нагрузки.

Список цитированных источников

1. Леонович, С. Н. Долговечность центрифугированных железобетонных конструкций при циклическом замораживании и оттаивании / С. Н. Леонович // Бетон и железобетон. – № 10. – 1988.
2. Леонович, С. Н. Структура и морозостойкость центрифугированного бетона с добавками / С. Н. Леонович, Ф. М. Иванов, Л. Н. Зикеев // Исследование и применение химических добавок. – М., НИИЖБ, 1988.
3. Леонович, С. Н. Неразрушающие методы контроля морозостойкости центрифугированного бетона / С. Н. Леонович, Л. Н. Зикеев // Коррозия бетона и арматуры в агрессивных средах. – М.: НИИЖБ, 1990.
4. Leonovich, S. N. The aggressive influence on the concrete and the modes to provide its corrosion resistance / S. N. Leonovich. Materials Science and Restoration : Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen. – 1992. – Vol. 3. – P. 1443–1449.
5. Leonovich, S. N. The structure of the concrete and its durability / S. N. Leonovich, V. I. Shevchenko. Materials Science and Restoration: Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen. – 1992. – Vol. 3. – P. 1652–1658.
6. Бетоны. Методы определения характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : ГОСТ 29167-91. – Введ. 01.07.1992.
7. Leonovich, S. N. The influence of cyclic freezing and thawing on cracking of concrete / S. N. Leonovich // Durability and service life of bridge structures : Proc. of 2-nd Intern. Scien. Conf. – Poznan, 1994. – P. 163–166.
8. Leonovich, S. N. Fracture Mechanics Parameters of Concrete: Test Methods Development and Harmonization of Standards / S. N. Leonovich // Concrete in The Service of Mankind : Intern. Congress. – Dundee, Scotland, UK, 1996.
9. Разрушение бетона и его долговечность : монография / Е. А. Гузеев. – Минск : Тыздзень, 1997.
10. Leonovich, S. N. The Non-Destructive Diagnostic Methods of Concrete-Lined Tunnels / S. N. Leonovich // Proc. of World Tunnel Congress. – Vienna, 1997.
11. Leonovich, S. N. The Influence of Structure of Concrete on Frost-Salt Resistance / S. N. Leonovich // Proc. of 13-th International Conference of Building Materials (13 IBAUSIL). – Weimar, 1997. – Vol. 2. – P. 263–268.
12. Leonovich, S. N. Calculation of Durability of Concrete Monuments using Fracture Mechanics / S. N. Leonovich // Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege, Aedificatio Publishers, 1999.
13. Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения (монография) / С. Н. Леонович. – Минск : Тыздзень, 2000. – 266 с.
14. Леонович, С. Н. Коррозия арматуры: общие подходы к расчету долговечности железобетонных конструкций / С. Н. Леонович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2002. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 38.
15. Leonovich, S. N. Fracture Mechanism for Estimation of Freeze – Thaw Resistance of Concrete / S. N. Leonovich // 15. Internationale Baustofftagung. – Weimar, 2003. – 24–27 September.
16. Leonovich, S. N. Frost Resistance of High-Performance Selfstressed Concrete under Pure Frost Attack / S. N. Leonovich, B. M. Khroustaliyev, W. F. Zverew, N. M. Golubev // В сборнике: Keep Concrete Attractive – Proceedings of the fib Symposium, 2005. – С. 275–279.
17. Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения : монография // Под ред. С. Н. Леоновича. – Брест, БГТУ. – 2006. – 379 с.
18. Leonovich, S. N. Durability of self-stressed (expansive) concrete / S. N. Leonovich, O. Al-Fakih // fib Congress. – Naples. – 2006.
19. Leonovich, S. N. Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures / S. N. Leonovich, D. Yu. Snezkov // Concrete Structures - Stimulators of Development, Proceedings of the fib Symposium Dubrovnik, 2007. – С. 947–954.
20. Schneider, U. Recommendation of RILEM TC 200 –HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures – Modeling and Applications / U. Schneider, S. Leonovich // Materials and Structures. 2007. – Т. 40, № 9. – Part. 1: Introduction – General Presentation and Oth. – С. 841.

21. Eberhardsteiner, J. Characterization of the Influence of Carbon Nanomaterials on the Mechanical Behavior of Cement Stone / J. Eberhardsteiner [et etc.] // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2011. – Т. 84, № 4. – С. 753–760.
22. Зайцев, Ю. В. Структура, прочность и механика разрушения бетонов при двухосном и трехосном сжатии (монография) / Ю. В. Зайцев, С. Н. Леонович, У. Шнайдер. – Минск : БНТУ, 2011. – 382 с.
23. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях : монография в 2 ч. / С. Н. Леонович [и др.] ; под ред. С. Н. Леоновича. – Минск : БНТУ, 2016. – Ч. 1. – 390 с.
24. Гузеев, Е. А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики : монография / Е. А. Гузеев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест : БПИ, 1999. – С. 71–85.
16. Leonovich, S. N. Frost Resistance of High-Performance Self-stressed Concrete under Pure Frost Attack / S. N. Leonovich, B. M. Khroustaliyev, W. F. Zverew, N. M. Golubev // *V sbornike: Keep Concrete Attractive – Proceedings of the fib Symposium, 2005*. – S. 275–279.
17. Prochnost' konstrukcionnyh betonov pri ciklicheskom zamora-zhivaniio-ttaivani s pozicii mekhaniki razrusheniya : monografiya // *Pod red. S. N. Leonovicha*. – Brest, BGTU. – 2006. – 379 s.
18. Leonovich, S. N. Durability of self-stressed (expansive) concrete / S. N. Leonovich, O. Al-Fakih // *fib Congress*. – Napples. – 2006.
19. Leonovich, S. N. Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures / S. N. Leonovich, D. Yu. Snezkov // *Concrete Structures - Stimulators of Development, Proceedings of the fib Symposium Dubrovnik, 2007*. – S. 947–954.
20. Schneider, U. Recommendation of RILEM TC 200 -HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures – Modeling and Applications / U. Schneider, S. Leonovich // *Materials and Structures*. 2007. – Т. 40, № 9. – Part. 1: Introduction – General Presentation and Oth. – S. 841.

References

1. Leonovich, S. N. Dolgovechnost' centrifugirovannyh zhelezobetonnyh konstrukcij pri ciklicheskom zamorazhivani i ottaviani / S. N. Leonovich // *Beton i zhelezobeton*. – № 10. – 1988.
2. Leonovich, S. N. Struktura i morozostojkost' centrifugirovannogo betona s dobavkami / S. N. Leonovich, F. M. Ivanov, L. N. Zikeev // *Issledovanie i primenenie himicheskikh dobavok*. – M., NIIZHB, 1988.
3. Leonovich, S. N. Nerazrushayushchie metody kontrolya morozostojkosti centrifugirovannogo betona / S. N. Leonovich, L. N. Zikeev // *Korroziya betona i armatury v agressivnyh sredah*. – M. : NIIZHB, 1990.
4. Leonovich, S. N. The aggressive influence on the concrete and the modes to provide it's corrosion resistance / S. N. Leonovich. *Materials Science and Restoration : Proc. 3-rd Intern. Colloq.* – Esslingen. – 1992. – Vol. 3. – P. 1443–1449.
5. Leonovich, S. N. The structure of the concrete and it's durability / S. N. Leonovich, V. I. Shevchenko. *Materials Science and Restoration: Proc. 3-rd Intern. Colloq.* – Esslingen. – 1992. – Vol. 3. – P. 1652–1658.
6. *Betony. Metody opredeleniya karakteristiki treshchino-stojkosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzenii : GOST 29167-91*. – Vved. 01.07.1992.
7. Leonovich, S. N. The influence of cyclic freezing and thawing on cracking of concrete / S. N. Leonovich // *Durability and service life of bridge structures : Proc. of 2-nd Intern. Scien. Conf.* – Poznan, 1994. – P. 163–166.
8. Leonovich, S. N. Fracture Mechanics Parameters of Concrete: Test Methods Development and Harmonization of Standards / S. N. Leonovich // *Concrete in The Service of Mankind : Intern. Congress*. – Dundee, Scotland, UK, 1996.
9. *Razrushenie betona i ego dolgovechnost' : monografiya* / E. A. Guzeev. – Minsk : Tydzen', 1997.
10. Leonovich, S. N. The Non-Destructive Diagnostic Methods of Concrete-Lined Tunnels / S. N. Leonovich // *Proc. of World Tunnel Congress*. – Vienna, 1997.
11. Leonovich, S. N. The Influence of Structure of Concrete on Frost-Salt Resistance / S. N. Leonovich // *Proc. of 13-th International Conference of Building Materials (13 IBAUSIL)*. – Weimar, 1997. – Vol. 2. – P. 263–268.
12. Leonovich, S. N. Calculation of Durability of Concrete Monuments using Fracture Mechanics / S. N. Leonovich // *Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege, Aedificatio Publishers*, 1999.
13. Leonovich, S. N. Treshchinostojkost' i dolgovechnost' betonnyh i zhelezobetonnyh elementov v terminah silovyh i energeticheskikh kriteriev mekhaniki razrusheniya (monografiya) / S. N. Leonovich. – Minsk : Tydzen', 2000. – 266 s.
14. Leonovich, S. N. Korroziya armatury: obshchie podhody k raschetu dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij / S. N. Leonovich // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – 2002. – № 1 : Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 38.
15. Leonovich, S. N. Fracture Mechanism for Estimation of Freeze – Thaw Resistance of Concrete / S. N. Leonovich // *15. Internationale Baustofftagung*. – Weimar, 2003. – 24–27 September.

Материал поступил 03.11.2022, одобрен 05.01.2023, принят к публикации 06.01.2023

КЭ-МОДЕЛЬ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВЫПОЛНЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ОСЕВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

Е. В. Маркечко¹, А. Я. Найчук²

¹ М. т. н., старший преподаватель кафедры строительных конструкций
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: bk-2112@mail.ru

² Д. т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: atnya@yandex.ru

Реферат

В статье приведено обоснование КЭ-модели соединения элементов деревянных конструкций с использованием винтов, воспринимающих осевые усилия растяжения, базирующееся на результатах сопоставления данных численных и экспериментальных исследований напряженного состояния древесины. Выполнен анализ изменения напряжений в древесине в зависимости от длины анкеровки и расстояния от оси винта.

Ключевые слова: древесина, винт, прочность, напряжение, конечный элемент.

FE-MODEL OF TIMBER CONNECTION WITH SCREWS SUBJECTED TO AXIAL TENSION

E. V. Markechko, A. Ya. Naichuk

Abstract

FE-Model of timber joints with screw subjected to axial tension is described in this paper. FE-Model Evaluation and Validation is based on comparison between the results of experimental and FE-analysis of timber stressed state in joint. The relationship between the wood stress values and the anchorage length and the distance from the screw axis is presented and analyzed.

Keywords: timber, screw, strength, stress, final element.

Введение

Использование винтов в соединениях элементов деревянных конструкций позволяет уменьшить влияние пороков древесины (сучков, свилеватости и косослоя) на их несущую способность, а по сравнению с клееными стержнями сократить сроки их изготовления и монтажа. Вместе с тем накопленный опыт строительства зданий из деревянных конструкций с соединениями такого типа показывает, что в процессе эксплуатации они не всегда удовлетворяют требованиям надежности и долговечности из-за образования продольных трещин в древесине соединяемых элементов в зонах обрыва растянутых стержней. Это свидетельствует о несовершенстве существующих методик расчета таких соединений.

Известно, что несущая способность конструкции зависит от прочности используемого материала, напряженного состояния как ее элементов, так и элементов соединений. Следовательно, для соединений элементов деревянных конструкций с использованием винтов определение напряженного состояния древесины, расположенной в зоне установки винта, является актуальной задачей. Сложность решения данной задачи состоит в том, что все компоненты напряжений должны быть определены не только на поверхности элемента, но и по ширине и длине соединяемых элементов [1, 2]. Решение данной задачи экспериментальным путем довольно проблематично из-за ограниченных возможностей измерения деформаций в массиве древесины соединяемых элементов посредством винтов. Поэтому решение этой задачи возможно с использованием численных методов (например, метода конечных элементов) с соответствующим обоснованием экспериментальным путем принятых расчетных моделей.

Целью данных исследований являлось обоснование КЭ-модели узлового соединения элементов деревянных конструкций с использованием винтов, воспринимающих осевые усилия растяжения.

Методика экспериментальных и численных исследований напряженного состояния соединения

Исследуемый образец соединения представлял собой деревянный элемент Д1 составного поперечного сечения с установленным

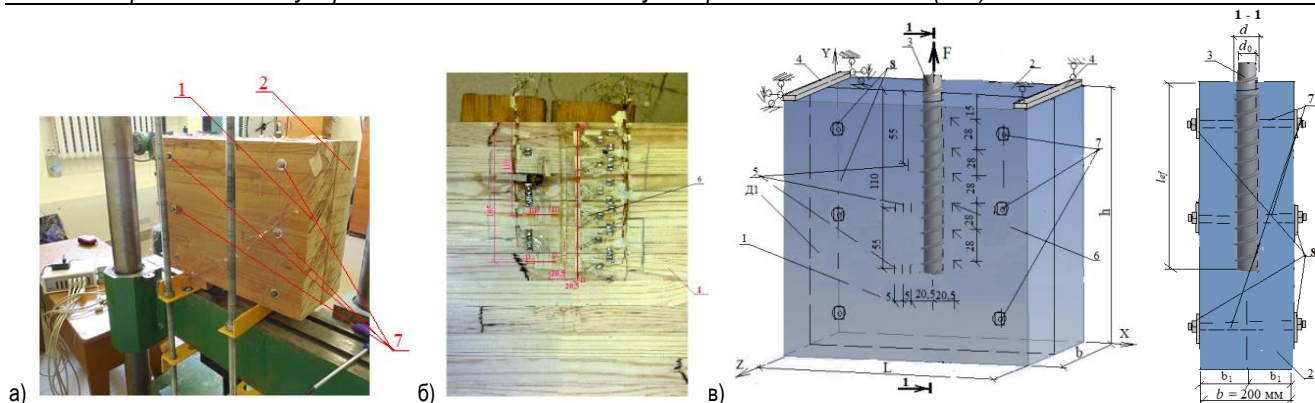
перпендикулярно волокнам винтом 3 (рисунок 1). Винт 3 располагался посередине длины L и ширины b поперечного сечения деревянного элемента Д1, состоящего из двух элементов 1 и 2 клееной древесины. Наружный диаметр винта $d = 11$ мм (рисунок 1). Варьируемым параметром как в КЭ-моделях, так и в испытываемом образце являлась длина анкеровки l_{ef} винта 3 в деревянном элементе Д1, значение которой принималось равным $l_{ef1} = 110$ мм и $l_{ef2} = 165$ мм (рисунок 1). Размеры поперечного сечения элементов 1 и 2 $L \times h \times b_1 = 400 \times 500 \times 100$ мм. В экспериментальном образце элементы 1 и 2 соединялись между собой с помощью 6 стяжных стальных шпилек 7 диаметром $d_b = 10$ мм (рисунок 1). Между гайками стальных шпилек и наружными плоскостями деревянного элемента Д1 располагались шайбы наружным диаметром 16 мм. Значение усилия натяжения стяжных шпилек 7 принималось, исходя из условия прочности древесины под шайбами при ее сжатии поперек волокон. Винт 3 в элементе Д1 устанавливался в предварительно просверленное отверстие диаметром $d_0 = 6,5$ мм. Продольная ось просверленного отверстия была перпендикулярна горизонтальной линии сплачивания элементов 1 и 2.

После высверливания в элементе Д1 предварительного отверстия глубину (длину) анкеровки $l_{ef2} = 165$ мм элементы 1 и 2 разъединялись и на внутреннюю поверхность элемента 1 наклеивались тензодатчики в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1в. База тензодатчиков составляла 10 мм. Для исключения повреждения тензодатчиков при сплачивании элементов 1 и 2 в элементе 2 были выфрезерованы вертикальные пазы глубиной 3 мм и шириной 14 мм.

Для измерения относительных деформаций все тензодатчики подключались к компьютерному измерительному комплексу «ТИССА-В-485/65».

После сплачивания элементов 1 и 2 выполнялось завинчивание винта на заданную длину анкеровки l_{ef} и фиксация показаний по тензодатчикам.

Испытание образца выполнялось в испытательной машине УМЭ-10ТМ в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1в. Для испытаний был изготовлен 1 опытный образец.



Д1 – деревянный элемент; 1, 2 – элементы из клееной древесины $L \times b \times h = 500 \times 100 \times 200$ мм; 3 – винт диаметром $d = 11$ мм; 4 – упорные стальные пластины $h_1 \times b_1 \times l_0 = 20 \times 70 \times 200$ мм; 5 – тензодатчики базой 10 мм; 6 – тензорозетки базой 10 мм; 7 – стяжные стальные шпильки диаметром $d_b = 10$ мм; 8 – стальные шайбы диаметром 16 мм

а) – общий вид испытываемого образца; б) – общий вид расположения тензодатчиков по линиям «п-п», «т-т» и «р-р» элемента 1; в) – схема испытаний

Рисунок 1 – Общий вид и схема испытываемого образца соединения

На основании измеренных в сечениях досок клееного элемента значений относительных деформаций $\varepsilon_{xy,i}$, $\varepsilon_{yx,i}$ и $\varepsilon_{45,i}$ напряжения $\sigma_{x,i}$, $\sigma_{y,i}$ и $\tau_{xy,i}$ определялись по формулам (1–3) [3].

$$\sigma_{x,i} = E_{x,i} \left(\frac{\varepsilon_{x,i} + \nu_{yx,i} \cdot \varepsilon_{y,i}}{1 - \nu_{xy,i} \cdot \nu_{yx,i}} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_{y,i} = E_{y,i} \left(\frac{\varepsilon_{y,i} + \nu_{xy,i} \cdot \varepsilon_{x,i}}{1 - \nu_{xy,i} \cdot \nu_{yx,i}} \right), \quad (2)$$

$$\tau_{xy,i} = G_{xy,i} \left[2 \cdot \varepsilon_{45,i} - (\varepsilon_{x,i} + \varepsilon_{y,i}) \right], \quad (3)$$

где $E_{x,i}$ и $E_{y,i}$ – модуль упругости древесины вдоль и поперек волокон i -той доски клееного элемента соответственно;

$\nu_{xy,i}$ и $\nu_{yx,i}$ – коэффициенты поперечной деформации древесины i -й доски клееного элемента;

$G_{xy,i}$ – модуль сдвига древесины i -й доски клееного элемента;

$\varepsilon_{x,i}$, $\varepsilon_{y,i}$ и $\varepsilon_{45,i}$ – относительные деформации вдоль, поперек и под углом 45° к волокнам древесины i -й доски клееного элемента соответственно.

Значения упругих характеристик древесины i -й доски клееного элемента определялись на основе результатов испытаний маломасштабных образцов [4–7], вырезанных из досок клееного пакета элемента 1. На основании результатов испытаний маломасштабных образцов средние значения упругих характеристик древесины досок клееного элемента 1 оказались равны: $E_{x,mean} = 11440$ МПа; $E_{y,mean} = 733$ МПа; $G_{xy,mean} = 632$ МПа; $\nu_{xy} = 0,44$; $\nu_{yx} = 0,028$.

Испытания опытного образца соединения винта с элементом Д1 по определению напряженного состояния проводились в четыре этапа. На каждом этапе испытаний по показаниям тензодатчиков, расположенных вдоль вертикальной «п-п» и горизонтальных «т-т» и «р-р» линий на внутренней поверхности элемента 1 (рисунок 1б), фиксировались относительные деформации в древесине. Вертикальная линия «п-п» находилась на расстоянии 20,5 мм от продольной оси винта, а горизонтальные линии «т-т» и «р-р» с началом в горизонтальном направлении 20,5 мм от продольной оси винта и в вертикальном направлении на расстоянии 110 мм и 165 мм от верхней грани элемента Д1, что соответствовало длине анкеровки l_{ef1} и l_{ef2} винта.

На первом этапе испытаний определялось распределение напряжений в древесине элемента 1 по длине вертикальной линии «п-п» и горизонтальной «т-т» при $l_{ef1} = 110$ мм (рисунок 1в) сразу после ввинчивания винта, а также спустя 12 и 48 часов.

На втором этапе испытаний после истечения 48 часов от момента ввинчивания винта при $l_{ef1} = 110$ мм к нему прикладывалось растягивающее усилие $F = 10,1$ кН с фиксацией показаний по всем тензодатчикам и последующей разгрузкой.

На третьем этапе испытаний после разгрузки и выдержки его в течении 24 часов выполнялось дальнейшее ввинчивание винта на глубину $l_{ef2} = 165$ мм и фиксация показаний по всем тензодатчикам.

На четвертом этапе испытаний к ввинченному винту при $l_{ef2} = 165$ мм прикладывалось растягивающее усилие $F = 10,1$ кН с фиксацией показаний по всем тензодатчикам.

При определении напряженно-состояния узловых соединений с винтами, воспринимающими действие осевых усилий, использовался метод конечных элементов в среде «ANSYS Workbench».

Для построения КЭ-модели соединения использовались следующие КЭ:

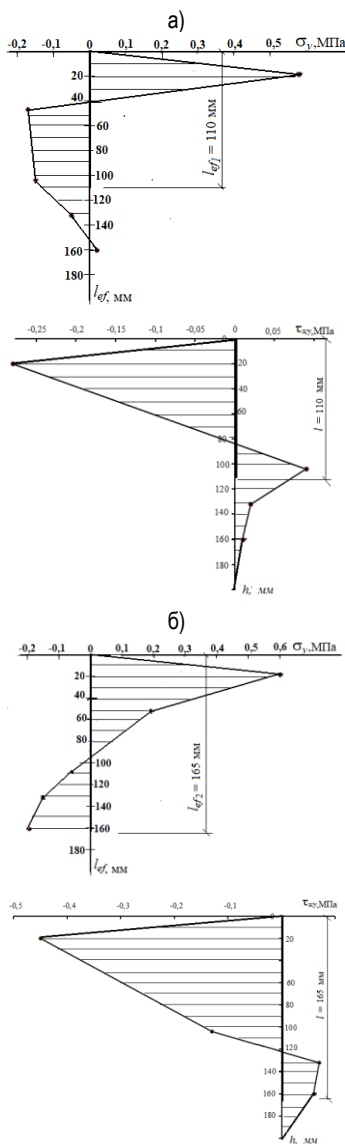
- для моделирования винта принимались КЭ типа SOLID186, которые определяются двадцатью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлениях осей x , y и z . Данный КЭ позволял учитывать такие свойства моделируемого материала, как пластичность, гиперэластичность, которые учитываются в функциях аппроксимации поля перемещений;
 - при моделировании деревянного элемента соединения применялись КЭ типа SOLID187, которые определяются десятью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X , Y , Z системы координат;
 - для моделирования контактного взаимодействия между винтом и древесиной применялась пара КЭ типа CONTA174/TARGE170. Контакт происходит при внедрении контактного узла CONTA174 в элемент ответной поверхности TARGE170. Размеры контактных элементов определяются связанными с ними конечными элементами соответствующего поверхностного слоя модели. Модель взаимодействия «поверхность-поверхность». КЭ типа CONTA174 использовалась для моделирования контакта и скольжения между трехмерными целевыми поверхностями и деформируемой поверхностью, определяемой этим элементом.
- В данной КЭ-модели древесина рассматривалась как трансверсально изотропный материал с упругими характеристиками равными средним значениям, определенным при испытании досок клееного элемента 1. Значения коэффициентов трения между контактирующими поверхностями элементов 1 и 2 принималось равным 0,6 [8]. Что же касается значения коэффициента трения между поверхностями винта и древесины, то оно принималось равным нулю. Усилие обжатия элементов 1 и 2, создаваемое от натяжения шпилек, в численной модели моделировалось сосредоточенными силами, приложенными перпендикулярно боковым плоскостям элемента Д1 в точках расположения шпилек.

Анализ напряженного состояния узлового соединения

В результате испытаний образца на первом и третьем этапах было установлено, что после ввинчивания винта древесина, расположенная вблизи него, находится в сложном напряженном состоянии (рисунок 2). Возникновение внутренних напряжений σ_y и τ_{xy} в древесине обусловлено ее расклиниванием при проникновении резьбы в ее массив. Вследствие расклинивания древесины резьбой в ней возникает растяжение поперек и скалывание вдоль волокон. Следует отметить, что характер распределения напряжений зависит от длины анкеровки винта.

Максимальных значений нормальные σ_y и касательные τ_{xy} напряжения достигают у верхней грани образца (рисунок 2). С увеличением длины анкерки l_{ef} максимальные значения напряжений σ_y и τ_{xy} возрастают, что обусловлено изменением жесткости деформируемого массива древесины по направлению продольной оси винта при его ввинчивании.

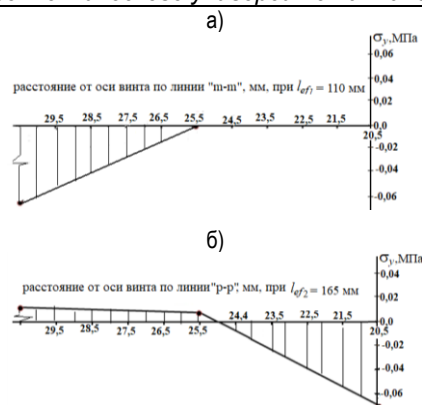
В результате измерений относительных деформаций спустя 12 часов после ввинчивания винта (первый этап испытаний) было установлено, что значения относительных деформаций ε_y поперек волокон уменьшились в среднем на 8 % по сравнению с их первоначальным значением. Что же касается изменения значений деформаций ε_y в последующие 48 часов, то они практически не изменялись.



а) – при длине анкерки $l_{ef1} = 110$ мм;
б) – при длине анкерки $l_{ef2} = 165$ мм

Рисунок 2 – Распределение напряжений σ_y и τ_{xy} в древесине по длине линии «п-п» после ввинчивания винта

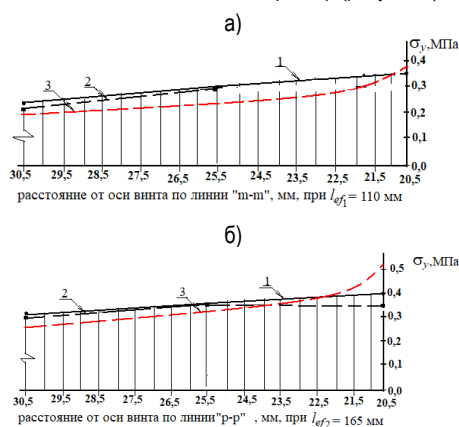
Что же касается напряжений σ_y , возникающих в древесине по длине горизонтальных линий «т-т» и «р-р», расположенных на уровне обрыва анкерки винта, то их значения незначительны (рисунок 3). Вместе с тем при длине анкерки $l_{ef1} = 110$ мм на расстоянии $2,5 d$ от продольной оси винта древесина испытывает сжатие поперек волокон, а при $l_{ef2} = 165$ мм – незначительное растяжение, которое по своему значению в 20 раз меньше прочности $f_{t,90}$ древесины при растяжении поперек волокон [9]. Отсутствие напряжений σ_y по длине линии «т-т» на участке от 20,5 мм до 25,5 мм (рисунок 3) объясняется тем, что предварительное отверстие для установки винта было просверлено на глубину $l_{ef2} = 165$ мм.



а) – при длине анкерки $l_{ef1} = 110$ мм;
б) – при длине анкерки $l_{ef2} = 165$ мм;

Рисунок 3 – Распределение напряжений σ_y в древесине в зоне обрыва винта по длине линий «т-т» и «р-р» после его ввинчивания

При приложении к винту растягивающего усилия F , значения напряжений σ_y в древесине, расположенной в зоне обрыва анкерки (линии «т-т» и «р-р»), увеличиваются (рисунок 4), вызывая ее растяжение поперек волокон, что существенно может сказаться на несущей способности соединения (рисунок 2). Сопоставляя экспериментальные и численные значения напряжений σ_y , можно отметить, что первые больше вторых в среднем на 20–25 %. Это можно объяснить тем, что в численной модели принимались средние значения упругих характеристик древесины, а в эксперименте – значения упругих характеристик, определенных для каждой доски клееного пакета. Что же касается распределения напряжений σ_y по длине линий «т-т» и «р-р», полученных экспериментальным путем и в результате численных расчетов, то они имеют один и тот же характер (рисунок 4).

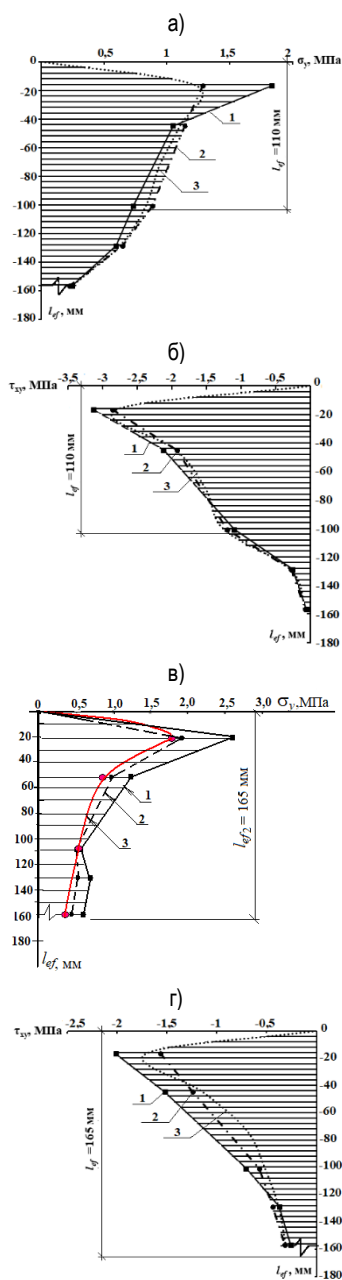


1 – экспериментальные значения напряжений после ввинчивания и действия усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; 2 – экспериментальные значения напряжений от усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; 3 – численные значения напряжений от усилия выдергивания $F = 10,1$ кН;
а) – при длине анкерки винта $l_{ef1} = 110$ мм;
б) – при длине анкерки винта $l_{ef2} = 165$ мм

Рисунок 4 – Распределение напряжений σ_y в древесине в зоне обрыва винта по длине горизонтальных линий «т-т» и «р-р»

При приложении к винту растягивающего усилия F , распределение напряжений σ_y и τ_{xy} в древесине образца по линии «п-п» (высоте образца), полученных экспериментальным путем, имеют один и тот же характер, что и по методу КЭ (рисунок 5). При этом в некоторых точках экспериментальное значение на 25 % больше их численных значений. Это объясняется тем, что в численной модели не учитывался эффект расклинивания древесины при проникновении резьбы в ее массив, наличием вертикального паза (выборки) по линии «п-п» в элементе 2 составного элемента Д1, а также отличием в значениях упругих характеристик досок клееного пакета. Следует отметить, что

для случая действия на винт растягивающего усилия F (без учета напряжений от ввинчивания), расхождение между экспериментальными и численными значениями напряжений уменьшается и находится в пределах от 5 % до 15 % (рисунок 5).



1 – экспериментальные значения напряжений после ввинчивания и действия усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; 2 – экспериментальные значения напряжений от усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; 3 – численные значения напряжений от усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; а) – при длине анкеровки винта $l_{ef1} = 110$ мм; б) – при длине анкеровки винта $l_{ef2} = 165$ мм

Рисунок 5 – Распределение напряжений σ_y и τ_{xy} в древесине по длине вертикальной линии «n-n»

Заключение

В результате проведенных экспериментальных и численных исследований было установлено:

- принятая КЭ-модель соединения отражает действительную его работу и может быть использована при исследовании напряженного состояния соединений элементов деревянных конструкций с винтами, воспринимающими осевые усилия;
- определенные экспериментальным путем численные значения и распределение напряжений в древесине, расположенной

в зоне винта, имеют хорошую сходимость с результатами численных исследований;

- с увеличением длины анкеровки винта неравномерность распределения напряжений в древесине увеличивается;
- в зоне обрыва анкеровки винта в древесине возникает растяжение поперек волокон, которое должно учитываться при определении несущей способности соединения в качестве дополнительного условия.

Список цитированных источников

1. Найчук, А. Я. Численное исследование напряженного состояния древесины в зоне винтов, работающих на выдергивание поперек волокон / А. Я. Найчук, Е. В. Лещук // Строительная наука-2014: теория, образование, практика, инновации : сборник трудов международной научно-технической конференции посвящается 55-летию ИСиА САФУ, Архангельск, 22–23 мая 2014 г. / под ред. Б. В. Лабудина. – Архангельск, 2014. – С. 276–282.
2. Найчук, А. Я. Напряженно-деформированное состояние древесины при ввинчивании винта поперек волокон / А. Я. Найчук, Е. В. Маркечко // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. научных трудов. – Одесса, 2016. – С. 90–95.
3. Ашкенязи, Е. К. Анизотропия конструкционных материалов: справочник / Е. К. Ашкенязи, Э. В. Ганов. – Ленинград : Машиностроение, 1980. – 248 с.
4. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии вдоль волокон : ГОСТ 16483.24-73. – Введ. 01.01.1975. – М : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 4 с.
5. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии поперек волокон : ГОСТ 16483.25-73. – Введ. 01.01.1975. – М : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 6 с.
6. Древесина. Метод определения коэффициентов поперечной деформации : ГОСТ 16483.29-73. – Введ. 01.01.1975. – М : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 7 с.
7. Древесина. Метод определения модулей сдвига : ГОСТ 16483.30-73. – Введ. 01.01.1975. – М : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 7 с.
8. Карлсен, Г. Г. Конструкции из дерева и пластмасс: учебник для вузов / Г. Г. Карлсен, Ю. В. Слишкоухов. – М. : Стройиздат, 1986. – 543 с.
9. Деревянные конструкции : СП 5.05.01-2021. – Введ. 01.06.2021. – Минск : М-во архит. и строит. Республики Беларусь, 2021. – 115 с.

References

1. Najchuk, A. Ya. Chislennoe issledovanie napryazhennogo sostoyaniya drevesiny v zone vintov, rabotayushchih na vydergivanie poperek volokon / A. Ya. Najchuk, E. V. Leshchuk // Stroitel'naya nauka-2014: teoriya, obrazovanie, praktika, innovacii : sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii posvyashchaya 55-letiyu ISiA SAFU, Arhangel'sk, 22–23 maya 2014 g. / pod red. B. V. Labudina. – Arhangel'sk, 2014. – S. 276–282.
2. Najchuk, A. Ya. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie drevesiny pri vvinchivanii vinta poperek volokon / A. Ya. Najchuk, E. V. Markechko // Sovremennye stroitel'nye konstrukcii iz metalla i drevesiny : sb. nauchnyh trudov. – Odessa, 2016. – S. 90–95.
3. Ashkenazi, E. K. Anizotropiya konstrukcionnykh materialov: spravochnik / E. K. Ashkenazi, E. V. Ganov. – Leningrad : Mashinostroenie, 1980. – 248 s.
4. Drevesina. Metod opredeleniya modulya uprugosti pri szhatii vdol' volokon : GOST 16483.24-73. – Vved. 01.01.1975. – M : IPK lzdatel'stvo standartov, 1999. – 4 s.
5. Drevesina. Metod opredeleniya modulya uprugosti pri szhatii poperek volokon : GOST 16483.25-73. – Vved. 01.01.1975. – M : IPK lzdatel'stvo standartov, 1999. – 6 s.
6. Drevesina. Metod opredeleniya koeffitsientov poperechnoj deformacii : GOST 16483.29-73. – Vved. 01.01.1975. – M : IPK lzdatel'stvo standartov, 1999. – 7 s.
7. Drevesina. Metod opredeleniya modulej sdviga : GOST 16483.30-73. – Vved. 01.01.1975. – M : IPK lzdatel'stvo standartov, 1999. – 7 s.
8. Karl'sen, G. G. Konstrukcii iz dereva i plastmass: uchebnik dlya vuzov / G. G. Karl'sen, Yu. V. Slickouhov. – M. : Stroizdat, 1986. – 543 s.
9. Derevyannye konstrukcii : SP 5.05.01-2021. – Vved. 01.06.2021. – Minsk : M-vo arhit. i stroit. Respubliki Belarus', 2021. – 115 s.

Материал поступил 15.01.2023, одобрен 21.02.2023, принят к публикации 21.02.2023

УЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОМАНОВОГО ОЧЕРТАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ

Н. В. Матвеев¹, П. В. Кривицкий², В. Н. Малиновский³

¹ М. т. н., старший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nikifarych@yandex.ru

² К. т. н., доцент, заведующий отраслевой лабораторией «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: krivitskiyp@mail.ru

³ К. т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sk@bstu.by

Реферат

Конструктивное решение балок ломаного очертания имеет ряд преимуществ, связанных с особенностями статической работы подобных элементов. В наклонной части балок ломаного очертания возникает продольное сжимающее усилие, которое повышает трещиностойкость наклонных сечений и сопротивление срезу. Для оценки величины сжимающего усилия и степени его влияния на напряженно-деформированное состояние приопорной зоны балок выполнены экспериментальные исследования. Проведены испытания балок прямолинейного очертания, предварительно напряженных канатной арматурой, часть которой отгибалась вблизи опоры, и балок ломаного очертания с прямолинейно расположенной напрягаемой арматурой. Создание осевых сжимающих усилий в приопорной зоне благодаря изменению очертания продольной оси балки позволяет снизить величину предварительного обжатия, создаваемого напрягаемой арматурой, и избежать его деструктивного влияния на контактный слой между бетоном и арматурой при сохранении требуемых трещиностойкости и сопротивления срезу.

Ключевые слова: предварительно напряженные железобетонные балки, напряженно-деформированное состояние, сопротивление срезу, трещиностойкость, отгиб, ломаное очертание, сцепление, анкеровка.

CONSIDERATION OF DESIGN FEATURES OF CURVED ELEMENTS IN DETERMINING SHEAR RESISTANCE

N. V. Matweenko, P. V. Krivitskiy, V. N. Malinovskiy

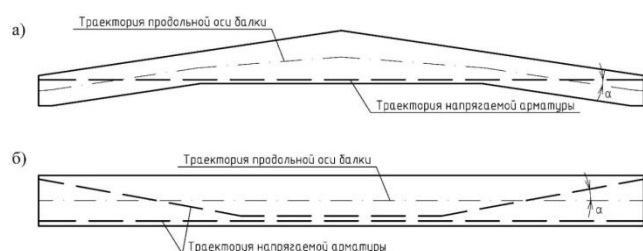
Abstract

The constructive solution of curved beams has some excellence associated with the features of the static scheme of such elements. In the inclined part of the beams of a curved elements, a longitudinal compressive action, which increases the crack resistance of the inclined sections and the shear resistance. To assess the magnitude of the compressive action and the degree of its influence on the stress-strain state of the support zone of the beams, experimental studies were carried out. Tests were carried out on beams of a rectilinear shape, prestressed with tendons, part of which was bent-up near the support, and curved beams with a rectilinearly located prestressing reinforcement. The creation of axial compressive action in the support zone due to a change in the shape of the longitudinal axis of the beam makes it possible to reduce the amount of precompression created by prestressing reinforcement and avoid its destructive effect on the contact layer between concrete and reinforce with conservation the required crack resistance and shear resistance.

Keywords: prestressed concrete beam, stress-strain state, shear resistance, fracture strength, bend, broken configuration, adhesion, anchoring.

Введение

Как известно, применение балок ломаного очертания (рисунок 1а) позволяет при прямолинейной напрягаемой арматуре сохранить положительные качества балок с отогнутой арматурой (рисунок 1б) [1].



- а) балка ломаного очертания с прямолинейной арматурой;
б) балка прямолинейного очертания с отогнутой арматурой

Рисунок 1 – Конструктивное решение предварительно напряженных балок

Результаты экспериментальных исследований [2] подтверждают, что напряженно-деформированное состояние балок ломаного очертания в зоне среза в полной мере соответствует особенностям работы прямолинейных балок с отгибом части продольной арматуры. Однако в балках с ломаной нижней гранью, в связи с особенностями конструктивного решения, у опоры вся предварительно

напряженная арматура переводится в верхнюю зону сечения, а сопротивление изгибу на данном участке обеспечивается ненапрягаемой арматурой. Таким образом, трещиностойкость нормальных сечений в приопорной зоне в подобных балках оказывается ниже по сравнению с балками прямолинейного очертания. В следствие этого может произойти формирование наклонных трещин первой группы, начинающихся с нижней растянутой зоны сечения, и, как следствие, разрушение по одной из них. Кроме этого, перевод всей напрягаемой арматуры в верхнюю зону сечения приводит к тому, что еще до приложения нагрузки возникают растягивающие усилия в зонах, подверженных растяжению на стадии эксплуатации. Это приводит к образованию нормальных трещин на более ранних этапах загрузки конструкции.

Данные негативные последствия могут быть компенсированы за счет продольного сжимающего усилия, возникающего в наклонной части балки от действия опорной реакции (рисунок 2). Благодаря принятому конструктивному решению балок опорная реакция делится на две составляющие: поперечную силу, которая оказывается меньше, чем в балках прямолинейного очертания, и продольную, которая наряду с напрягаемой арматурой создает обжатие бетона.

Величина эффекта зависит от конструктивных параметров балки: угла наклона верхней и нижней грани, высоты сечения на опоре и в пролете, схемы нагружения, а также меняется в зависимости от величины приложенной нагрузки.

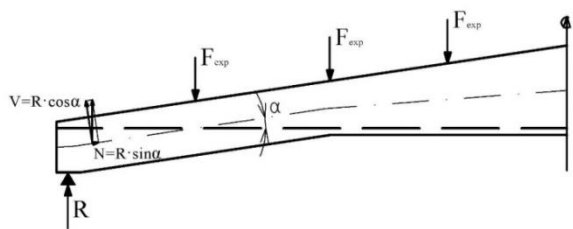


Рисунок 2 – Схема внутренних усилий, действующих в наклонной части балки ломаного очертания

Трещиностойкость наклонных сечений и сопротивление опытных образцов.

С целью оценки степени влияния продольного сжимающего усилия на напряженно-деформированное состояние приопорной зоны выполнен сравнительный анализ сопротивления образованию наклонных трещин и срезу предварительно напряженных балок двух типов: ломаного очертания и с параллельными поясами с отгибом у опоры части продольной напрягаемой арматуры [2].

По результатам экспериментальных исследований обоих типов балок отмечено, что сопротивление образованию наклонных трещин и срезу увеличивается с повышением степени обжатия бетона (рисунок 3). При этом изменение сопротивления в зависимости от величины продольного усилия имеет непропорциональную зависимость, что соответствует общим принципам работы изгибаемых конструкций, описанным А. С. Залесовым и Ю. А. Климовым [3]. Сопротивление срезу балок с параллельными поясами с достаточной точностью описывается кривой, полученной по результатам теоретических расчетов по известным зависимостям [4]. В случае, если при определении сопротивления срезу балок ломаного очертания учитывать только величину продольного сжимающего усилия, создаваемого напрягаемой арматурой, то прогнозируемое значение оказывается значительно ниже полученного экспериментально (на 40..45%). При учете продольной силы, возникающей от действия опорной реакции, разница в величинах теоретического и экспериментального сопротивления составляет не более 27 %.

На начальных этапах загрузки (в том числе в момент образования наклонных трещин) продольная сила составляла не более 10..15 % от усилия предварительного обжатия и не оказывала существенного влияния на трещиностойкость. С ростом нагрузки усилие сжатия возрастало и препятствовало раскрытию нормальных и наклонных трещин. В момент разрушения сжимающая сила в приопорной зоне достигала до 33 % от усилия предварительного обжатия, что приводит к значительному увеличению сопротивления срезу (рисунок 3). Особенно явно данный эффект выражен в балках, у которых уровень предварительного обжатия бетона был ниже.

Следует также отметить, что из 4-х испытанных балок ломаного очертания только две разрушились по наклонной трещине у опоры. Таким образом, фактическое сопротивление срезу балок выше указанного на рисунке 3б. Следует также отметить, что разрушение балок прямолинейного и ломаного очертания в ряде случаев сопровождалось втягиванием каната по торцам балки, что свидетельствует о разрушении зоны контакта арматуры с бетоном в зоне анкерки.

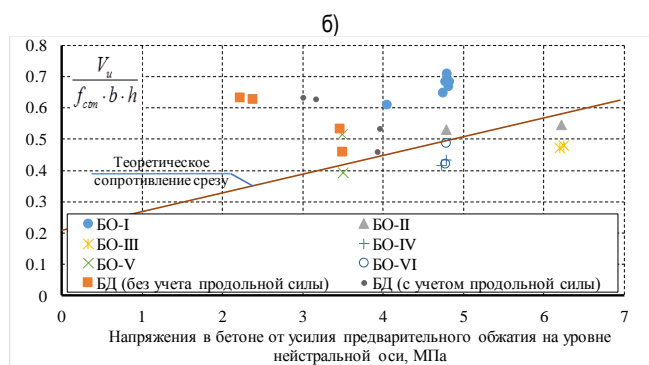
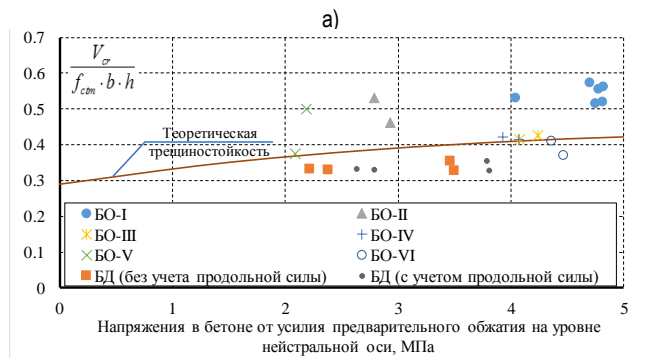
В предварительно напряженных конструкциях анкерка напрягаемой арматуры тесно связана с длиной зоны передачи усилия обжатия бетона и зависит от надежности сцепления арматуры с бетоном, это является основным условием работы железобетона как комплексного строительного материала. При этом величины и качество данных факторов оказывают определяющее влияние на морфологию трещин (нормальных и наклонных) и как следствие – на сопротивление срезу.

Не вызывает сомнения, что величина предельного напряжения сцепления арматуры с бетоном зависит от деструктивных процессов, происходящих в бетоне, в том числе и в бетоне контактного слоя. Изменение структуры бетона, предшествующее разрушению материала, характеризуется тремя этапами: уплотнение, по мере появления микроразрушений разуплотнение и собственно разрушение в результате объединения микротрещин в магистральные трещины. Результаты опытов, проведенных по установлению влияния степени кратковременного обжатия бетона на его сцепление с арматурой [5], показывают, что величина сил сцепления функционально зависит от деструктивных процессов, происходящих в бетоне при силовом воздействии. Относительно небольшой уровень обжатия бетона (до 0,2f_{cm}) способствует уплотнению структуры материала, а это приводит к увеличению сцепления. Повышение уровня предварительного обжатия (0,2÷0,7f_{cm}) вызывает снижение сцепления. Основной причиной отмеченного обстоятельства является нарастающее развитие деструктивных процессов в большей части объема бетона. Дальнейшее увеличение уровня предварительного обжатия (до 0,95f_{cm}) связано с резким падением величины сил сцепления. Это объясняется тем, что при указанных напряжениях микротрещины объединяются в магистральные трещины, и наиболее вероятное направление одной из них – по контакту арматуры с бетоном, что приводит к катастрофическому снижению сцепления и разрыву бетона от расклинивания [5].

Таким образом, конструктивное решение балок ломаного очертания позволяет уменьшить величину предварительного обжатия бетона, создаваемого напрягаемой арматурой, что благоприятно влияет на характеристики сцепления арматуры с бетоном. Дополнительное сжимающее усилие, возникающее в наклонной части балки от внешнего нагружения позволяет повысить трещиностойкость наклонных сечений и сопротивление срезу железобетонных элементов и при этом избежать деструктивного влияния на контактный слой вследствие предварительного напряжения арматуры.

Выводы

1. Благодаря особенностям конструктивного решения в наклонном участке балок ломаного очертания от действия опорной реакции возникает дополнительная продольная сжимающая сила, которая благоприятно сказывается на трещиностойкости и сопротивлении срезу элемента.
2. Величина продольной сжимающей силы зависит от конструктивных параметров балки (угла наклона верхней и нижней грани, высоты сечения на опоре и в пролете), а также возрастает пропорционально увеличению внешней нагрузки.



а) – сопротивление балок образованию наклонных трещин;
б) – сопротивление балок срезу

Рисунок 3 – Зависимость сопротивления образованию наклонных трещин (V_{cr}) и срезу (V_u) элементов с отогнутой напрягаемой арматурой и ломаного очертания

3. Наиболее выражено влияние дополнительного сжимающего усилия на напряженно-деформированное состояние приопорной зоны в балках с невысоким уровнем предварительного обжатия бетона ($0.1 \cdot f_{cm}$) и при нагрузках близких к разрушающим. Увеличение степени обжатия бетона благодаря конструктивному решению балок ломаного очертания в момент разрушения составляет до 33 %.
4. Создание преднапряжения в арматуре оказывает влияние на характеристиках контактного слоя бетона и арматуры: при величине предварительного обжатия бетона до $0.2f_{cm}$ сцепление увеличивается, при величине от $0.2f_{cm}$ до $0.7f_{cm}$ предельные напряжения сцепления снижаются, а увеличение до $0.95f_{cm}$ приводит к резкому падению сил сцепления.
5. Создание осевых сжимающих усилий в приопорной зоне благодаря изменению очертания продольной оси балки позволяет снизить величину предварительного обжатия, создаваемого напрягаемой арматурой, и избежать его деструктивного влияния на контактный слой при сохранении требуемых трещиностойкости и сопротивления срезу.

Список цитированных источников

1. Малиновский, В. Н. Усовершенствованный вариант конструктивного решения железобетонных стропильных балок / В. Н. Малиновский, П. В. Кривицкий, Н. В. Матвеевко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2013. – № 1 (79) : Строительство и архитектура. – С. 128–131.
2. Матвеевко, Н. В. Экспериментальные исследования сопротивления изгибу с поперечной силой преднапряженных железобетонных балок прямолинейного и ломаного очертаний / Н. В. Матвеевко, П. В. Кривицкий // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2021. – № 8 : Серия F. – С. 87–93.
3. Залесов, А.С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А. С. Залесов, Ю. А. Климов. – К. : Будивэльник, 1989. – 104 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.11.2020. – Минск : М-во archit. i stroit. Respubliki Belarus', 2020. – 244 с.
5. Рочняк, О. А. Влияние степени кратковременного обжатия бетона на его сцепления с арматурой / О. А. Рочняк, В. Н. Малиновский // IX конференция молодых ученых и специалистов Прибалтики и Белоруссии по проблемам строительных материалов и конструкций : тез. докл., г. Брест, 21–25 ноября 1977 г. / Брестский политехн. ин-т ; редкол. : Н. П. Блещик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 1977. – С. 36–38.

References

1. Malinovskij, V. N. Usovershenstvovannyj variant konstruktivnogo resheniya zhelezobetonnyh stropil'nyh balok / V. N. Malinovskij, P. V. Krivickij, N. V. Matveenko // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2013. – № 1 (79) : Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 128–131.
2. Matveenko, N. V. Eksperimental'nye issledovaniya soprotivleniya izgibu s poperečnoj siloj prednapryazhennyh zhelezobetonnyh balok pryamolinejnogo i lomanogo ochertanij / N. V. Matveenko, P. V. Krivickij // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. – 2021. – № 8 : Seriya F. – S. 87–93.
3. Zalesov, A. S. Prochnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri dejstvii poperechnykh sil / A. S. Zalesov, YU. A. Klimov. – K. : Budiv'el'nik, 1989. – 104 s.
4. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vved. 16.11.2020. – Minsk : M-vo arhit. i stroit. Respubliki Belarus', 2020. – 244 s.
5. Rochnyak, O. A. Vliyanie stepeni kratkovremennogo obzhatiya betona na ego scepłeniya s armaturoj / O. A. Rochnyak, V. N. Malinovskij // IX konferenciya molodyh uchenykh i specialistov Pribaltiki i Belorussii po problemam stroitel'nykh materialov i konstrukcij : tez. dokl., g. Brest, 21-25 noyabrya 1977 g. / Brestskij politekhn. in-t ; redkol. : N. P. Bleshchik (otv. red.) [i dr.]. – Minsk, 1977. – S. 36–38.

Материал поступил 22.01.2023, одобрен 27.02.2023, принят к публикации 27.02.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МАЛОЗАТРАТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, ЗАГРЯЗНЕННЫХ СОЕДИНЕНИЯМИ СВИНЦА

В. В. Мороз¹, Е. А. Урецкий², Э. И. Михневич³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru

² Инженер-эколог РУП «Белорусский государственный проектный институт», Витебск, Беларусь, e-mail: euretsky@yandex.by

³ Д. т. н., профессор кафедры водоснабжения и водоотведения УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: ed_mik_bia@tut.by

Реферат

Проведены исследования и выполнена разработка ресурсосберегающей технология очистки сточных вод, загрязнённых соединениями свинца. Предлагаемая технология «попутная», т. е. она реализуется в рамках традиционной реагентной технологии очистки сточных вод производств защитных покрытий и печатных плат без дополнительных технологических линий, при тех же параметрах проведения процесса и теми же реагентами. Внедренная технология на Гомельском заводе ОАО «Коралл» позволяет при минимальных затратах достичь предельно допустимую концентрацию свинца на выпусках предприятия в городскую хозяйственно-бытовую канализацию, установленную контролирующими организациями.

Ключевые слова: свинец, сточная жидкость, pH, усреднитель, реактор, осветлитель, осадок.

RESEARCH, DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF LOW-COST TECHNOLOGY FOR POLLUTED WASTEWATER TREATMENT LEAD COMPOUNDS

V. V. Moroz, E. A. Uretsky, E. I. Mikhnevich

Abstract

Research has been carried out and the development of a resource-saving technology for the treatment of wastewater contaminated with lead compounds has been carried out. The proposed technology is "associated", i.e. it is implemented within the framework of the traditional chemical wastewater treatment technology for the production of protective coatings and printed circuit boards without additional technological lines, with the same process parameters and the same reagents. The implemented technology at the Gomel plant of JSC «Korall» allows, at minimal cost, to achieve the maximum allowable concentration of lead on the outlets of the enterprise into the municipal sewerage system, established by controlling organizations.

Keywords: lead, waste liquid, pH, averager, reactor, clarifier, sediment.

Введение

Свинец и его соединения очень токсичны, поэтому необходимо удалять из сточных вод даже их следы. Как известно, ионы свинца (II) нарушают обмен веществ и являются ингибиторами ферментов. Особенно опасно их воздействие на маленьких детей, вызывающее умственную отсталость и хроническое заболевание мозга. Воздействие свинца на организм человека тяжёлое и долговременное. Он способен замещать кальций в костях и оставаться постоянным источником отравления организма в течение длительного времени [1].

Из-за высокой токсичности свинца контролирующиеся организации по этому ингредиенту предъявляют к промышленным сточным водам предприятий на выпуске в канализацию особенно жёсткие требования.

В настоящее время для нейтрализации сточных вод, содержащих свинец, используются: реагентный (физико-химический), ионообменный, электродиализный, сорбционный, обратноточный, электрохимический и экстракционный методы [2]. Все они крайне неравноценны как по эффективности извлечения свинца, так и по экономическим показателям [3–6].

Целью проведённой работы являлось исследование, разработка и внедрение ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод, загрязнённых соединениями свинца, для предприятий, на которых они образуются.

Основная часть. Лабораторные и производственные исследования, позволяющие разработать и внедрить технологию очистки сточных вод от соединений свинца

Лабораторные исследования проводились с целью выявления наиболее приемлемой для производственников технологии обработки сточных вод, загрязнённых свинцом [6–8].

Исследовались следующие варианты технологий:

1. Локальная обработка «известковым молоком» усреднённых, содержащих свинец промывных и концентрированных сточных вод, с последующим отстаиванием и фильтрованием (рисунок 1).
2. Совместная обработка «известковым молоком» промывных кислотно-щелочных и содержащих свинец сточных вод с декантатом предварительно очищенных, содержащих свинец, отработанных технологических растворов (ОТР) и последующим отстаиванием и фильтрованием (рисунок 2).
3. Совместная обработка «известковым молоком» промывных кислотно-щелочных, содержащих свинец сточных вод и дозируемых, загрязнённых свинцом ОТР, с последующим отстаиванием и фильтрованием (рисунок 3).

Исследования проводились на установке, приведенной на рисунке 4.

Контроль pH-среды осуществлялся с помощью иономера ЭВ-74. Концентрация свинца (II) определялась на полярографе марки ПУ-1. Исследования проводились на натуральных стоках. Варьирование концентрации свинца в исследуемых образцах достигалось путем добавления к ним азотнокислого свинца. Осаждение гидроксидов свинца осуществлялось «известковым молоком» с концентрацией кальция (II) около 1 г/л. Дозирование «известкового молока» в реакционную смесь производилось капельным способом по показаниям иономера ЭВ-74 при постоянно работающей магнитной мешалке. Контакт сточной жидкости с известковым молоком составлял 10 минут. Далее смесь переливалась в мерный цилиндр и отстаивалась в течение двух часов. Декантат фильтровался на лабораторных фильтрах.

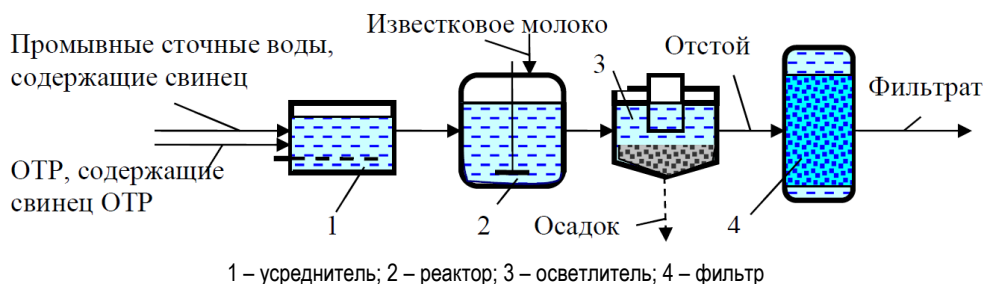


Рисунок 1 – Схема локальной обработки «известковым молоком» содержащих свинец усредненных промывных и концентрированных сточных вод с последующим фильтрованием и отстаиванием

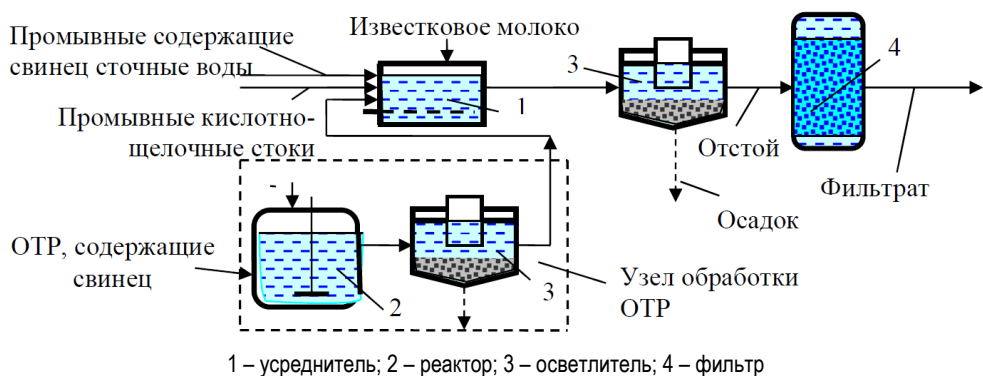


Рисунок 2 – Схема совместной обработки «известковым молоком» промывных кислотно-щелочных и содержащих свинец сточных вод с декантатом предварительно обработанных ОТР, содержащих свинец

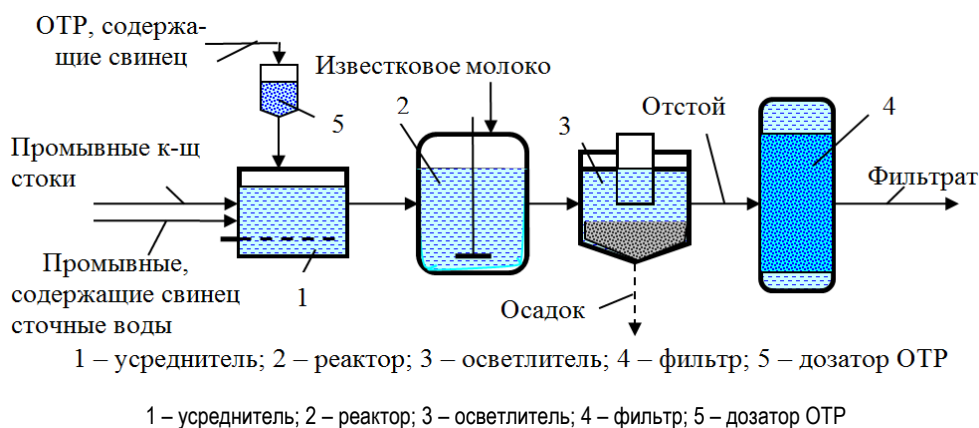


Рисунок 3 – Схема совместной обработки «известковым молоком» усреднённых кислотно-щелочных, содержащих свинец сточных вод и дозируемых, загрязнённых свинцом ОТР

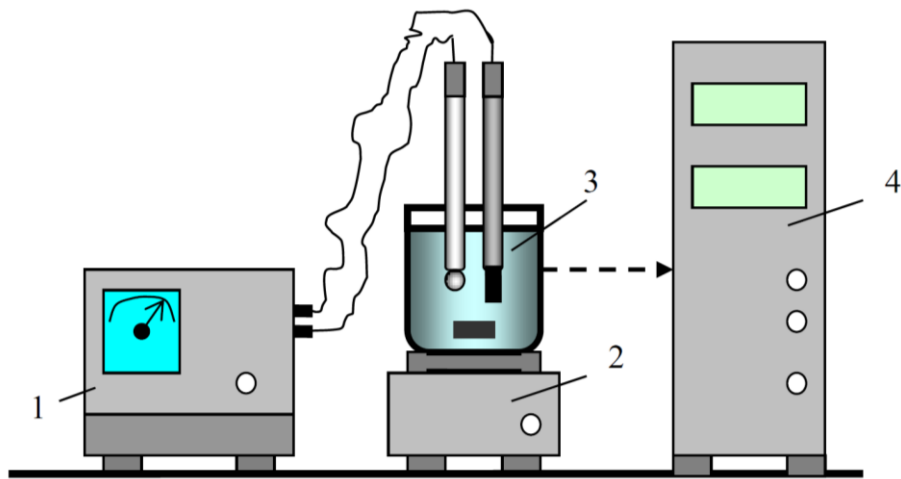


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

Полученный фильтрат анализировался на полярографе на предмет определения в нем концентрации свинца. Результаты анализов сводились в таблицы 1–3.

Таблица 1 – Результаты локальной обработки «известковым молоком» смеси промывных и концентрированных сточных вод, содержащих свинец (технология № 1)

№ эксперимента	Исходные сточные воды		Обработанные сточные воды			
			отстой		фильтрат	
	pH	C_{Pb} , мг/л	pH	C_{Pb} , мг/л	pH	C_{Pb} , мг/л
1.	10,2	204	8,7	5,6	8,5	0,4
			8,9	8,9	8,7	0,52
			9,1	3,4	9,0	0,3
			9,4	3,8	9,2	0,31
2.	10,5	221	8,4	4,8	8,3	0,48
			8,7	8,2	8,6	0,51
			9,3	3,4	9,1	0,32
			9,4	3,5	9,2	0,34
3.	10,4	213	8,3	4,9	8,1	0,43
			8,7	6,4	8,5	0,42
			9,4	3,8	9,3	0,34

Таблица 2 – Результаты обработки «известковым молоком» смешанных в соотношении 1:1 промывных кислотнo-щелочных и содержащих свинец сточных вод (технология № 2)

№ эксперимента	Исходные сточные воды		Обработанные сточные воды			
			отстой		фильтрат	
	pH	C_{Pb} , мг/л	pH	C_{Pb} , мг/л	pH	C_{Pb} , мг/л
1.	10,2	204	8,7	5,6	8,5	0,4
			8,9	8,9	8,7	0,52
			9,1	3,4	9,0	0,3
			9,4	3,8	9,2	0,31
2.	10,5	221	8,4	4,8	8,3	0,48
			8,7	8,2	8,6	0,51
			9,3	3,4	9,1	0,32
			9,4	3,5	9,2	0,34
3.	10,4	213	8,3	4,9	8,1	0,43
			8,7	6,4	8,5	0,42
			9,4	3,8	9,3	0,34

Таблица 3 – Результаты обработки «известковым молоком» промывных кислотнo-щелочных содержащих свинец сточных вод и дозируемых содержащих свинец ОTR (технология № 3)

№ эксперимента	Исходные сточные воды		Обработанные сточные воды				Эффект очистки, %
	pH	C_{Pb} , мг/л	отстой		фильтрат		
			pH	C_{Pb} , мг/л	pH	C_{Pb} , мг/л	
1.	2,2	96,3	8,4	2,4	8,2	1,2	98,75
			8,93	1,2	8,7	0,0	99,68
			9,1	2,15	9,0	0,15	99,84
			9,3	2,2	9,2	0,2	97,84
2.	2,8	89,2	8,2	2,6	8,0	0,3	99,66
			8,51	2,4	8,2	0,1	98,82
			9,1	2,3	9,05	0,15	98,83
			9,4	2,8	9,2	0,2	99,77
3	2,78	68,4	9,3	3,4	9,2	0,25	99,63
			9,5	2,8	9,4	0,15	99,78
			9,8	4,5	9,7	0,2	99,70

Зависимость остаточной концентрации свинца (II) от величины pH показана на рисунке 5.

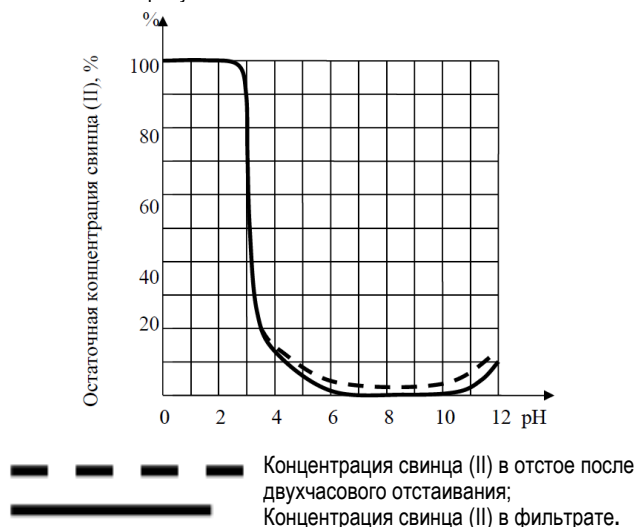


Рисунок 5 – Зависимость остаточной концентрации свинца (II) от величины pH

В процессе проводимых исследований было выявлено:

1. При локальной обработке содержащих свинец промывных и концентрированных стоков наблюдалось образование плохо осаждаемой взвеси и трудно-фильтруемого мелкодисперсного осадка.
2. Совместная обработка кислотно-щелочных и содержащих свинец сточных вод способствовала образованию более крупного и соответственно лучше осаждаемого осадка. Причем технология, предусматривающая дозирование содержащих свинец ОТП, более предпочтительна. При равной эффективности ее дешевле и проще реализовать.

На основании проведенных исследований для обработки сточных вод, содержащих свинец, принята «попутная технология», то есть технология, при которой обработка сточных вод, содержащих свинец, осуществляется в рамках очистных сооружений гальванического производства на том же оборудовании, теми же химикатами, при сохранении основных параметров ранее принятой традиционной реагентной технологии очистки сточных вод гальванического производства [9–11].

Для снижения концентрации свинца в обрабатываемых сточных водах до требуемой концентрации используется:

- сорбционная способность оксигидратного коллектора, образующегося в процессе нейтрализации сточных вод, содержащих тяжёлые металлы;

- эффект соосаждения;
- выравнивание концентраций свинца в объединённом стоке за счёт выделения ОТП из промывных сточных вод, а значит и более совершенного усреднения и, соответственно, многократного уменьшения пиковых концентраций перед смесителями.

В процессе исследований сложнейший механизм сорбции оксигидратным коллектором ионов и гидроксидов свинца не рассматривался. А был взят априорно как «чёрный ящик», обладающий совокупной сорбционной ёмкостью. При этом, как показали исследования, эта совокупная сорбционная ёмкость при худшем стечении обстоятельств значительно превышала достаточную (ОАО «Коралл»).

Для других объектов всегда необходимо проводить экспериментальную проверку достаточности сорбционной ёмкости оксигидратного коллектора для очистки сточных вод, содержащих свинец с помощью «попутной» технологии.

Как правило, на предприятиях, на которых имеется гальваническое производство, производство кинескопов, хрустала и т.п. сточные воды загрязнены и фтором. Это связано с тем, что травление всевозможных изделий осуществляется плавиковой кислотой.

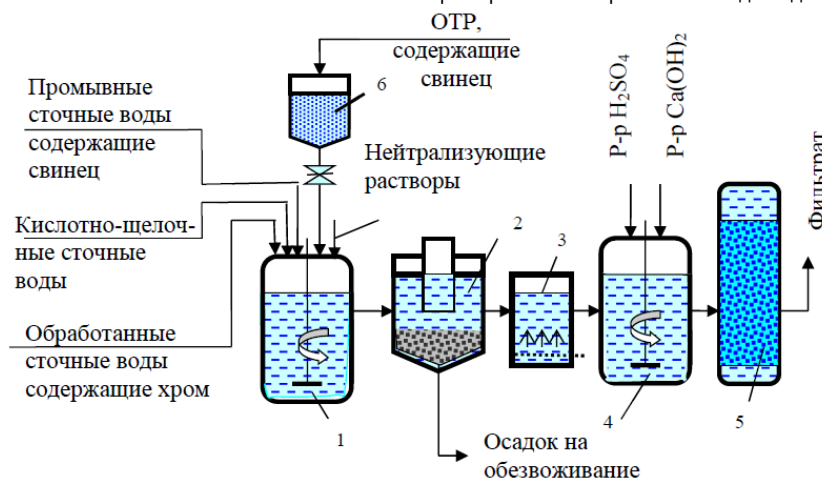
Традиционно этот поток сточных вод очищается от фтора на первой стадии очистки при pH = 10,5 - 11,0. При такой высокой щёлочности происходит растворение гидроксидов свинца и происходит вынос свинца из осветлителей. Поэтому сточные воды загрязнённые свинцом, выделяются из сточных вод содержащих фтор в самостоятельные потоки, чтобы обрабатываться методами, которые будут описаны ниже.

Промывные сточные воды, содержащие свинец, выделенные из сточных вод содержащих фтор, сбрасываются в линию кислотно-щелочных сточных вод и обезвреживаются вместе с ними «попутно» (рисунок 6).

Что же касается ОТП, содержащих свинец, то эти ОТП выделяются из промывных сточных вод в отдельный поток и самотечно (или в напорном режиме) поступают в приёмный резервуар-накопитель (поз.6), размещённый на очистных сооружениях. Принятая ёмкость обеспечивает пребывание этих ОТП в течение месяца, т. е. условно повышает усредняющую способность реактор-нейтрализатора всех видов сточных вод при равномерном подмешивании от нескольких часов до месяца. Как показывают расчёты, концентрация свинца при этом в общем стоке не будет превышать 0,02 мг/л, что более чем достаточно для эффективной очистки стоков от свинца.

Учитывая тот факт, что эффективность удержания взвесей горизонтальным отстойником, внедрённом на очистных сооружениях завода ОАО «Коралл», не превышала 60 %, технология предусматривает глубокое осветление прошедших отстаивание сточных вод методом фильтрования.

Для этого сточные воды после осветлителя направляются в сборник осветлённых сточных вод, оборудованный барботажным устройством. Из этого сборника сточные воды в напорном режиме подаются в линию корректора pH, оборудованного перемешивающим устройством. В эту же зону для поддержания pH = 9,0 – 9,2 подаются 1 %-ный раствор серной кислоты или 1 %-ный раствор извести. Откорректированные по pH сточные воды подаются на фильтрование.



1 – реактор-нейтрализатор всех видов сточных вод; 2 – осветлитель; 3 – приёмный резервуар; 4 – корректор pH; 5 – блок механических фильтров; 6 – дозатор ОТП, содержащих свинец

Рисунок 6 – Формирование потоков сточных вод и схема «попутной» технологии обработки сточных вод содержащих свинец

Заключение

1. Предлагаемая «попутная» технология очистки сточных вод от свинца позволяет при минимальных затратах достичь концентрации свинца на выпусках предприятия в городскую хозяйственно-бытовую канализацию, установленных контролирующими организациями г. Гомеля.
2. Внедрённая на ОАО «Коралл» г. Гомель «попутная» технология очистки сточных вод от свинца за длительный срок эксплуатации локальных очистных сооружений не допускала превышений ПДК, установленных контролирующими организациями города на выпуске в хозяйственно-бытовую канализации по этому ингредиенту.

Список цитированных источников

1. Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей : в 3-х т. / Под ред. засл. деят. науки проф. Н. В. Лазарева и докт. мед. наук Э. Н. Левиной. – Изд. 7-е, пер. и доп.– Л. : Химия. – 1976.
2. ВНИИ информации и технико-экономических исследований в электротехнике (Информэлектро). Обезвреживание свинца в промышленных выбросах. – М. : Аналитическая справка, 1988.
3. Degremont. Справочник по обработке воды: в 2-х т. : пер. с фр. – СПб. : Новый журнал, 2007. – 1696 с.
4. Очистка промышленных сточных вод: пер. с нем. – СПб : Новый журнал, 2012 – 384 с.
5. Справочник по современным методам и технологиям очистки природных и сточных вод и оборудованию / ДАНСЭЕ, отдел по Восточной Европе. – Копенгаген, 2001. – 253 с.
6. Новый справочник химика. Процессы и аппараты химических технологий. Ч II. – СПб : НПО. «Профессионал», 2006. – 916 с.
7. Лурье, Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод / Ю. Ю. Лурье. – М. : Химия, 1984. – 448 с.
8. Экспериментальные методы химической кинетики : учебное пособие / под ред. Н. М. Эмануэля, Г. Б. Сергеева. – М. : Высшая школа. – 1980. – 375с.
9. НИР «Брест-86». Исследование эффекта совместной обработки сточных вод гальванического производства и производства печатных плат. – Брест, 1987.
10. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения : монография / Е. А. Урецкий. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2014. – 360 с.
11. Урецкий, Е. А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : монография / Е. А. Урецкий, Е. С. Гогина, В. В. Мороз. – М. : АСВ, 2022. – 620 с.

References

1. Vrednye veshchestva v promyshlennosti. Spravochnik dlya himikov, inzhenerov i vra-chej : v 3-h t. / Pod red. zasl. deyat. nauki prof. N. V. Lazareva i dokt. med. nauk E. N. Levinoj. – Izd. 7-e, per. i dop.– L. : Himiya. – 1976.
2. VNIИ informacii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovanij v elektrotekhnike (Informelektrо). Obezvrezhivanie svinca v promyshlennyh vybrosah. – M. : Analiticheskaya spravka, 1988.
3. Degremont. Spravochnik po obrabotke vo-dy: v 2-h t. : per. s fr. – SPb. : Novyj zhur-nal, 2007. – 1696 s.
4. Ochistka promyshlennyh stochnyh vod: per. s nem. – SPb : Novyj zhurnal, 2012 – 384 s.
5. Spravochnik po sovremennym metodam i tekhnolo-giyam ochistki prirodnyh i stochnyh vod i oborudova-niyu / DANSEE, otdel po Vos-tochnoj Evrope. – Kopen-gagen, 2001. – 253 s.
6. Novyj spravochnik himika. Processy i apparaty himicheskikh tekhnologij. CH II. – SPb : NPO. «Professional», 2006. – 916 s.
7. Lur'e, Yu. Yu. Analiticheskaya himiya promyshlennyh stochnyh vod / Yu. Yu. Lur'e. – M. : Himiya, 1984. – 448 s.
8. Eksperimental'nye metody himicheskoy kinetiki : uchebnoe posobie / pod red. N. M. Emanuelya, G. B. Sergeeva. – M. : Vysshaya shko-la. – 1980. – 375s.
9. NIR «Brest-86». Issledovanie effekta sovместnoj obrabotki stochnyh vod gal'vani-cheskogo proizvodstva i proizvodstva pechat-nyh plat. – Brest, 1987.
10. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii promyshlennogo vodосnabzheniya i vodootvedeniya : mo-nografiya / E. A. Ureckij. – LAP LAMBERT Aca-demic Publishing, Germany, 2014. – 360 s.
11. Ureckij, E. A. Optimizaciya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashino-stroeniya : monografiya / E. A. Ureckij, E. S. Gogina, V. V. Moroz. – M. : ASV, 2022. – 620 s.

Материал поступил 17.11.2022, одобрен 09.01.2023, принят к публикации 09.01.2023

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДЫ ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ОАО «БЭМЗ»

В. В. Мороз¹, Е. А. Урецкий², Э. И. Михневич³

¹К. т. н., доцент, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru

²Инженер-эколог РУП «Белорусский государственный проектный институт», Витебск, Беларусь, e-mail: euretsky@yandex.by

³Д. т. н., профессор кафедры водоснабжения и водоотведения

УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: ed_mik_bia@tut.by

Реферат

В статье приведены результаты исследования по изучению состава сточных вод производства печатных плат, которые позволили создать малозатратную технологию доочистки этих сточных вод, что позволяет байпасно-ступенчато возвращать до 85 % очищенных сточных вод обратно в производство и получать воду повышенного качества (Е4) для приготовления растворов драгметаллов.

Ключевые слова: ионы тяжелых металлов, тонкослойные отстойники, торф, намывные фильтры, электродиализ, ионообменные фильтры.

OBTAINING HIGH QUALITY WATER USED FOR THE PRODUCTION OF PRINTED BOARDS AT JSC «BEMZ»

V. V. Moroz, E. A. Uretsky, E. I. Mikhnevich

Abstract

The article presents the results of a study on the study of the composition of wastewater from the production of printed circuit boards, which made it possible to create a low-cost technology for the post-treatment of this wastewater, which makes it possible to return up to 85% of the treated wastewater back to production in a bypass-step manner and obtain high-quality water (E4), for the preparation of solutions of precious metals.

Keywords: Heavy metal ions, thin-layer sedimentation tanks, peat, pre-wash filters, electrodiagnosis, ion-exchange filters.

Введение

На сегодняшний день микроэлектроника остается по-прежнему одним из катализаторов научно-технического прогресса важнейших отраслей народного хозяйства. Уровень и скорость её развития, а также объемы производства ее основных изделий во многом определяют оборонный, экономический и культурный потенциал страны [1, 2, 3, 4].

Основными стандартами, которые регламентируют качество воды, применяемой в микроэлектронике, являются стандарты Института полупроводниковой техники и материалов (Semiconductor Equipment and Materials Institute – SEMI) и Американского общества по испытанию материалов (American Society of Testing Materials – ASTM). Требования к воде по нормам ASTM D-5127-90 и ОСТ 11.029.003-80 [1, 2, 3, 4]. Но поскольку ОСТ 11.029.003-80 был выпущен в 1980 году и требования к деионизованной воде, указанные в нем устарели, и в своей деятельности по проектированию и изготовлению установок получения ультрачистой воды для микроэлектроники мы в основном руководствуемся стандартами SEMI и ASTM.

В стандарте ASTM D 5127-90 для деионизованной воды, применяемой в электронике, предусмотрено четыре типа воды, в зависимости от размера полупроводниковых микроэлементов, в производстве которых она используется:

- тип Е-1 – ультрачистая вода для элементов размером менее 1 мкм;
- тип Е-2 – для элементов размером от 1 до 5 мкм;
- тип Е-3 – для элементов размером более 5 мкм;
- тип Е-4 – для производства электронных плат общего назначения, где возможно промежуточное хранение подготовленной воды в атмосферных емкостях.

Основная часть. Основные задачи исследований и разработка технологической схемы доочистки сточных вод

На ОАО «Брестский электромеханический завод» (ОАО «БЭМЗ»), в свое время одним из крупнейших предприятий радиопромышленности СССР, Московским государственным проектным институтом (МГПИ) было запроектировано и внедрено мощное гальваническое производство. Для очистки сточных вод этого производства были также запроектированы очистные сооружения реагентного

типа большой для приборостроительной отрасли производительности 88,1 м³/ч. Очистные сооружения занимали отдельный 4-х этажный корпус.

Согласно проекту МГПИ на ОАО «БЭМЗ» для приготовления технологических растворов гальванического производства (цинкование, никелирование, хромирование и др.) использовалась водопроводная вода для питьевых нужд. Однако эта вода не обеспечивала получения качественных покрытий деталей. Объяснялось это тем, что её забор в г. Бресте осуществлялся из подземных источников. Вследствие этого она содержала в своём составе высокие концентрации солей жёсткости, железа и пр. Положение усугублялось ещё и тем, что из-за несвоевременных промывок городских водопроводных сетей и их дезинфекции в воде имели место высокие концентрации взвеси и органических загрязнений. Все перечисленные факторы негативно сказывались на качестве покрытий.

Для устранения этих негативных факторов авторами была разработана и внедрена технология доочистки сточных вод с последующим возвратом их обратно в производство [5, 6, 7].

Создание этой технологии упрощалась внедрением малозатратной ресурсосберегающей технологии совместной очистки сточных вод производств защитных покрытий (гальваника + покраска) [7, 8]. Новая технология по сравнению с проектной позволила снизить содержание взвешенных веществ в осветлённых сточных водах с 20–40 мг/дм³ до 10–20 мг/дм³, ХПК с 2500 мг/дм³ до 20 мг/дм³ и общее солесодержание с 1500–2500 мг/дм³ до 20–25 мг/дм³.

Согласно этой технологии сточные воды, прошедшие предварительную очистку на ранее разработанной рациональной технологии, последовательно проходят осветление на тонкослойном модуле с зернистым хлопьеобразователем, напорном каркасно-засыпном фильтре и электродиализной установке [5, 6]. Эта технология, в зависимости от требований ТУ к качеству технической воды, позволяла байпасно-ступенчато возвращать доочищенные сточные воды на повторное использование. В процентном соотношении количество от всепотребляемой воды составило: осветлённые воды на собственные нужды очистных сооружений 8–10 %, фильтрат на промывочные операции деталей гальванического производства 60–65 %, дилуат для приготовления растворов 6–10 %).

Результаты работы линии доочистки сточных вод приведены в таблице 1.

В рамках расширения производственной базы ОАО «БЭМЗ» МГПИ разработал проект отдельного корпуса для производства многослойных печатных плат. Согласно этому проекту сброс различного вида сточных вод от этого производства составлял 250 м³/час. Однако технология доочистки сточных вод гальванического производства, описанная выше, была недостаточно высока для сточных вод производства печатных плат и в особенности для приготовления растворов драгметаллов (золочения, серебрения, палладирования и пр.), соответствующим нормам ASTM. (E4). Необходимы были новые подходы.

Таблица 1 – Результаты работы линии доочистки

Место отбора проб	pH	Взвешенные вещества, мг/дм ³	Сухой остаток, мг/дм ³	Общее солесодержание, мг/дм ³	Окисляемость, мг/дм ³	Щёлочность, мг/дм ³	Хром, мг/дм ³	Железо, мг/дм ³
Реактор	9,00	324,0	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.	20	13,5
Отстойник	8,85	21,0	882,0	1100,0	7,4	3,1	0,05	1,44
Фильтр	8,76	5,0	863,0	1000,0	7,2	3,0	0,02	0,42
Дилуат*	7,20	1,2	220,0	160,0	6,4	2,2	0,01	0,02
Техническая вода	8,1	8,2	202,0	240,0	5,6	4,0	отс	0,22
Водопроводная вода	6,9	4,8	261,0	320,0	4,8	4,6	отс	0,14

* – после однократной обработки на ЭДУ

Как известно, состав элементов системы очистки воды для производств печатных плат, количество стадий подготовки воды, аппаратное оформление технологического процесса, как правило, зависит от источника водоснабжения, состава исходной воды, требуемой степени очистки для различных производств.

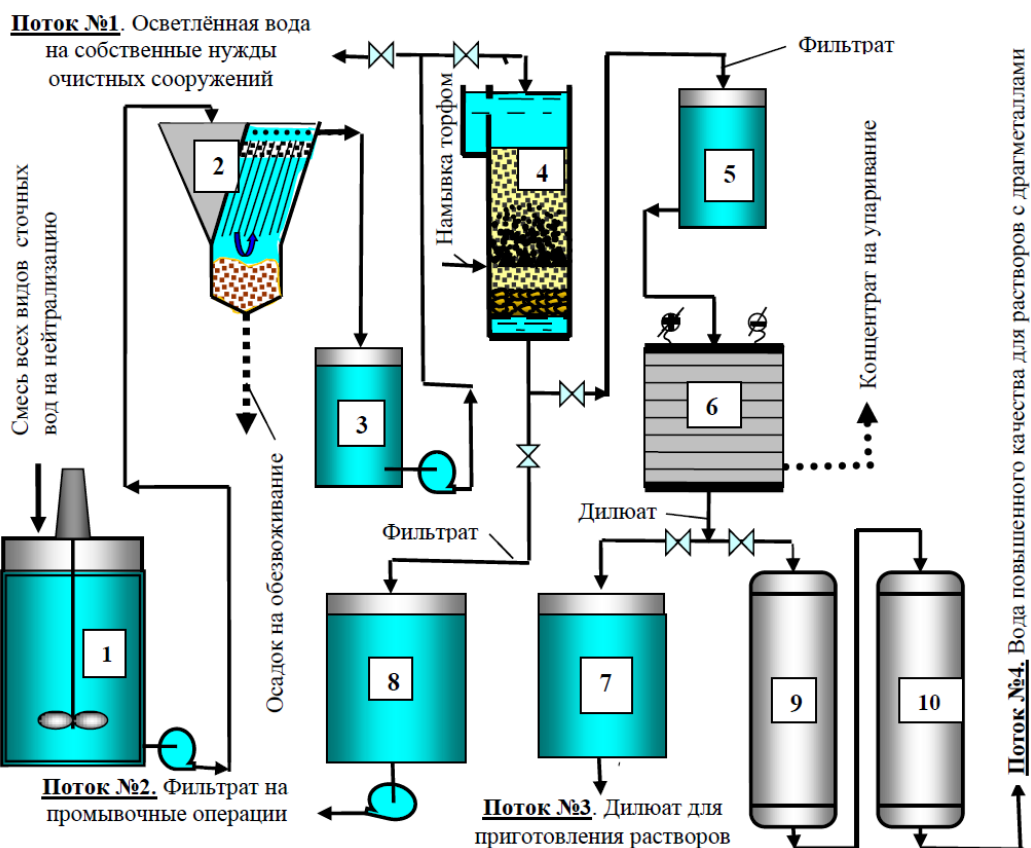
Именно поэтому современные системы получения воды повышенного качества предусматривают многостадийный процесс, обеспечивающий максимальное качество получаемой воды:

- стадию очистки на однослойных или многослойных насыпных фильтрах (фильтрах механической очистки);
- стадию адсорбционной очистки на насыпных адсорбционных фильтрах с активным углем или с использованием различного типа намывных сорбентов;
- мембранные технологии (нанофильтрация, ультрафильтрация, обратный осмос, электродиализ и пр.), которые могут значительно снизить содержание анионов и катионов (при обратном осмосе до 1 % от их содержания в исходной воде), задерживают микроорганизмы, высокомолекулярные органические соединения, эндотоксины и др. примеси;
- стадию высокой степени обессоливания воды с использованием Н-катионирования и ОН-анионирования.

С учётом требований, изложенных выше, для проведения научных исследований на очистных сооружениях ОАО «БЭМЗ» была смонтирована экспериментальная ступенчато-байпасная линия доочистки сточных вод для ПЗП (производство защитных покрытий) и ППП (производство печатных плат) (рисунок 1), которая в отличие от традиционной линии подготовки воды предназначена только для гальванического производства где с целью повышения качества воды была дополнена намывным фильтром (поз. 4), катионитовым фильтром (поз. 9) и анионитовым фильтром (поз. 10). При этом качество воды, прошедшей узел доочистки, должно было соответствовать требованиям технологической службы предприятия, указанным в таблице 2.

Предложенное техническое решение, производительность 1,0 до 1,5 м³/ч позволило с помощью ступенчато-байпасного подхода доочистки сточных вод дифференцировано обеспечить потребителей ПЗП и ППП водой необходимого качества.

При этом часть потока воды, прошедшего очистку с помощью электродиализа (поз. 6), направляется на ионообменные фильтры, где подвергается дополнительной деминерализации.



1 – реактор-нейтрализатор всех видов сточных вод; 2 – тонкослойный модуль с зернистым хлопьеобразователем; 3 – бак осветлённой сточной воды; 4 – намывный фильтр; 5 – бак фильтрата; 6 – электродиализная установка ЭДУ 400х2; 7 – бак дилуата; 8 – бак смеси фильтрата и дилуата; 9 – катионитовый фильтр; 10 – анионитовый фильтр

Рисунок 1 – Схема экспериментальной линии доочистки сточных вод ПЗП и ППП на ОАО «БЭМЗ»

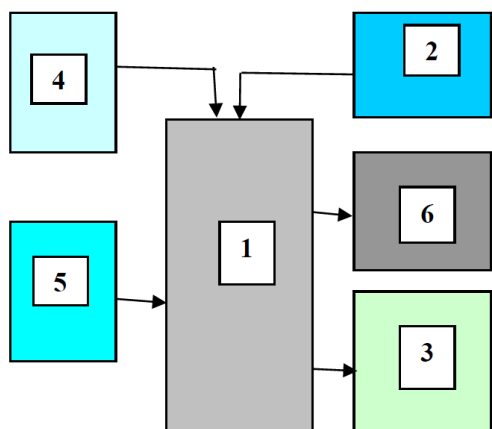
Таблица 2 – Характеристика качества воды, используемой для приготовления растворов технологических ванн защитных покрытий

№№ п/п	Показатели качества воды	Единица измерения	Требования ОСТ 420054.076
1	Взвешенные вещества	мг/дм ³	10
2	Твёрдые вещества	мг/дм ³	20
3	Цветность	градус	20
4	Жёсткость	мг-экв/дм ³	6,0
5	Железо	мг-экв/дм ³	0,3
6	Окисляемость	мгО ₂ /дм ³	5,0

Эта деминерализованная вода соответствует американскому стандарту ASTM для воды качества (E4) и она пригодна для приготовления технологических растворов драгметаллов [2, 3].

Технологическая схема работает следующим образом. Смесь сточных вод после нейтрализации в реакторе-нейтрализаторе (поз. 1) локальных очистных сооружений ОАО «БЭМЗ» отдельным потоком направляется на экспериментальную линию доочистки сточных вод ПЗП и ППП (рисунок 1). На этой линии реализуется дифференцированная байпасная схема. Она состоит из тонкослойного модуля со встроенными зернистыми хлопьеобразователями (поз. 2), намывного фильтра (поз. 4), стандартной электродиализной установки ЭДУ 400x2 Алма-атинского завода МПС (поз. 6), катионитового ионообменного фильтра (поз. 9) и анионитового ионообменного фильтра (поз. 10). Определяющими загрязнителями промышленных сточных вод исследуемого типа являются взвешенные вещества, железо и растворённые органические вещества.

Одной из задач являлось исследование возможности использования намывного фильтра в качестве узла доочистки от взвешенных и органических загрязнений. Для этого была изготовлена опытно-промышленная установка блок-схема, которой приведена на рисунке 2, а схема фильтра-сорбера в сборе показана на рисунке 3 [9, 12].



1 – фильтр-сорбер; 2 – узел предварительного осветления сточных вод; 3 – ёмкость фильтрата; 4 – узел приготовления суспензии Сорбента; 5 – ёмкость промывной воды; 6 – сборник промывной воды

Рисунок 2 – Блок-схема опытно-промышленной установки

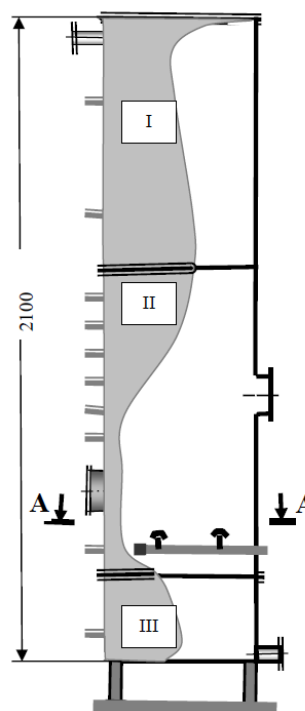
Корпус фильтра-сорбера был изготовлен из нержавеющей стали толщиной 4 мм. Фильтр состоял из трёх отдельных секций, имеющих фланцевые соединения. Общая высота фильтра составляла 2700 мм. Площадь фильтрующей поверхности 0,16 м². Все три секции были оборудованы пробоотборниками и штуцерами для подключения пьезометров. Фильтр имел патрубок для подачи исходной жидкости, сборный коллектор промывной воды, патрубки для загрузки и выгрузки сорбента, устройства для ввода сорбента, коллектор для подачи промывной воды и отвода фильтрата. Фильтр-сорбер был оборудован устройством для измерения скорости фильтрации. Все основные элементы установки были соединены стальными трубопроводами диаметром 40 мм и оборудованы запорно-регулирующей арматурой.

Принципиальная схема загрузки фильтра-сорбера приведена на рисунке 4, а система намыва сорбента на рисунке 5.

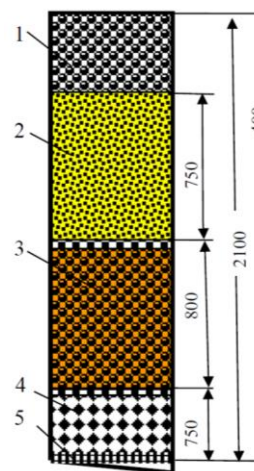
Для определения эффективности удаления основных загрязнителей опытной установкой была проведена серия опытов. На основании полученных данных были приняты оптимальные параметры технологического режима фильтра. Результаты работы установки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты работы установки

№№ п/п	Наименование загрязнений	Ед. измер.	Концентрация загрязнений в исходной сточной жидкости	Концентрация загрязнений в фильтрате фильтра-сорбера	Эффект очистки %
1.	Взвешенные вещества	мг/дм ³	38–43	3–3,2	92 %
2.	Органические вещества	мгО ₂ /дм ³	48–51	14,2–16	68 %
3.	Железо общее	мг/дм ³	2,36–2,8	0,73–0,92	62 %



I – верхний элемент; II – средний элемент; III – нижний элемент
Рисунок 3 – Схема фильтра-сорбера в сборе



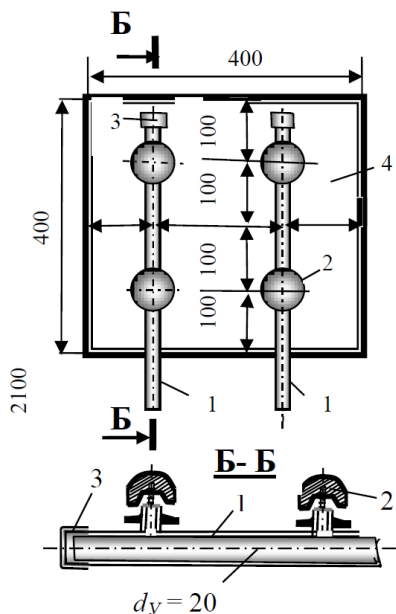
1 – щебень крупностью 25–50; 2 – кварцевый песок крупностью 0,8–1,2 мм; 3 – керамзит крупностью 3-5мм; 4 – гранит крупностью 5–7 мм; 5 – поддерживающая сетка
Рисунок 4 – Принципиальная схема загрузки фильтра-сорбера

В таблице 4 приведены усреднённые показатели по основным параметрам работы.

Таблица 4 – Усреднённые показатели по основным параметрам

Проба	Ступень обработки	pH	Электропроводность, $\mu\text{S cm}^{-1}$	Железо, мг/дм ³	Жёсткость, мг-экв/дм ³	Хлориды, мг/дм ³	Сульфаты, мг/дм ³	Объём, %
Исходная	I	8,42	1100	0,43	6,60	185,1	256,9	
	II	8,10	1960	0,27	12,4	276,2	490,3	
	III	8,20	2734	0,25	16,2	383,5	552,0	
Диллюат	I	6,97	147	0,14	1,38	24,0	32,6	54,0
	II	7,02	300	0,13	2,98	56,3	11,2143	53,0
	III	7,24	517	0,21	3,30	85,4	7	51,0
Концентрат	I	8,10	1960	0,27	12,4	276,2	430,3	46,0
	II	8,20	2734	0,25	16,2	383,5	552,0	47,0
	III	8,20	3700	0,22	21,6	464,8	619,3	49,0

Для деминерализации потока воды, направляемого для приготовления растворов драгметаллов (Au, Ag, Pt и др.) была смонтирована опытная ионообменная установка, приведенная на рисунке 8.



1 – распределительный коллектор; 2 – дренажный копачок; 3 – заглушка; 4 – корпус фильтра
Рисунок 5 – Система намыва сорбента

После проведения исследований на разработанном и внедрённом на ОАО «БЭМЗ» многослойном намывном фильтре-сорбере были проведены дальнейшие исследования доочистки сточных вод на электродиализной установке марки ЭДУ 400x2 Алма-атинского завода МПС. Фотография установки показана на рисунке 6 [6].

С целью увеличения объёма выхода диллюата была предпринята попытка перекомпоновки коммуникаций ЭДУ с целью уменьшения затрат воды на собственные нужды и создания условий для ступенчатого концентрирования рассола до необходимой концентрации (рисунок 7).

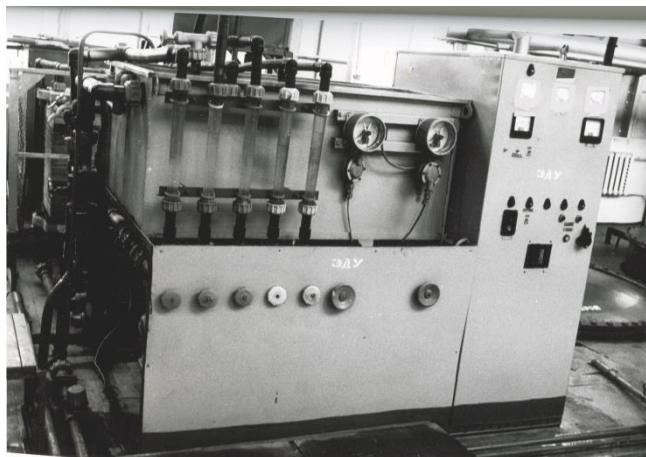
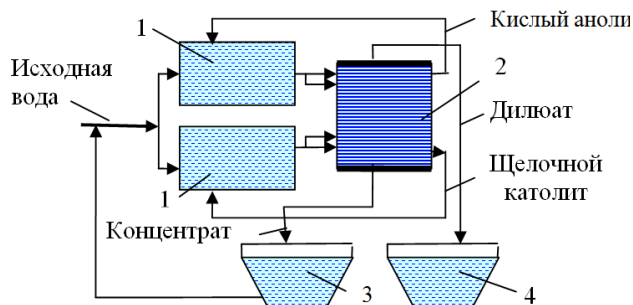


Рисунок 6 – Электродиализная установка ЭДУ 400x2



1 – промежуточные баки; 2 – электродиализатор ЭДУ 400x2; 3 – сборник концентрата; 4 – сборник диллюата
Рисунок 7 – Проточно-ступенчатый режим



Рисунок 8 – Опытная ионообменная установка, смонтированная на ОАО «БЭМЗ»

На основании проведенных лабораторных и полупромышленных исследований [8, 9] были установлены следующие основные технологические параметры ионообменных фильтров:

- загрузка фильтра (марка ионита): катионитового – КУ-2-8 (ГОСТ 20298-74), анионитового – АВ-17-8 (ГОСТ 20301-74);
- насыпной вес товарного ионита КУ-2-8 - 0,8 т/м³; АВ-17-8 - 0,6-0,7 т/м³;
- объём 1 м³ сухого ионита при набухании КУ-2-8 - 1,15 м³, АВ-17-8 – 2,8 м³;
- скорость фильтрования сточных вод – 15 м/ч;
- регенерирующие растворы: катионита – HCl, H₂SO₄; анионита – NaOH;
- скорость подачи регенерационного раствора – 2–3 м/ч;
- при применении HCl и NaOH; регенерация производится растворами постоянной концентрации;
- при применении H₂SO₄ для предотвращения выпадения в слое катионита и дренаже фильтра осадка сульфата кальция первая половина регенерационного раствора имеет концентрацию 1,5–2%, вторая половина – 8–10%. Первая половина элюатов содержащая 90–95% всех десорбированных ионов направляется на переработку, вторая – в бак для повторного использования в следующем цикле регенерации.

Интенсивность подачи воды на взрыхление ионитов: катионита – 3,5 дм³/с·м²; анионита – 2,5 дм³/с·м². Продолжительность взрыхления – 10 мин. Удельный расход воды на отмывку ионита, м³/м³ загрузки катионита 8–10, анионита 11–13.

Расход растворов реагентов на регенерацию, м³/м³ ионита: 7–10 % HCl – 2,25–2,5; 8–10% H₂SO₄ – 2,2–2,5; 4–6 % NaOH – 4,4–6. Количество сточных вод, очищаемых 1 м³ ионита КУ-2-8 – 200–250; АВ-17-8 – 150–160.

На основании литературных данных для ионообменной доочистки были выбраны катионит КУ-2 и анионит АВ-17. Экспериментально определена ёмкость константы обмена катионов Ca²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺ и др.; анионов Cl⁻, SO₄²⁻, CrSO₄²⁻ и др. на этих ионитах.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана схема ступенчатого повторного использования очищенных сточных вод в зависимости от требований производства к качеству технической воды и от состава сточных вод, поступающих на очистку, позволяющая возвратить до 85–90 % очищенной воды в производство.
2. В результате проведенных лабораторных исследований в полупроизводственных условиях определены технологические параметры всех элементов схемы оборотного водоснабжения.
3. Исследования позволили установить, что в условиях завода подготовка сточных вод для использования их для приготовления растворов драгметаллов качеством E4 (стандарт ASTM) возможна после их обезвреживания на рациональной технологии и последующем отстаивании на полочных отстойниках, фильтровании на намывных фильтрах, обработке методом электролиза и ионообменных фильтрах.
4. Разработаны рекомендации по ионообменной доочистке для установок производительностью 10 и 200 м³/ч, которые были использованы при проектировании корпуса производства печатных плат.
5. Эксплуатация линии доочистки на реальных сточных водах ОАО «БЭМЗ» подтвердила ее работоспособность, невысокую энергоёмкость, низкие затраты воды на собственные нужды, а также весьма незначительный расход кислоты при обработке пакетов электролизного аппарата.

Список цитированных источников

1. Технический справочник по обработке воды: в 2 т: пер. с фр. / Л. Андрианмирандо [и др.] – СПб : Новый журнал, 2007. – 1696.
2. Кармазинов, Ф. В. Очистка промышленных сточных вод: пер. с нем. / Ф. В. Кармазинов, М. И. Алексеев, О. Н. Рублевская. – СПб : Новый журнал, 2012. – 384 с.
3. Справочник по современным методам и технологиям очистки природных и сточных вод и оборудованию / ДАНСЭЕ, отдел по Восточной Европе. – Копенгаген. – 2001. – 253 с.
4. Новый справочник химика. СПб: НПО. «Профессионал». Процессы и аппараты химических технологий. МММ. – Ч II. – 2006. – 916 с.
5. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий / Е. А. Урецкий. – Брест : изд-во БрГТУ, 2007. – 396 с.
6. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения / Е.А. Урецкий. – Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 360 с.
7. Разработка и внедрение новой бессточной и безотходной технологической системы водного хозяйства защитных покрытий приборо- и машиностроения / Теоретические исследования сорбционной и фильтрационной очистки сточных вод гальванического производства от растворённых и взвешенных примесей – Отчёт. – АН СССР. Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского. ОАО «Брестский электромеханический завод» – Москва– Брест. – 1984.
8. Субботкин, Л. Д. Разработка и внедрение ресурсосберегающей технологии совместной очистки сточных вод гальванического и покрасочного производств / Л. Д. Субботкин, Е. А. Урецкий, В. В. Мороз, // Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – № 7 (60) – С. 83–85.

9. Урецкий, Е. А. Опыт повторного использования сточных вод на предприятии приборо- и машиностроения / Е. А. Урецкий, Л. Д. Субботкин, В. В. Мороз // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 11 (63). – С. 98–103.
10. Мороз, В. В. Исследование работы узла сорбционной доочистки сточных вод с использованием намывных сорбционных фильтров / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: IV Международная научно-практическая конференция ICEP – 2021, посвященная юбилеям Брестского государственного технического университета – 55 лет и факультета инженерных систем и экологии – 50 лет. – Брест. 2021.
11. Урецкий, Е. А. Исследование узла сорбционной доочистки осветлённых сточных вод в лабораторных условиях / Урецкий Е. А., Николенко И. В., Мороз В. В. // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – №23(75).

References

1. Tekhnicheskij spravocnik po obrabotke vody: v 2 t: per. s fr. / L. Andrianmirado [i dr.] – SPb : Novyj zhurnal, 2007. – 1696.
2. Karmazinov, F. V. Ochistka promyshlennyh stochnyh vod: per. s nem. / F. V. Karmazinov, M. I. Alekseev, O. N. Rublevskaya. – SPb : Novyj zhurnal, 2012. – 384 s.
3. Spravochnik po sovremennym metodam i tekhnologiyam ochistki prirodnyh i stochnyh vod i oborudovaniyu / DANSEE, otdel po Vostochnoj Evrope. – Kopenhagen. – 2001. – 253 s.
4. Novyj spravocnik himika. SPb: NPO. «Professional». Processy i apparaty himicheskikh tekhnologij. МММ. – Ч II. – 2006. – 916 с.
5. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozjajstve promyshlennyh predpriyatij / E. A. Ureckij. – Brest : izd-vo BrGTU, 2007. – 396 s.
6. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii promyshlennogo vodosnabzheniya i vodootvedeniya / E.A. Ureckij. – Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 360 s.
7. Razrabotka i vnedrenie novoj besstochnoj i bezotходной tekhnologicheskoy sistemy vodnogo hozjajstva zashchitnyh pokrytij priboro- i mashinostroeniya / Teoreticheskie issledovaniya sorbcionnoj i fil'tracionnoj ochistki stochnyh vod gal'vanicheskogo proizvodstva ot rastvoronnyh i vzveshennyh primesej – Otchyot. – АN SSSR. Institut geohimii i analiticheskoy himii im. V. I. Vernadskogo. ОАО «Brestskij elektromekhanicheskij zavod» – Moskva– Brest. – 1984.
8. Subbotkin, L. D. Razrabotka i vnedrenie resursosberegayushchej tekhnologii sovmestnoj ochistki stochnyh vod gal'vanicheskogo i pokrasochnogo proizvodstv / L. D. Subbotkin, E. A. Ureckij, V. V. Moroz, // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. – 2017. – № 7 (60) – S. 83–85.
9. Ureckij, E. A. Opyt povtornogo ispol'zovaniya stochnyh vod na predpriyatii priboro- i mashinostroeniya / E. A. Ureckij, L. D. Subbotkin, V. V. Moroz // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. – 2018. – № 11 (63). – S. 98–103.
10. Moroz, V. V. Issledovanie raboty uzla sorbcionnoj doochistki stochnyh vod s ispol'zovaniem namyvnyh sorbcionnyh fil'trov / V. V. Moroz, E. A. Ureckij // Aktual'nye nauchno-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya: IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya ICEP – 2021, posvyashchennaya yubileyam Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – 55 let i fakul'teta inzhenernyh sistem i ekologii – 50 let. – Brest. 2021.
11. Ureckij, E. A. Issledovanie uzla sorbcionnoj doochistki osvetlyonnyh stochnyh vod v laboratornyh usloviyah / Ureckij E. A., Nikolenko I. V., Moroz V. V. // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. – 2022. – №23(75).

Материал поступил 17.11.2022, одобрен 16.12.2022, принят к публикации 16.12.2022

НЕОБХОДИМОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ СВАЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

А. Н. Невейков¹, В. Н. Дедок²

¹ К. т. н., ведущий инженер отдела искусственных сооружений ГП «Институт «Белжелдорпроект»», Минск, Беларусь, e-mail: geomonolith@gmail.com

² Старший преподаватель кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ofig@bstu.by

Реферат

Статья посвящена проблемам устройства свайных фундаментов в Республике Беларусь. Основное внимание уделено дефектам, возникающим при устройстве буронабивных свай, с указанием причин их появления и возможностям основных неразрушающих методов контроля сплошности свай для выявления дефектов. В статье отмечены пробелы в техническом нормировании данных методов и необходимость их устранения для эффективного внедрения в практику проектирования и строительства в нашей стране.

Ключевые слова: буронабивная свая, дефект, контроль качества, контроль сплошности свай, техническое нормирование.

THE PILE INTEGRITY TESTING TECHNICAL LEGISLATION METHODS NEED IN THE REPUBLIC OF BELARUS

A. N. Nevejkov, V. N. Dedok

Abstract

The article is devoted to the pile foundations erection problems in the Republic of Belarus. The main attention is paid to defects, which occur during the bored piles installation, their reasons indications, and to the pile integrity testing main nondestructive methods possibilities. The article notes these methods technical regulation gaps, and their elimination need for effective implementation in the practice of design and construction in our country.

Keywords: bored pile, defect, quality control, pile integrity testing, technical legislation.

Введение

Устройство свайных фундаментов входит в перечень работ, подлежащих подтверждению соответствия требованиям безопасности ТР 2009/013/BY. В соответствии с ним «сооружения должны быть запроектированы и построены таким образом, чтобы во время строительства и расчетного периода эксплуатации любые возможные воздействия не приводили к... обрушению всего сооружения или его части, деформации сооружения или его части сверх предельно допустимой величины» [1]. Чтобы обеспечить качество выполнения работ, производят контроль на всех этапах устройства свай, в том числе и испытанием статическими и динамическими нагрузками, которые определяют только несущую способность свай, но не гарантируют качество стволов свай как целостной железобетонной конструкции. Трудоемкость и высокая стоимость прямых методов контроля качества свай могут быть компенсированы и дополнены неразрушающими методами контроля. Для обоснования и понимания возможностей их применения необходимо иметь представление о дефектах устройства свайных фундаментов, возникающих на практике, и особенностях основных неразрушающих методов контроля сплошности свай.

1. Проблемы при контроле качества стволов свай и выявляемые дефекты

Среди различных типов фундаментов, применяемых в Беларуси, на долю свайных приходится 25–35 %, причем наибольшее распространение получили сваи заводского изготовления, хотя в мировой практике наиболее распространенными являются буронабивные сваи, на долю которых приходится более 50 % от общего объема применяемых свайных фундаментов, и в настоящее время эта тенденция сохраняется. Различные методы устройства свай могут приводить к различным дефектам в их стволах, что отражается на методах их контроля на соответствие требованиям проекта и действующих нормативных документов (далее – ТНПА).

В СТБ 1164.3-2009 [2] оговорен перечень контролируемых показателей для свай: уровень отметки планировки площадки; точность разбивки осей свай; отклонение в плане, по высоте и от вертикали; глубина погружения свай; несущая способность свай; смещение осей оголовков и ростерков в плане и по высоте; другие показатели, которые определяются технологией устройства свай. Требования к устройству свайных фундаментов до ввода новых ТНПА (СП и СН) по проектированию устройству фундаментов отражены в ТКП 45-5.01-188-2010; ТКП 45-5.01-254-2012, ТКП 45-5.01-256-2012, пособиях П13, П18, П19 к СНБ 5.01.01-99 и др. Но в этих ТНПА не содержится требований к контролю сплошности стволов свай.

Для свай заводского изготовления качество стволов контролируют как до погружения в процессе входного контроля (внешний вид поверхности, геометрические параметры, положение закладных деталей, марка бетона и др.), так и в процессе операционного контроля при погружении свай (пробном и массовом). Для свай построечного изготовления (буровых, буронабивных и набивных, далее – буронабивных) их качество контролируют при изготовлении скважин, укладке бетонной смеси и после твердения бетона. Это может вызывать затруднения и привести к неоднозначности результатов контроля качества из-за сложности грунтовых условий, разнообразия применяемых технологий их устройства и, как следствие, по ряду причин к появлению дефектов. Выявить нарушения однородности стволов при традиционных методах контроля (сравнение объема бетона, фактически уложенного в скважину, и ее геометрического объема или с объемом извлеченного грунта; инклинометрия, кавернометрия, осмотр техническим эндоскопом и другие способы визуального контроля не заполненных бетоном скважин; лабораторные испытания кубиков и выбуренных кернов бетона и др.) фактически невозможно. Основной опасностью при некачественном устройстве стволов свай является снижение их несущей способности и повышение деформативности, что может сказаться на надежности эксплуатации зданий и сооружений, а возникающие из-за дефектов осадки и деформации сооружений требуют дорогостоящих капитальных ремонтов и могут приводить к аварийным ситуациям.

К возникновению дефектов буронабивных свай приводят:

- нарушения при бурении и/или бетонировании из-за низкого качества производства работ;
- отсутствие надлежащего технического контроля в процессе выполнения работ;
- применение некачественных строительных материалов;
- выбор технологии устройства свай, не соответствующей грунтовым условиям площадки;
- неблагоприятные грунтовые условия, влияющие на взаимодействие ствола сваи с окружающими грунтами;
- ошибки в проекте работ и др.

По месту образования и расположению дефекты в буронабивных сваях можно разделить на следующие типы:

- 1) дефекты в зоне верхнего конца сваи – образуются при выгоде шлама, под воздействием фильтрации грунтовых вод и т. д.;
- 2) дефекты в зоне нижнего конца сваи – образуются при перемешивании грунта с бетоном на начальном этапе бетонирования;
- 3) дефекты ствола сваи – образуются в ходе проблем с бетонированием, влияния закарстованных грунтов и других сложных грунтовых условий;

- 4) дефекты защитного слоя – сужения сечений и оголение арматурного каркаса под воздействием фильтрации грунтовых вод;
- 5) дефекты армирования сваи – армирование сваи каркасом не на проектную длину;
- 6) дефекты контакта сваи и окружающего грунта – разрыхление грунта вдоль боковой поверхности сваи и/или наличия шлама на нижнем конце сваи.

W. C. Jones и Y. Wu по результатам многолетней работы по контролю сплошности буронабивных свай привели данные, в которых частота обнаружения дефектных свай составила 38 % от общего числа проконтролированных. Локализация дефектов по длине стволов свай была следующая: у нижнего конца – 44 %, в средней части ствола – 11 %, у верхнего конца – 45 % [3]. Схожие результаты, представленные на рисунке 1, получил В. Сатр, подводя итоги десяти лет работы по контролю сплошности свай [4].

Таким образом, чаще всего встречались дефекты типов 1 и 2, значительно влияющие на работу свай и заметно снижающие их несущую способность, как и реже встречающиеся дефекты типов 3 и 6. Влияние дефектов типов 4 и 5 проявляется при длительной эксплуатации, так как коррозия или нарушения в установке арматурного каркаса могут привести к снижению несущей способности с течением времени. Значительный процент дефектов на нижнем и верхнем концах буронабивных свай объясняется технологическими процессами, связанными с началом и окончанием бетонирования. Характерные дефекты в буронабивных сваях представлены на рисунке 2.

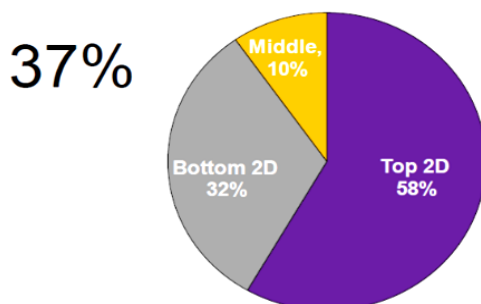
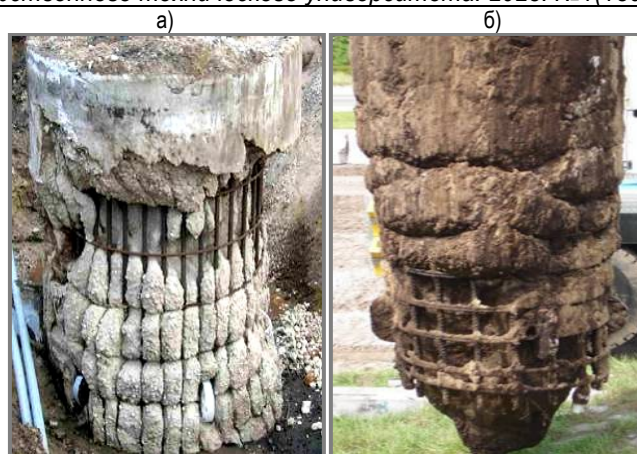


Рисунок 1 – Частота обнаружения дефектных буронабивных свай и локализация, выявленных дефектов [4]



а) верхний конец сваи;
б) нижний конец сваи

Рисунок 2 – Характерные дефекты в буронабивных сваях

Обобщение факторов, негативно влияющих на работу буронабивных свай под нагрузкой и создающих неопределенность при расчете (таблица 1), согласно данным [5–7 и др.], показывает, что наиболее эффективными и «беспроблемными» при соблюдении технологии устройства являются сваи с оставляемой обсадной трубой и изготавливаемые напорным бетонированием через полый шнек.

С учетом вышеизложенного необходимо не только контролировать свойства исходных строительных материалов при входном контроле (бетонной смеси и арматурных каркасов) и выполнять операционный контроль при производстве работ, но и проводить проверку качества стволов готовых буронабивных свай прямыми и неразрушающими методами контроля.

Долгое время единственными методами контроля сплошности бетона готовых буронабивных свай были откопка их верхних частей и освидетельствование выбуриванием из ствола керна. Данные методы дороги, трудоемки и ограничены в применении, так как с их помощью можно проверить выборочное количество свай и выявить только нарушения целостности, которые попадают в их зону.

Таблица 1 – Факторы, негативно влияющие на работу свай под нагрузкой [5–7 и др.]

Фактор	Типы буронабивных свай, устраиваемые по технологиям							Характер влияния
	«насухо»	под защитой обсадных труб	под защитой раствора	CFA	CFA под защитой обсадной трубы	в раскатываемых скважинах	с оставляемой обсадной трубой	
Потеря устойчивости стенок скважины	A	B	A	B	B	B	B	Уменьшение параметров прочности грунта, снижение несущей способности сваи
Разрыхление (-), доуплотнение (+) грунта стенок скважины	A(-)	B(-)	B(-)	B(-), A(+)	B(-), A(+)	B(-), A(+)	B(-), A(+)	Снижение (-), увеличение (+) характеристик грунта
Накопление шлама на дне скважины	A	A	B	B	B	B	B	Увеличение осадки сваи для достижения предельного сопротивления грунта под нижним концом
Упругая разгрузка контура скважины	A	A	A	A	A	A	B	Увеличение сдвиговой осадки сваи
Упругая разгрузка по дну скважины	A	A	A	A	A	A	B	Увеличение осадки сваи для достижения предельного сопротивления грунта под нижним концом
Формирование глинизированного контактного слоя	B	B	A	B	B	B	B	Неопределенность с параметрами прочности грунта
Усадка бетона	A	A	A	A	A	A	B	То же, что и при упругой разгрузке
Нарушение сплошности ствола сваи (шейки, трещины наплывы)	A	B	A	B	B	B	B	Неопределенность с параметрами прочности грунта, снижение несущей способности сваи
Динамические воздействия на грунт	B	B	B	B	B	B	B	Дополнительные осадки и перемещения соседних конструкций
Недобуривание до проектной отметки	B	B	B	B	B	B	B	Неопределенность с сопротивлением грунта под нижним концом сваи
Коррозия стали	B	B	B	B	B	B	A	Снижение несущей способности материала

Примечание – В таблице приняты следующие обозначения:

«A» – фактор имеет высокое значение; «B» – фактор имеет низкое значение или маловероятен при соблюдении технологии; «B» – фактор невозможен

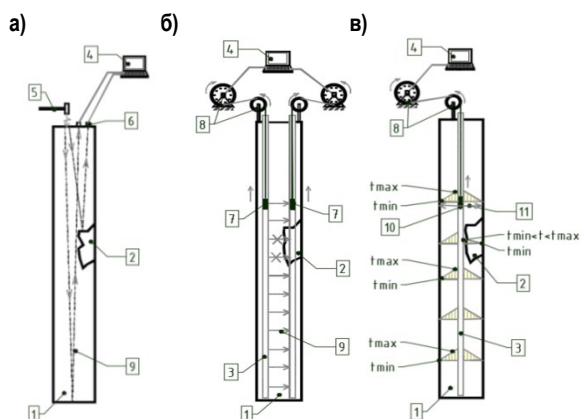
Метод контроля однородности стволлов свай отбором кернов был закреплен в следующих ТНПА бывшего СССР: СНиП 3.02.01-87, СНиП 3.03.01-87, СНиП 3.06.04-91. Однако в ТНПА Республики Беларусь данный метод отсутствует, как и отсутствуют основные неразрушающие методы контроля сплошности свай рассмотренные ниже (сейсмоакустический, ультразвуковой, термометрический), которые получили широкое распространение в мировой практике. В СНБ 2242-2011 лишь упоминается, что «до начала испытаний производится определение глубины заложения и целостности (сплошности) ствола опытных свай» [8]. Ни один из этих методов подробно не отражен и в ТНПА России, а лишь указан объем контрольных испытаний для отдельных методов. Упомянутые выше методы контроля сплошности свай подробно отражены в американских стандартах: ASTM D5882-2016, ASTM D6760-2016, ASTM D7949-2014 [9–11], на которые ориентируются производители оборудования и испытатели свай во всем мире. Во многих странах существуют свои национальные стандарты, положения которых схожи со стандартами ASTM, например, в Китае – JGJ 106-2014 [12].

Применению неразрушающих методов контроля сплошности буронабивных свай благоприятствуют следующие факторы:

- затрудненность или невозможность применения методов прямого контроля качества, их трудоемкость и высокая стоимость;
- контраст физико-механических свойств бетона и окружающих грунтов.

2. Основные методы контроля сплошности буронабивных свай

Работа по оценке целостности изготовленных буронабивных свай сейсмоакустическим, межскважинным ультразвуковым, термометрическим методами (односважинный ультразвуковой, параллельный сейсмический и другие методы не рассмотрены как менее применимые) состоит из тестирования свай на строительной площадке и интерпретации полученных результатов с помощью программного обеспечения при камеральной обработке в лабораторных условиях. Схемы проведения испытаний буронабивных свай на сплошность сейсмоакустическим, ультразвуковым, термометрическим методами представлены на рисунке 3.



- 1 – буронабивная свая; 2 – дефект в стволе сваи; 3 – диагностические трубки; 4 – регистрирующий блок прибора для сбора и обработки данных; 5 – ударный молоток (создание упругой волны); 6 – переставной приемник упругой волны; 7 – ультразвуковые преобразователи (передатчик и приемник); 8 – барабан с кабелем и направляющая катушка кабеля; 9 – направление волны прозвучивания; 10 – термозонд с инфракрасными датчиками; 11 – направление замера температуры инфракрасными датчиками

Рисунок 3 – Схемы проведения испытаний буронабивных свай сейсмоакустическим (а), ультразвуковым (б), термометрическим (в) методами

Сейсмоакустический метод (low strain stress method) контроля сплошности свай, как наиболее распространенный сегодня, был описан и применен на практике в 1960-х годах. Принцип действия сейсмоакустических средств основан на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых в контролируемых сваях с помощью ударного импульса, переданного на верхний конец сваи. После удара молотком по голове сваи продольная волна распространяется по стволу сваи и на границе раздела сред (бетон – инородное включе-

ние или грунт) звуковая волна отражается. Прохождение волны в стволе сваи улавливается ультразвуковым датчиком, закрепленным на ее оголовке, оцифровывается и анализируется акселерометром прибора (рисунок 4). После дополнительной автоматической обработки сигналов выводится рефлектограмма – график изменения скорости звуковой волны во времени или по длине сваи, которая сравнивается с наиболее характерными рефлектограммами (таблица 2 [13]). Их анализ позволяет определить длину сваи и установить наличие дефекта по длине ствола без определения его формы и занимаемого объема. «Если рефлектограмма на приборе соответствует типовой (за исключением последней), это означает, что мы можем объяснить значение того, что имеем. В последнем случае необходимо выбрать другое место на свае для повторного тестирования. Если все попытки оказались неудачными, значит, свая не была достаточно подготовлена для тестирования, или структура сваи просто не поддается звуковому тестированию, что может говорить о низком качестве изготовления сваи» [13].



а) «ИДС-1», «Интерприбор» (Россия);
б) «Pile Integrity Testing», «Sinorock» (Китай);
в) «Pile Echo Tester», «Piletest» (Израиль, Великобритания)
Рисунок 4 – Приборы сейсмоакустического метода контроля свай

Таблица 2 – Типовые рефлектограммы для «Pile Echo Tester» [13]

СВАЯ	ОПИСАНИЕ	РЕФЛЕКТОГРАММА
	Прямая свая, свободный конец длиной, как ожидалось	
	Прямая свая с закрепленным концом, длиной, как ожидалось	
	Прямая свая, свободный конец, короче, чем ожидалось	
	Повышенное сопротивление	
	Сниженное сопротивление	
	Локально увеличенное сопротивление	
	Локально уменьшенное сопротивление	
	Многочисленные отражения в середине длины – нет донного отражения	
	Нерегулярные профили – нерегулярные рефлектограммы	

Контроль сплошности сейсмоакустическим методом может быть реализован, если проведение его не было предусмотрено проектной документацией и не требует дополнительных затрат при устройстве свай по любой технологии. Метод имеет ряд ограничений и, как правило, не определяет:

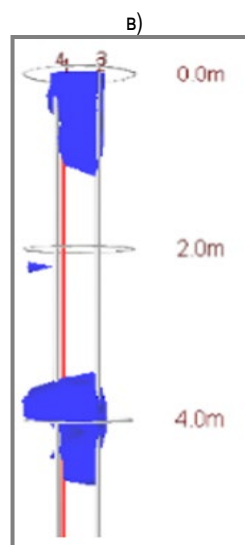
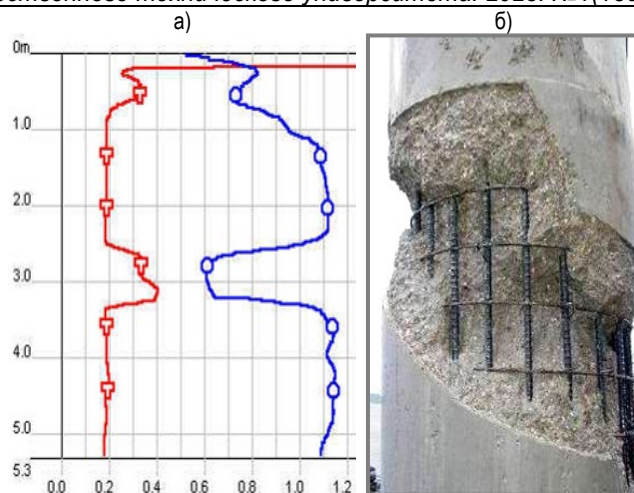
- отражение звуковой волны от нижнего конца сваи, когда соотношение длины сваи к диаметру (L/D) выходит свыше 20 (в очень плотных и прочных грунтах) и до 60 (для грунтов средней прочности и слабых);
- прогрессивные изменения формы сваи в поперечном сечении (проявляется при несоответствии выбранной технологии устройства сваи, ее параметров бурения грунтовым условиям площадки), образующиеся при устройстве свай по технологии непрерывного полуго шнека, струйной цементации, в буроинъекционных сваях;
- незначительные включения дефектов, занимающие до 20–25 % поперечного сечения сваи, и наличие дефектов в коротких сваях;
- особенности сплошности сваи, расположенные ниже трещины или крупного включения в стволе, которое занимает более 50 % поперечного сечения сваи;
- наличие шлама под нижним концом сваи, а также дефекты на концах свай;
- длину составных свай и отклонение длины сваи на $\pm 10\%$;
- отклонения от прямой линии и от вертикальной оси сваи;
- несущую способность сваи.

Межскважинный ультразвуковой метод (crosshole ultrasonic monitor – CHUM) был разработан в конце 1970-х годов. По этому методу в сваях заранее на всю их длину закладываются металлические трубки для прохождения в них ультразвукового преобразователя. Количество трубок зависит от диаметра сваи. В практике работ используют пьезоэлектрические и электрохимические преобразователи. Акустического контакта достигают путем заливки труб водой или незамерзающей жидкостью (при температуре ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Сущность метода состоит в контроле сплошности бетона, заключенного между трубками. Присутствие на пути волн каких-либо дефектов в бетоне уменьшает скорость прохождения ультразвукового импульса, его амплитуду и изменяет форму принимаемого сигнала. Большую роль в наиболее полном выявлении дефектов бетона играют расположение трубок по периметру сваи, их число, материал, из которого они изготовлены, а также характер установки их по длине сваи. При использовании приборов (рисунок 5) для межскважинного мониторинга свай могут быть обнаружены дефекты, занимающие более 15–20 % сечения сваи (рисунок 6).



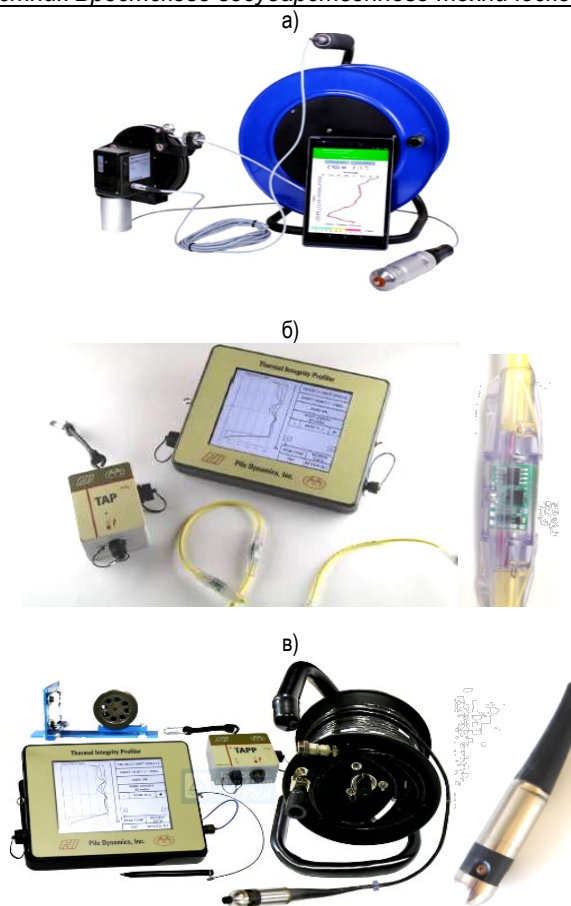
а) «ДБС-1», «Интерприбор» (Россия);
 б) «Ultra Sonic Pile Integrity Tester», «Sinoroock»(Китай);
 в) «Cross Hole Ultrasonic Monitor», «Piletest» (Израиль, Великобритания)

Рисунок 5 – Приборы для ультразвукового межскважинного мониторинга сплошности свай



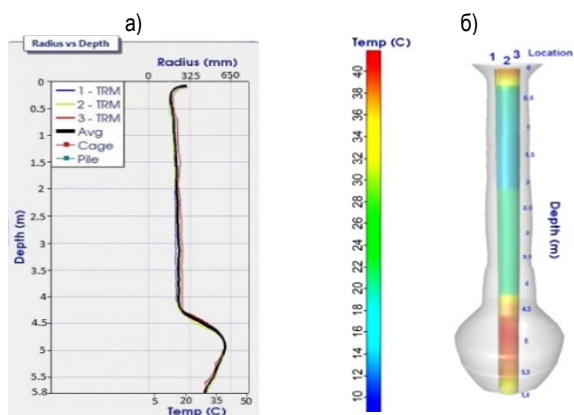
а) графики ультразвукового импульса между датчиками;
 б) общий вид дефекта ствола откопанной буронабивной сваи;
 в) 3D-модель дефектов буронабивной сваи
Рисунок 6 – Определение сплошности ствола буронабивной сваи в ОАО «Буровая компания «Дельта» прибором «Cross Hole Ultrasonic Monitor», «Piletest» (Израиль, Великобритания) [14]

Термометрический метод разработан в конце 1990-х годов в университете Южной Флориды, а в конце 2000-х годов компания «PDI» (США) представила первый аппаратный комплекс «Thermal Integrity Profiler» (TIP). Основной принцип термометрического метода контроля сплошности свай заключается в замере температуры бетона, повышающейся в результате экзотермических реакций при гидратации и твердении цемента и достигающей максимальных значений в $55\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 24–48 часов после бетонирования. Величина саморазогрева бетона зависит от состава бетонной смеси, диаметра устраиваемой сваи и ее однородности. Для контроля сплошности на всю длину сваи необходимо закладывать металлические трубки для перемещения в них термозонда с инфракрасными датчиками или располагать термодатчики по стержням арматурного каркаса. Количество трубок или стержней, задействованных для измерения, зависит от диаметра сваи. В программное обеспечение аппаратных комплексов (рисунок 7), реализующих данный метод, заложены эмпирические зависимости диаметра сваи от температуры бетона, вариантов добавок и времени измерения. Совокупность замеров по длине сваи формирует график зависимости температуры от диаметра сваи или защитного слоя арматуры. Измерения в полевых условиях в режиме реального времени позволяют увидеть предварительный график кривой температуры, характеризующий общую форму скважины (рисунок 8).



а) «Термоскан» с термозондом, «Интерприбор» (Россия);
 б) «Thermal Integrity Profiler» с термодатчиками, «PDI» (США);
 в) «Thermal Integrity Profiler» с термозондом, «PDI» (США)

Рисунок 7 – Приборы для определения сплошности ствола сваи по температурному профилю



а) профили буронабивной сваи по датчикам;
 б) 3D-модель буронабивной сваи;
 в) общий вид откопанной буронабивной сваи
Рисунок 8 – Определение профиля буронабивной сваи в ОАО «Буровая компания «Дельта»» прибором «Thermal Integrity Profiler» с термозондом, «PDI» (США) [15]

На основании изложенных материалов в таблице 3 представлены возможности основных методов неразрушающего контроля по выявлению дефектов в буронабивных сваях. Из таблицы 3 следует, что обеспечить полную проверку качества стволов может быть затруднительно даже при использовании комбинации методов неразрушающего контроля, однако данные методы помогут выявить сваи со значительными дефектами.

Таблица 3 – Возможности основных методов при анализе дефектов буронабивных свай

Метод неразрушающего контроля	Тип дефектов буронабивных свай ⁹⁾				
	Дефект верхнего конца (1)	Дефект нижнего конца (2)	Дефект ствола (3)	Дефект защитного слоя бетона (4)	Дефект армирования (5)
Сейсмоакустический (low strain stress method)	-	-	+1)	-	±4)
Ультразвуковой (crosshole ultrasonic monitor – CHUM)		+2)		-	-
Термометрический (method for thermal integrity profiling – TIP)		+3)		+3)	-

Примечание – В таблице приняты следующие обозначения:
 «+» – обнаружение дефекта возможно; «-» – обнаружение дефекта невозможно.

1) Обнаружение дефекта производится по длине ствола без определения его типа и занимаемого объема.

2) Обнаружение дефекта возможно в пределах установленных труб для тестирования.

3) Обнаружение дефекта возможно с учетом установленных труб для тестирования или термодатчиков на каркасе.

4) Возможно определение длины продольного стержня каркаса, после выполнения дополнительных исследований.

5) Дефекты контакта сваи и окружающего грунта не определяются рассматриваемыми методами.

Заключение

Для обеспечения качественного выполнения свай необходим контроль на всех этапах как в процессе их устройства, так и по завершении, что гарантирует надежность эксплуатации зданий и сооружений. В отличие от свай заводского изготовления сваи, изготавливаемые в грунте, требуют особого внимания к качеству производства работ и требуют знаний особенностей технологий их выполнения в данных грунтовых условиях строительной площадки. Трудоемкость и невозможность применения традиционных методов контроля качества буронабивных свай могут быть компенсированы применением неразрушающих методов контроля их сплошности. Использование основных неразрушающих методов контроля (сейсмоакустического, ультразвукового, термометрического) должно быть закреплено в практике проектирования и строительства Республики Беларусь, а также внесено в разрабатываемые национальные ТНПА. В них следует отразить возможности и ограничения методов, рекомендуемый объем контроля (должен учитывать уровень ответственности сооружения, величины нагрузок на фундаменты, тип свайного фундамента, количество и размеры свай в ростверке, а также прочие конструктивные особенности), требования к оборудованию и квалификации исполнителя, требования к программе производства работ и составлению отчета и другие факторы.

Список цитированных источников

1. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность : ТР 2009 / 013 / ВУ. – Минск : Госстандарт, 2015. – 25 с.
2. Строительство. Устройство свайных фундаментов. Контроль качества работ : СТБ 1164.3-2009. – Минск : Госстандарт, 2010. – 12 с.
3. Jones, W.C. Experiences with Cross-hole Sonic Logging and Concrete Coring for Verification of Drilled Shaft Integrity / W. C. Jones, Y. Wu // Proceedings GEO Construction Quality Assurance, Dalas, 12–16 Nov. 2005 / Quality Control Technical Conference. – Dallas-Ft., Worth TX, 2005. – P. 376–387.
4. Camp, B. Crosshole Sonic Logging of South Carolina Drilled Shafts: A Ten Year Summary / B. Camp // Presentation to ADSC Expo 2012, San Antonio, 20 March 2012. – 18 p.

5. O'Neill, M. W. Drilled Shafts. Construction procedures and design methods : technical report (final) : FHWA IF-99-025 / M. W. O'Neill, L. C. Reese. – Irvine, CA, 1999. – 758 p.
6. Geotechnical engineering circular № 8. Design and construction of continuous flight auger (CFA) Piles : technical report (final) : FHWA HIF-07-03 / D. A. Brown [et al.]. – Columbia, Maryland, 2007. – 293 p.
7. Богов, В. С. Проблемы устройства свайных оснований в городской застройке в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга / В. С. Богов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2008. – № 8. – С. 119–128.
8. Грунты. Методы полевых испытаний сваями : СТБ 2242-2011. – Минск : Госстандарт, 2012. – 37 с.
9. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations : ASTM D5882-16. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. – 6 p.
10. Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing : ASTM D6760-16. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. – 8 p.
11. Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations : ASTM D7949-14. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014. – 7 p.
12. Technical code for testing of building foundation piles : JGJ 106-2014. – Beijing: Ministry of Construction of China, 2014. – 71 p.
13. Руководство пользователя Pile Echo Tester (Эхо-тестер свай). – М. : PileTest, 2012. – 33 с.
14. Контроль сплошности буронабивных свай методом ЧУМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bkdelta.ru/kontrol-sploshnosti-buronabivnyh-svaj-chum/>. – Дата доступа: 30.11.2022.
15. Замер уширения свай термометрическим методом ТИР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bkdelta.ru/zamer-ushireniya-svaj-termometricheskij-metodom-tip/>. – Дата доступа: 30.11.2022.
5. O'Neill, M. W. Drilled Shafts. Construction procedures and design methods : technical report (final): FHWA IF-99-025 / M. W. O'Neill, L. C. Reese. – Irvine, CA, 1999. – 758 p.
6. Geotechnical engineering circular № 8. Design and construction of continuous flight auger (CFA) Piles: technical report (final): FHWA HIF-07-03 / D. A. Brown [et al.]. – Columbia, Maryland, 2007. – 293 p.
7. Bogov, V. S. Problemy ustrojstva svajnyh osnovanij v gorodskoj zastrojke v usloviyah slabyh gruntov Sankt-Peterburga / V. S. Bogov // Rekonstrukciya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo. – 2008. – № 8. – С. 119–128.
8. Grunty. Metody polevyh ispytaniy svayami: STB 2242-2011. – Minsk : Gosstandart, 2012. – 37 s.
9. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations: ASTM D5882-16. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. – 6 p.
10. Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing : ASTM D6760-16. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. – 8 p.
11. Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations: ASTM D7949-14. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014. – 7 p.
12. Technical code for testing of building foundation piles. JGJ 106-2014. – Beijing: Ministry of Construction of China, 2014. – 71 p.
13. Rukovodstvo pol'zovatelya Pile Echo Tester (Ekho-tester svaj). – M. : PileTest, 2012. – 33 s.
14. Kontrol' sploshnosti buronabivnyh svaj metodom CHUM [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://bkdelta.ru/kontrol-sploshnosti-buronabivnyh-svaj-chum/>. – Data dostupa: 30.11.2022.
15. Zamer ushireniya svaj termometricheskij metodom TIP [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://bkdelta.ru/zamer-ushireniya-svaj-termometricheskij-metodom-tip/>. – Data dostupa: 30.11.2022.

Материал поступил 12.01.2023, одобрен 10.02.2023, принят к публикации 10.02.2023

References

1. Zdaniya i sooruzheniya, stroitel'nye materialy i izdeliya. Bezopasnost': TP 2009 / 013 / BY. – Minsk : Gosstandart, 2015. – 25 s.
2. Stroitel'stvo. Ustrojstvo svajnyh fundamentov. Kontrol' kachestva rabot: STB 1164.3-2009. – Minsk : Gosstandart, 2010. – 12 s.
3. Jones, W. C. Experiences with Cross-hole Sonic Logging and Concrete Coring for Verification of Drilled Shaft Integrity / W. C. Jones, Y. Wu // Proceedings GEO Construction Quality Assurance, Dallas, 12–16 Nov. 2005./ Quality Control Technical Conference. – Dallas-Ft., Worth TX, 2005. – P. 376–387.
4. Camp, B. Crosshole Sonic Logging of South Carolina Drilled Shafts: A Ten Year Summary / B. Camp // Presentation to ADSC Expo 2012, San Antonio, 20 March 2012. – 18 p.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОСНОВАНИИ ШТАМПОВ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ НА ГРУНТ РАВНОМЕРНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

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

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

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ppsbrest@mail.ru

²К. т. н., доцент кафедры строительных конструкций, проректор по научной работе

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

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

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: t_shalobyta@mail.ru

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.

STRESS-STRAIN STATE IN THE BASE OF DAMPS WHEN TRANSFER TO THE GROUND OF A UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD OF DIFFERENT INTENSITY

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

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

Уплотнение насыпных, рыхлых песчаных грунтов, глинистых отложений, в том числе и просадочных, тяжелыми трамбовками является одним из наиболее экономичных и распространенных методов подготовки оснований зданий и сооружений [1...4].

Важнейшим показателем эффективности уплотнения является размер зоны, в пределах которой плотность сухого грунта ρ_d изменяется от максимальной до величины, превышающей на 0,02...0,03 T/M^3 природную плотность [1]. В каждом конкретном случае размеры зоны уплотнения будут различны. В одних случаях требуется выполнить уплотнение на максимально возможную глубину, в других – экономически целесообразно получить её максимальную ширину. Изменяя форму контактной поверхности, можно регулировать эти параметры.

Следует отметить, что вопросам влияния формы подошвы фундамента на его совместную работу с грунтом основания посвящено много работ [5, 9, 11, 12 и др.] и во всех случаях авторами доказана целесообразность их применения с точки зрения надёжности и экономичности.

В частности, изучение взаимодействия монолитного железобетонного опорного кольца объединенного тонкостенной оболочкой, вогнутой по отношению к грунту с основанием естественного сложения, выполнены Я. А. Пронозиним и Р. В. Мельниковым [10]. По результатам проведенных полевых испытаний установлено, что фундамент в виде выпуклой вверх пологой оболочки, нагруженный периметрально, имеет ряд преимуществ в сравнении с жесткими плоскими фундаментом как по несущей способности, так и по деформациям. М. С. Грицук [12] утверждает, что плиты с выпуклой криволинейной или пирамидальной контактной поверхностью являются более экономичными в сравнении с плоской подошвой. Учитывая это, можно предположить, что контактная поверхность трамбовки также влияет на напряженно-деформированное состояние уплотняемого грунта, а следовательно, на размеры зоны уплотнения.

Принимая во внимание вышесказанное, нами в результате проведенных теоретических исследований были выявлены параметры, влияющие на деформируемость уплотненных оснований, установлены особенности напряженно-деформированного состояния грунтового массива, отличающегося распределением напряжений и деформаций под выпуклой, плоской и вогнутой контактными поверхностями трамбовки.

Методика и результаты исследований

Влияние формы контактной поверхности трамбовки на распределение вертикальных и горизонтальных напряжений показано в работах [5, 6]. Однако не менее важное значение имеет оценка деформирования уплотняемого массива. Определение деформаций мы выполнили по формулам, полученным после преобразования обобщенного уравнения Генки [7].

Взятая за основу система физических уравнений Генки позволяет учитывать как линейное, так и нелинейное поведение грунтов, описывая общие деформации как сумму сдвиговых и объемных деформаций. Помимо вертикальных деформаций рассматриваемая модель позволяет определять и горизонтальные деформации

$$e_z = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2 \cdot G_0} + \frac{\sigma_m}{k_0};$$

$$e_x = \frac{\sigma_x - \sigma_m}{2 \cdot G_0} + \frac{\sigma_m}{k_0},$$

где σ_z , σ_x – соответственно вертикальные и горизонтальные напряжения в заданной точке;

σ_m – среднее напряжение, определяемое по формулам:

– для случая плоской задачи

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_z + \sigma_y) \cdot (1 + \mu)}{3};$$

– для случая пространственной задачи

$$\sigma_m = \frac{\sigma_z + \sigma_x + \sigma_y}{3};$$

$G_0 = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \mu_0)}$ – модуль сдвиговой деформации;

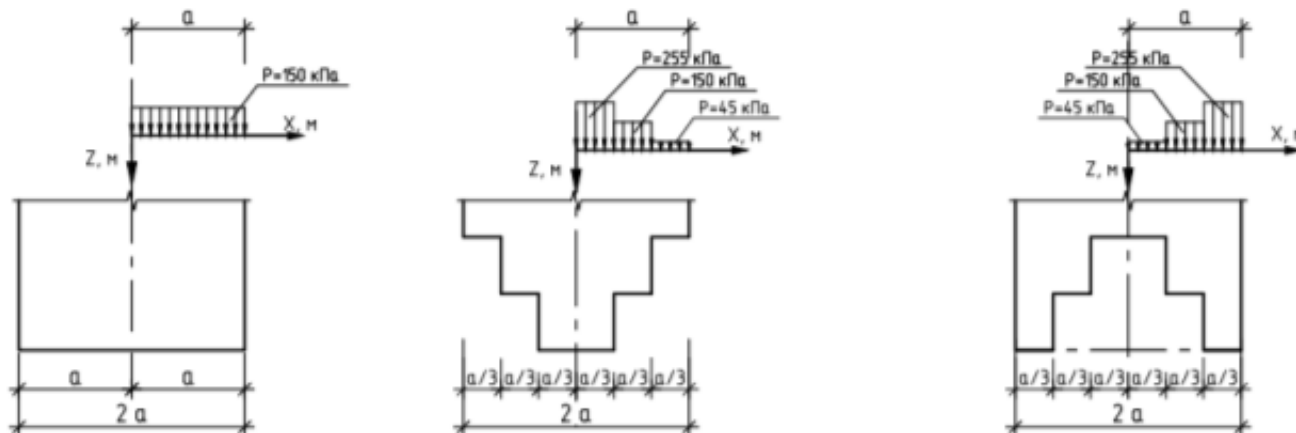
$k_0 = \frac{E_0}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu_0)}$ – модуль объемной деформации;

E_0 – модуль деформаций;

μ – коэффициент Пуассона.

Решение, базирующееся на основе системы уравнений Генки [7], позволяет прогнозировать осадку как в пределах условия $p < R$, так и при $p > R$, в которых p – давление по подошве фундамента от действующей нагрузки; R – расчётное сопротивление грунта основания.

С целью выявления особенностей деформирования массива грунта были выбраны трамбовки с различной формой контактной поверхности (рисунок 1).



а) – плоская, б) – выпуклая, в) – вогнутая
Рисунок 1 – Варианты контактной поверхности трамбовки и схемы нагружения статической нагрузкой

Суммарная нагрузка на трамбовки при рассмотренных схемах нагружения принималась одинаковой. Учитывая сложность оценки параметров взаимодействия системы «основание-фундамент» при динамических нагрузках, расчёты выполнены при статическом нагружении основания. Такой подход основан на результатах исследования реактивного сопротивления грунта в основании круглого штампа при действии кратковременных динамических нагрузок, показавших, что распределение напряжений по контактной поверхности плиты при статическом нагружении согласуется с данными динамических испытаний [8]. В расчетах рассмотрено однородное основание при отсутствии подземных вод.

Величины деформаций определяли в узловых точках расчётной сетки. Для этого область грунта под подошвой трамбовки 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. В качестве эталонной задачи рассматривалась схема с равномерно распределенным давлением по плоской подошве контактной поверхности.

При оценке влияния принятых вариантов контактной поверхности трамбовки на глубину активной толщи наблюдается некоторое различие в ее величине, определенной по методике, изложенной в [10]. В частности, оно не превышает 8,5 %. Однако при столь незначительном расхождении результатов определения мощности сжимаемой толщи, расчёты деформаций слоев грунта показывают на существенные изменения вертикальных и горизонтальных напряжений, особенно в верхней ее зоне (рисунки 2 и 3). Характер изменения деформации e_z по схемам (а) и (б) одинаков в точках, расположенных на оси симметрии нагрузки ($x = 0$), общие деформации ближе к поверхности максимальны в случае нагружения основания по схеме (б) (рисунок 1). При этом имеются различия, составляющие для глубин: 0,25 м – 1,42 раза; 0,5 м – 1,24 раза; а ниже 2 м – деформации практически совпадают.

Для схемы нагружения (в) характер развития общих деформаций резко отличается от рассмотренных выше. Непосредственно у контактной поверхности деформаций e_z меньше в 2,2 раза, чем для плоской подошвы трамбовки и в 3.5 раза – для выпуклой поверхности. Вместе с тем с ростом глубины, деформации e_z увеличиваются для варианта (в) контактной поверхности. На глубине 1,0 м эти деформации максимальны, а затем до глубины 2,0 м они уменьшаются. Ниже 2,0 м вид контактной поверхности в аспекте рассмотренных схем не имеет значения. Деформации e_z при любой схеме практически равны. Очевидно, что общие деформации зависят от объемных и сдвиговых, причем последние в значительной степени зависят от вариантов контактной поверхности.

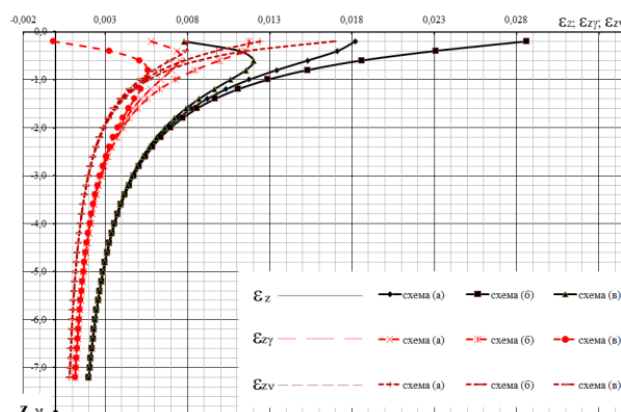


Рисунок 2 – Графики развития общих (e_z), сдвиговых ($e_{z\gamma}$) и объемных ($e_{z\nu}$) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения при $X = 0$ м

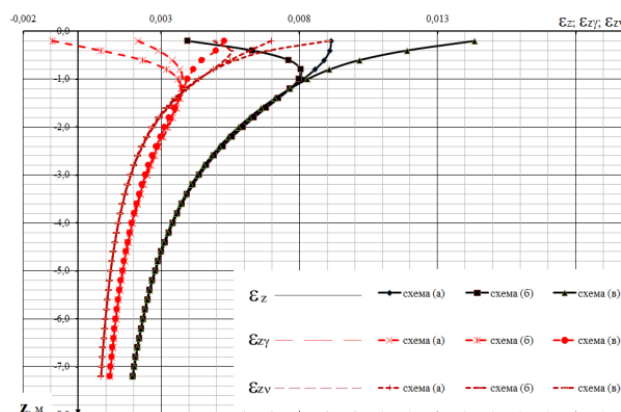


Рисунок 3 – Графики развития общих (e_z), сдвиговых ($e_{z\gamma}$) и объемных ($e_{z\nu}$) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения при $X = a$, м

Изменение деформаций $e_{z\gamma}$ для вариантов контактной поверхности (а) и (в) примерно одинаковы, но для варианта (в) их различие по глубине более существенно. Непосредственно у контактной поверхности деформации $e_{z\gamma}$ имеют отрицательные значения. Это означает, что движение частиц при нагружении основания возможно в различных и даже противоположных направлениях. И основной влияющий здесь параметр – это форма контактной поверхности. Выравнивание сдвиговых деформаций при различных вариантах контактной поверхности происходит на глубине 2,0 м. Величина изменения

объёмных деформаций примерно одинакова, при этом деформации e_{zV} , при схеме нагружения (а), занимают среднее положение в сравнении со схемами (б) – эпюра справа от графика $e_{zV} = f(h)$, схема (а) и эпюра слева – схема (в). Выравнивание деформаций e_{zV} происходит на глубине 1,5 м, далее сдвиговые и объёмные деформации для разных вариантов контактной поверхности трамбовки и схем нагружения асимптотически уменьшаются с глубиной, при этом $e_{zV} > e_{zV}$.

В точках по вертикали, проходящей по грани контактной поверхности ($X = a$), изменение деформаций e_z по глубине имеет другой характер. В целом деформации e_z непосредственно по контактной поверхности максимальны для вариантов (а) и (в). Различие вертикальных деформаций составляет 1.6 раза. Для схем (б) и (в) меняется их положение относительно эпюры эталонной схемы (а). В данном случае эпюра e_z расположены: слева (схема б) и справа от эталонной – схема (а). Таким образом, очевидно резкое увеличение деформаций e_z в схеме (в) по сравнению с предыдущими случаем при схеме (а) – в 1,75 раза на уровне контактной поверхности и уменьшение в 7.1 раза при передаче нагрузки по схеме (б). Выравнивание деформаций при различных схемах нагружения происходит на глубине 1,0 м. Таким образом, при удалении от оси симметрии характер изменения вертикальных деформаций для схем нагружения (б) и (в) меняется на противоположное. Для обоих схем очевидно и значительное изменение величины деформаций e_z на глубинах от 1.0 до 2.0 м от уровня контактной поверхности: для схемы (б) – уменьшение более чем в 7.0 раз, а для схемы (в) – увеличение в 1.75 раза. Глубина, на которой происходит выравнивание деформаций, уменьшается в 2.0 раза. В сравнении с эталоном, сдвиговые и объёмные деформации при нагружении основания по схеме (б) стали меньше, а по схеме (в) наоборот – стали больше. Именно этот факт свидетельствует, что по схеме (в) мы получаем более развитую зону уплотнения грунта на стороны.

Изменение горизонтальных деформаций при различных схемах нагружения показаны на рисунка 4, 5, 6. Общие деформации e_x при $X = 0$ практически идентичны по всей глубине для различных схем нагружения.

При незначительном различии величины деформаций для всех схем нагружения до глубин 2.0 м от контактной поверхности, ниже они практически одинаковы в пределах активных зон.

Сдвиговые деформации e_{xy} для всех схем нагружения полностью меняют свое направление на противоположное в пределах сжимаемой толщи, за исключением участка глубиной 0.25 м, где эпюра e_{xy} (схема (в)) является положительной (рисунок 4). На глубине 1.8 м от контактной поверхности значение e_{xy} для всех схем нагружения практически одинаковы и сохраняют тенденцию к уменьшению с возрастанием глубины.

Объёмные деформаций e_{xV} по всей глубине активной зоны изменяются идентично, за исключением участка от контактной поверхности до глубины 1.8 м ниже. На этом участке e_{xV} для схемы (б) – максимальные, а для схемы (в) (рисунок 4) – минимальные.

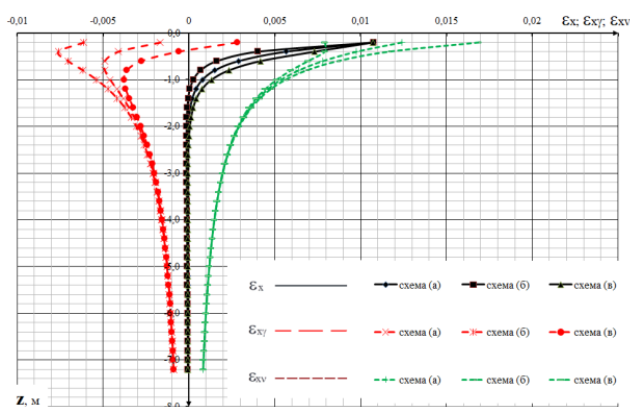


Рисунок 4 – Графики развития общих (e_x), сдвиговых (e_{xy}) и объёмных (e_{xV}) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения при $X = 0$ м

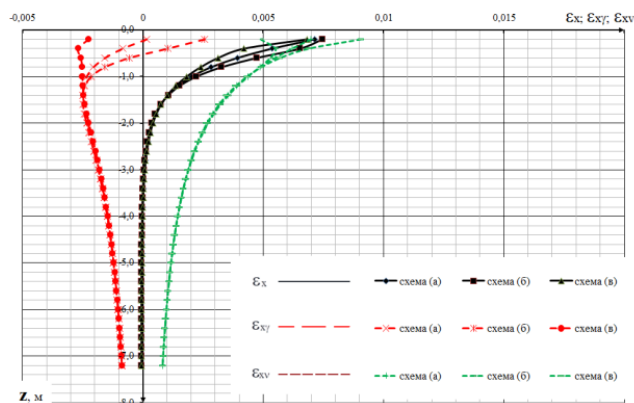


Рисунок 5 – Графики развития общих (e_x), сдвиговых (e_{xy}) и объёмных (e_{xV}) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения при $X = a$, м

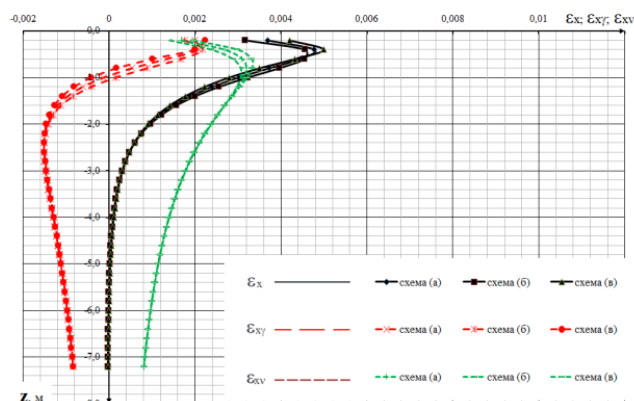


Рисунок 6 – Графики развития общих (e_x), сдвиговых (e_{xy}) и объёмных (e_{xV}) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения для $X = 1.33$ а, м

При оценке деформируемости грунтового массива по оси, проходящей через край контактной поверхности (рисунок 5), установлено, что общие горизонтальные деформации меньше при $X = 0$ в среднем в 1.38 раза. Однако их затухание с глубиной происходит медленнее. Деформации e_x практически равны нулю на глубине 3.0 м, что в 1.5 раза больше, чем при $X = 0$ м. Изменилось также распределение сдвиговых деформаций. Практически по всей глубине грунтовой толщи деформации e_{xy} имеют отрицательное значение, кроме варианта контактной поверхности по схеме (а), где у поверхности деформации e_{xy} положительны. Сдвиговые деформации, определенные по схемам (б) и (в), практически одинаковы на глубине 2.0 м. Но до этой глубины сдвиговые деформации e_{xy} , полученные при загрузке по схеме (в) имеют большие отрицательные значения, чем при схеме нагружения (б). Этот факт свидетельствует о том, что при загрузке основания по схеме (в), грунт обжат в большей мере, чем при других схемах. Объёмные деформации до глубины 1,0 м имеют большие значения при загрузке массива по схеме (в), меньшие – при схеме (б), при этом у поверхности данное различие достигает 1,3 раза.

Для всех видов деформаций установлено, что при удалении от оси симметрии нагрузки их характер и величина изменяется в незначительной степени (рисунок 6). Горизонтальные деформации e_x при всех схемах нагружения имеют одинаковую тенденцию изменения с увеличением глубины. От контактной поверхности до глубины 0.5 м они увеличиваются, а затем уменьшаются и почти равны нулю на глубине 4.5 м. Сдвиговые деформации e_{xy} от контактной поверхности примерно до глубины 1.0 м положительны, а далее во всем диапазоне рассмотренных глубин имеют отрицательное значение, уменьшаясь с глубиной. Глубина 0.5...0.6 м от контактной поверхности является переломной также и для деформаций e_{xV} при всех схемах нагружения. До данной глубины объёмные деформации возрастают, а ниже этой отметки – уменьшаются, при этом после глубины 1.2 м они практически одинаковы.

Заключение

Выполненный анализ развития вертикальных и горизонтальных деформаций при различных схемах нагружения показал, что зона деформирования грунта при равной суммарной вертикальной нагрузке зависит от формы контактной поверхности. Максимальная ширина зоны уплотнения грунта может быть достигнута при передаче нагрузки на основание по схеме (в), а максимальная ее глубина – при передаче нагрузки по схеме (б). Таким образом, предположение о влиянии формы контактной поверхности на формирование зоны уплотнения грунта, высказанное в работе [6], подтверждается характером и величиной развития вертикальных и горизонтальных деформаций и их составляющих.

Форма контактной поверхности оказывает существенное влияние на размеры зоны уплотнения грунта. Меняя форму контактной поверхности трамбовки, можно повысить эффективность работ по устройству искусственных оснований.

Список цитированных источников

1. Зарецкий, Ю. К. Глубинное уплотнение грунтов ударными нагрузками / Ю. К. Зарецкий, М. Ю. Гарицелов. – Ц. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
2. Уплотнение просадочных грунтов сверхтяжелой трамбовкой на строительстве больничного комплекса / И. Г. Рабинович [и др.] // Основание, фундаменты и механика грунтов. – 1991. – № 1. – С. 2–4.
3. Пойта, П. С. Строительные свойства искусственных оснований / П. С. Пойта. – Брест : БрГТУ, 2004. – 174 с.
4. 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.
5. Прозозин, Я. А. Теоритические обоснования повышения жесткости грунтового основания, нагруженного по выпуклой вверх криволинейной поверхности / Я. А. Прозозин, Ю. В. Наумкина, Д. В. Рачков // Геотехника. International journal geotechnics. – 2015. – № 2. – С. 4–9.
6. Влияние формы контактной поверхности трамбовки на напряженно-деформированное состояние уплотняемого грунта / П. С. Пойта [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 2. – С. 41–46.
7. Hencky H. Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen / H. Hencky. – Zamm. – 1924. – Vol. 4, Is. 4. – p. 323–334.
8. Рыков, Г. В. Экспериментальные исследования реактивного сопротивления грунта в основании круглого штампа при кратковременных динамических нагрузках / Г. В. Рыков, В. П. Кузнецов // Основание, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – № 3. – С. 10–12.
9. Степанов, М. А. Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно спрессованным грунтовым основанием : дис.... канд. техн. наук : 05.23.02 / Степанов М. А. – Тюмень, 2015. – 189 с.
10. Прозозин, Я. А. Расчёт взаимодействия асимметричных фундаментов-оболочек с глинистым основанием / Я. А. Прозозин, Р. В. Мельников // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 577–584.
11. Тетиор, А. Н. Об устойчивости основания под фундаментами с криволинейной формой подошвы / А. Н. Тетиор // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1969. – № 5. – С. 14–17.
12. Грицук, М. С. Рациональные конструкции плитных фундаментов / М. С. Грицук. – Брест : Брестский политехнический институт, 1997. – 218 с.

References

1. Zareckij, Yu. K. Glubinnoe uplotnenie gruntov udarnymi nagruzkami / Yu. K. Zareckij, M. YU. Garicelov. – C. : Energo-atomizdat, 1989. – 192 s.
2. Uplotnenie prosadochnyh gruntov sverhtyazhelej trambovkoj na stroitel'stve bol'nichnogo kompleksa / I. G. Rabinovich [i dr.] // Osnovanie, fundamentey i mekhanika gruntov. – 1991. – № 1. – S. 2–4.
3. Pojta, P. S. Stroitel'nye svojstva iskusstvennyh osnovanij / P. S. Pojta. – Brest : BrGTU, 2004. – 174 s.
4. Klebanyuk, D. N. Osobennosti metodiki vybora tekhnologicheskih 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.
5. Pronozin, Ya. A. Teoriticheskie obosnovaniya povysheniya zhestkosti gruntovogo osnovaniya, nagruzhennogo po vypukloj vverh krivolinejnoj poverhnosti / Ya. A. Pronozin, Yu. V. Naumkina, D. V. Rachkov // Geotekhnika. International journal geotechnics. – 2015. – № 2. – S. 4–9.
6. Vliyanie formy kontaktnoj poverhnosti trambovki na naprya-zhenno-deformirovannoe sostoyanie uplotnyaemogo grunta / P. S. Pojta [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 2. – S. 41–46.
7. Hencky H. Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen / H. Hencky. – Zamm. – 1924. – Vol. 4, Is. 4. – P. 323–334.
8. Rykov, G. V. Eksperimental'nye issledovaniya reaktivnogo soprotivleniya grunta v osnovanii kruglogo shtampa pri kratkovremennyh dinamicheskikh nagruzkah / G. V. Rykov, V. P. Kuznecov // Osnovanie, fundamentey i mekhanika gruntov. – 1990. – № 3. – S. 10–12.
9. Stepanov, M. A. Vzaimodejstvie kombinirovannyh lentochnyh svajnyh fundamentov s predvaritel'no spressovannym gruntovym osnovaniem : dis.... kand. tekhn. nauk : 05.23.02 / Stepanov M. A. – Tyumen', 2015. – 189 s.
10. Pronozin, Ya. A. Raschyot vzaimodejstviya asimetrichnyh fundamentov-obolochek s glinistym osnovaniem / Ya. A. Pronozin, R. V. Mel'nikov // Vestnik MGSU. – 2011. – № 7. – S. 577–584.
11. Tetior, A. N. Ob ustojchivosti osnovaniya pod fundamentami s krivolinejnoj formoj podoshvy / A. N. Tetior // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1969. – № 5. – S. 14–17.
12. Gričuk, M. S. Racional'nye konstrukcii plitnyh fundamentov / M. S. Gričuk. – Brest : Brestskij politekhnicheskij institut, 1997. – 218 s.

Материал поступил 19.01.2023, одобрен 26.01.2023, принят к публикации 06.02.2023

ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В СТЕНАХ МАЛОЭТАЖНЫХ КАМЕННЫХ ЗДАНИЙ ИЗ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

Д. В. Пугач¹, В. Н. Деркач²

¹ Магистрант кафедры технологии строительного производства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: pugach.ntc@gmail.com

² Д. т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет», директор филиала РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.by

Реферат

В статье приведены результаты анализа причин образования трещин в стенах современных малоэтажных каменных зданий, возводимых с применением каменной кладки из силикатного кирпича. Показана морфология трещинообразования в стенах и перегородках, в зависимости от их конструктивных особенностей, наличия дверных и оконных проемов. Установлено, что основной причиной образования трещин в несущих и самонесущих стенах являются растягивающие напряжения в каменной кладке, вызванные стеснением ее усадочными деформациями. Повреждения трещинами перегородок обусловлены усадочными деформациями кладки и прогибами плит перекрытий, являющимися опорами перегородок. Характер трещинообразования перегородок зависит от отношения их размеров, наличия и места расположения дверных проемов, способа сопряжения перегородок с плитами перекрытий. На трещиностойкость стен и перегородок существенное влияние оказывает качество выполнения кладочных и отделочных работ, уход за кладкой в процессе ее возведения.

Ключевые слова: каменная кладка, трещины, силикатный кирпич, усадка, прогибы перекрытий.

REASONS FOR THE FORMATION OF CRACKS IN THE WALLS OF LOW-RISE STONE BUILDINGS MADE OF SILICATE BRICKS

D. V. Pugach, V. N. Derkach

Abstract

The article presents the results of the analysis of the reasons for the formation of cracks in the walls of modern low-rise stone buildings erected using silicate brick masonry. The morphology of cracking in walls and partitions is shown, depending on their design features, the presence of door and window openings. It has been established that the main reason for the formation of cracks in load-bearing and self-supporting walls is tensile stresses in the masonry, caused by the constraint of its shrinkage deformations. Damage to partitions by cracks is caused by shrinkage deformations of the masonry and deflections of the floor slabs, which are the supports of the partitions. The nature of cracking of partitions depends on the ratio of their sizes, the presence and location of doorways, the method of pairing partitions with floor slabs. The crack resistance of walls and partitions is significantly affected by the quality of masonry and finishing work, masonry maintenance during its construction.

Keywords: masonry, cracks, silicate brick, shrinkage, floor slab deflections.

Введение

В настоящее время в практике строительства широкое распространение получили малоэтажные здания высотой 1–3 этажа (ясли-сады-начальные школы, общеобразовательные школы, жилые здания), в которых стены и перегородки возводят с применением каменной кладки из силикатного кирпича. Нормативный срок строительства указанных зданий составляет 11–18 месяцев, вследствие чего наибольшая часть деформаций стенового ограждения, вызванных температурно-влажностными воздействиями и реологическими процессами в бетоне несущих конструкций перекрытий, реализуется в эксплуатационный период. Это приводит к тому, что через 2–3 года после ввода строительных объектов в эксплуатацию в стеновом ограждении возникают трещины.

Наличие трещин снижает конструктивную надежность здания, его эксплуатационные качества, а значительные трещины в несущих стенах создают угрозу потери несущей способности конструкций. Поэтому наблюдение за трещинами, выявление причин их возникновения и динамики развития является ответственным этапом при обследовании каменных конструкций.

Изучение морфологии трещин и характера их развития во времени позволяют установить причины повреждений, назначить эффективные и экономичные методы ремонта и усиления конструкций, а если выявленные повреждения являются системными – внести коррективы в нормативно-техническую документацию.

В настоящей статье приведен анализ характерных повреждений трещинами стенового ограждения из силикатного кирпича на примере здания УПК «Ясли-сад – начальная школа №11 г. Бреста».

Краткая характеристика здания

Здание яслей-сада – двухэтажное, сложное в плане формы с техническим подпольем. Габаритные размеры здания 65,83×84,79 м, высота 1-го и 2-го этажей до низа плит перекрытия 3,0 м, технического подполья – 2,4 м. Внутренние несущие и самонесущие стены выпол-

нены из силикатного пустотелого утолщенного кирпича. Кладка участков стен с вентиляционными каналами возводилась из полнотелого силикатного кирпича. В помещениях с мокрым режимом (бассейн, душевые) применен утолщенный полнотелый керамический кирпич. Толщина несущих кирпичных стен составляет 380 мм.

Наружные стены трехслойные с внутренним утеплением из минераловатных плит и облицовкой из силикатного лицевого утолщенного кирпича. Толщина облицовочного слоя стены – 120 мм, утеплителя – 140 мм. Между наружной кирпичной облицовкой и внутренним утеплением предусмотрена воздушная прослойка толщиной 40 мм. Кладка внутреннего слоя стены толщиной 380 мм выполнена из силикатного пустотелого утолщенного кирпича. Крепление облицовочного слоя к внутреннему слою стены осуществлено при помощи стеклопластиковых связей. Общая толщина наружных стен составляет 680 мм. облицовочный слой наружных стен через 3–6 м разрезан вертикальными деформационными швами.

Перегородки толщиной 120 мм возведены из пустотелого утолщенного силикатного кирпича. Для кладки стен и перегородок использован цементно-песчаный раствор прочностью на сжатие 5 МПа.

Поверхности кирпичных стен внутри здания оштукатурены цементно-песчаным раствором с последующей покраской. Толщина штукатурных слоев варьируется в пределах 15...30 мм. В помещениях с мокрым режимом поверхности кирпичных стен дополнительно облицованы керамической плиткой. В коридорах здания по стенам выполнена декоративная мозаичная штукатурка.

Настил перекрытий и покрытия здания смонтирован из сборных железобетонных многопустотных плит пролетом 6–7,2 м.

Наружные и внутренние стены технического подполья здания выполнены из сборных бетонных фундаментных блоков (ФБС) толщиной 400 и 500 мм. Бетонные стены технического подполья являются ленточными фундаментами стен, установленными на свайном основании. Строительство надземной части здания начато в апреле 2018 г., в эксплуатацию здание введено 31.08.2019 г.

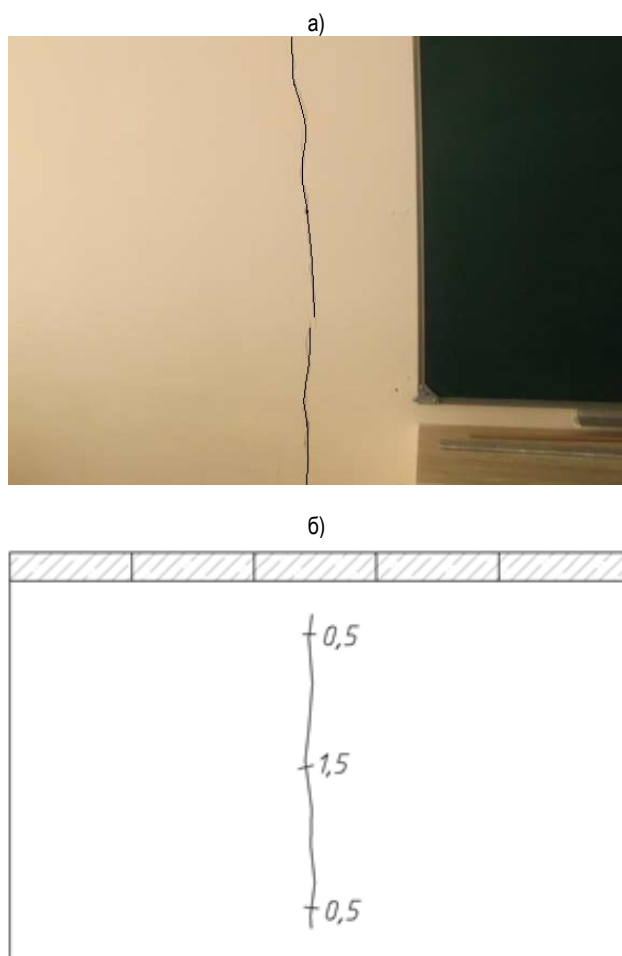
Морфология трещин и причины их образования

Через три года после ввода здания в эксплуатацию во внутренних стенах и перегородках, а также внутреннем слое наружных стен 1-го и 2-го этажей были выявлены многочисленные трещины шириной раскрытия до 2 мм. При этом в стенах технического подполья и в облицовочном слое наружных стен трещины отсутствовали. Мониторинг трещин, который осуществлялся в течение шести месяцев, показал, что трещины стабилизировались, ширина их раскрытия и длина не изменялись или изменялись незначительно в зависимости от температуры окружающего воздуха.

В протяженных сплошных несущих стенах в середине их длины образовались сквозные вертикальные трещины. Наибольшую ширину раскрытия 1,5–2 мм указанные трещины имеют в средней по высоте части стены. В верхней и нижней зонах стены трещины сужаются и на расстоянии примерно 30–40 см от перекрытий затухают (рисунок 1).

полностью затухают приблизительно через три года [4]. Трещины в кладке из силикатного кирпича образуются, если разность относительных деформаций участков стен составляет 0,2–0,4 мм/м [5]. При низкой прочности сцепления растворных швов с кирпичом или недостаточной глубине перевязки кладочных изделий трещины имеют зигзагообразную траекторию, проходящую по швам кладки. В случае высокой прочности сцепления растворных швов и глубине перевязки соответствующей нормативным требованиям трещины пересекают кирпич и вертикальные швы кладки.

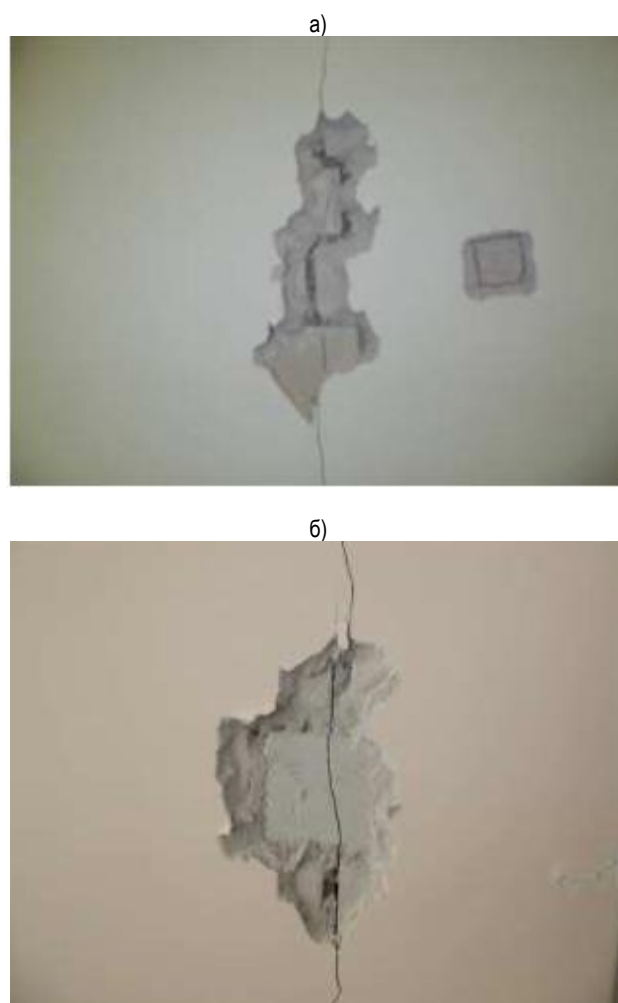
Обследование показало, что в кладке стен реализовывался как первый, так и второй случай трещинообразования. При этом основной причиной развития трещин по растворным швам кладки являлась неудовлетворительная перевязка кирпича (рисунок 2а). Если нормативные требования по глубине перевязке кирпича соблюдались, то траектория трещин имела строго вертикальное направление и проходила по кирпичам и растворным швам (рисунок 2б).



а) общий вид; б) схема трещинообразования
Рисунок 1 – Характерные трещины в несущих стенах

Характер трещин свидетельствует о том, что они вызваны растягивающими напряжениями, возникающими в каменной кладке вследствие стеснения ее усадочных деформаций плитами перекрытий и смежными стенами. Величина усадочных деформаций зависит от разности между начальной влажностью кладки и ее равновесной величиной, установившейся после продолжительной эксплуатации. Начальная влажность кладки определяется отпускной заводской влажностью силикатного кирпича и приобретенной влажностью в процессе возведения стен и хранения кирпича на строительной площадке. В связи с этим исключительную важность приобретают вопросы ухода за каменной кладкой и защиты ее от увлажнения атмосферными осадками в период строительства здания.

Практика эксплуатации каменных зданий показывает, что при установившихся эксплуатационных температурно-влажностных условиях усадочные деформации в кладке из силикатных изделий



а) неудовлетворительная перевязка;
б) удовлетворительная перевязка
Рисунок 2 – Характер трещин в зависимости от глубины перевязки кирпича

Во внутреннем слое наружных стен трещины возникали, как правило, в зонах оконных проемов, где имеет место концентрация растягивающих напряжений и ослабление поперечного сечения стены (рисунок 3).

При наличии в средней зоне перегородки дверного проема при прогибе перекрытия происходило разделение перегородки на две части, поворот которых приводил к возникновению трещин, показанных на рисунке 6. В перегородках, у которых проем смещен к краю, трещины развивались от угла проема, примыкающего к длинному участку перегородки.

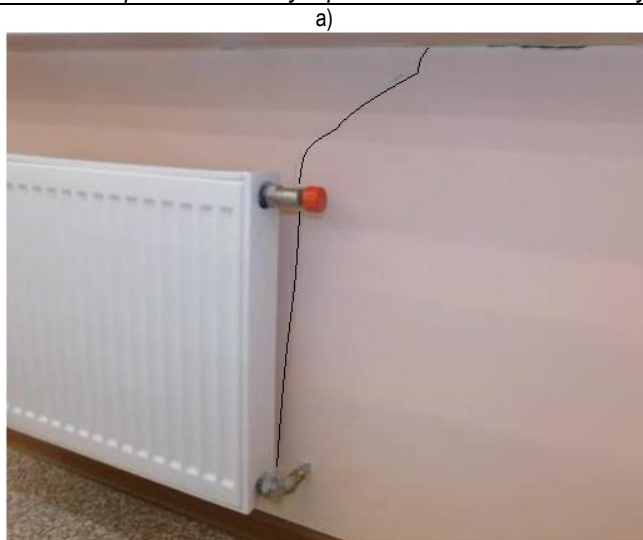
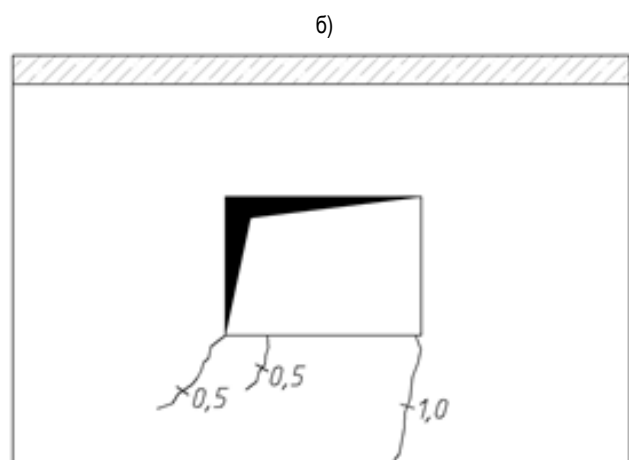


Рисунок 4 – Отсутствие деформационного шва в штукатурном слое перегородок

Прогиб плит перекрытия в этом случае привел к смятию штукатурного слоя в верхней зоне перегородок и частичной передаче на них нагрузки от верхнего перекрытия.

При прогибе поддерживающего перекрытия перегородка начала работать, как опертая на концах балка стенка, нагруженная собственным весом и частично весом вышележащего перекрытия. В этом случае ее напряженное состояние характеризуется развитием растягивающих и касательных напряжений, которые приводят к образованию трещин (рисунок 5).

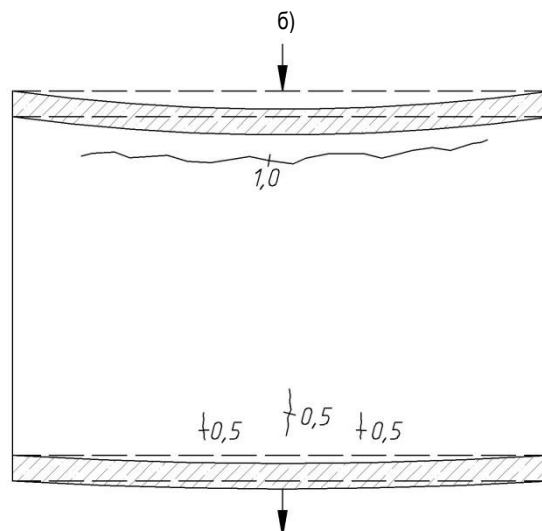
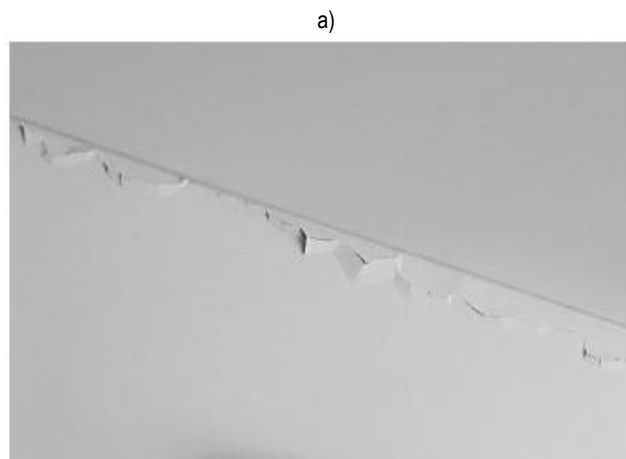


а) общий вид; б) схема трещинообразования
Рисунок 3 – Характерные трещины в наружных стенах с оконными проемами

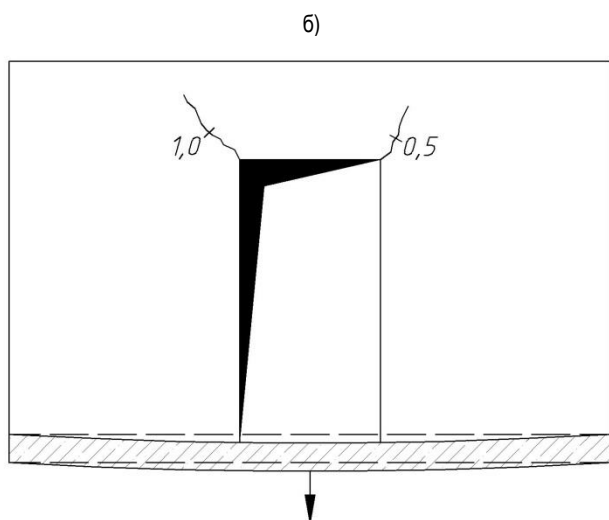
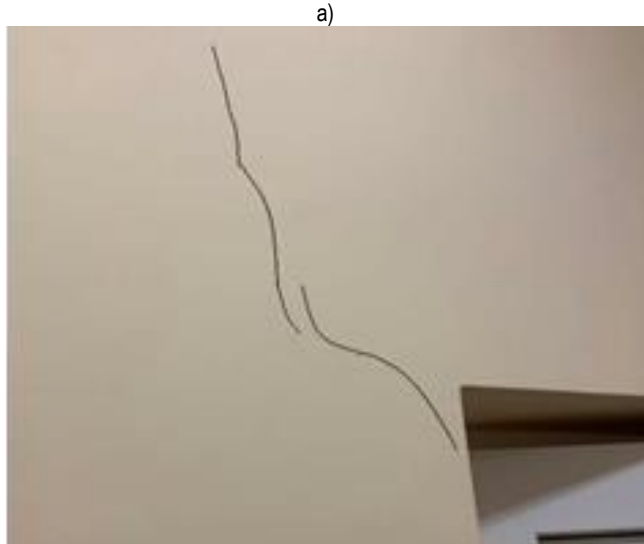
Расчетный анализ стен методом конечных элементов показывает, что усадка каменной кладки вызывает появление главных растягивающих напряжений σ_2 , траектории которых совпадают с направлением горизонтальных растворных швов. Максимальные значения напряжений σ_2 локализуются в середине длины сплошной стены. В стенах с оконными проемами максимальные значения главных растягивающих напряжений имеют место в подоконном поясе каменной кладки по его верхней грани вблизи угла проема. Трещины образуются, когда значения σ_2 превышают прочность каменной кладки на растяжение по перевязанному сечению [3].

Повреждения трещинами перегородок обусловлены усадочными деформациями кладки и прогибами плит перекрытий, являющимися опорами перегородок. При этом характер трещинообразования зависит от отношения длины перегородок к их высоте, наличия и места расположения дверных проемов, способа сопряжения перегородок с плитами перекрытий и примыкающими стенами [4, 5].

Наиболее распространенным дефектом перегородок, допущенным при их возведении, являлось отсутствие деформационного шва в штукатурном слое перегородок в месте их примыкания к плитам перекрытия (рисунок 4).



а) общий вид; б) схема трещинообразования
Рисунок 5 – Характер трещинообразования в перегородке при передаче на нее нагрузки от верхнего перекрытия



а) общий вид; б) схема трещинообразования
Рисунок 6 – Характер трещинообразования в перегородках с дверным проемом

Следует отметить, что трещиностойкость каменной кладки определяется ее прочностью на растяжение и сдвиг. На указанные прочностные показатели кладки существенное влияние оказывает качество выполнения кладочных работ, в частности глубина перевязки кирпичей и прочность сцепления с ними кладочного раствора. Прочность сцепления кладочного раствора с силикатным кирпичом зависит от состава раствора, который, согласно действующим нормам [6], должен соответствовать применяемым в каменной кладке кладочным изделиям. Кладка обследованных стен возводилась на цементно-песчаном растворе прочностью на сжатие 5 МПа. Известно, что прочность сцепления между кирпичом и кладочным раствором ключевым образом зависит от клеящей способности раствора и от полноты площади соприкосновения раствора с кирпичом. Значительные усадочные деформации цементных растворов вызывают усадочные напряжения, отрывающие на отдельных участках соприкосновения раствор от кирпича, что часто нивелирует высокую клеящую способность цементного раствора [7]. Кроме вышеперечисленных факторов прочность сцепления растворов с кладочными изделиями в значительной степени зависит от условий содержания кладки после ее выполнения.

Заключение

Основными причинами образования трещин в стенах и перегородках из силикатного кирпича явились усадочные деформации каменной кладки и прогибы перекрытий, на которые установлены перегородки. Снижению трещиностойкости стен и перегородок из

силикатного кирпича способствовало некачественное выполнение каменной кладки, отсутствие деформационных швов в отделочных слоях, применение цементно-песчаного кладочного раствора, обладающего низкой водоудерживающей способностью и повышенной усадкой, а также ненадлежащий уход за каменной кладкой в процессе ее возведения.

Список цитированных источников

1. Schubert, P. Schadfensfreies Konstruieren mit Mauerwerk, Teil 1: Formanderungen / P. Schubert // Mauerwerk Kalender. – 2002. – № 27. – P. 313–331.
2. Dialer, C. Rißschäden an Mauerwerkskonstruktionen / C. Dialer. – Fraunhofer IRB Verlag, 2016. – 451 p.
3. Деркач, В. Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление / В. Н. Деркач. – Минск : СтройМедиаПроект, 2021. – 256 с.
4. Деркач, В. Н. Влияние температурно-влажностных деформаций каменной кладки на трещиностойкость стенового заполнения каркасных зданий / В. Н. Деркач // Вестник БрГТУ. – 2020. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 38–30.
5. Kania, T. Testing Crack Resistance of Non-Load-Bearing Ceramic Walls with Door Openings / Tomasz Kania, Valery Derkach and Rafał Nowak // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 1379.
6. Каменные и армокаменные конструкции. Строительные нормы проектирования: СП 5.02.01-2021. – Введ.1.04.2021. – Минск : МАиС, 2021. – 116 с.
7. Поляков, С. В. Длительное сжатие кирпичной кладки / С. В. Поляков. – М. : Гос. из-во литературы по строит-ву, 1956. – 183 с.

References

1. Schubert, R. Schadfensfreies Konstruieren mit Mauerwerk, Teil 1: Formanderungen / R. Schubert // Mauerwerk Kalender. – 2002. – № 27. – P. 313–331.
2. Dialer, C. Rißschäden an Mauerwerkskonstruktionen / C. Dialer. – Fraunhofer IRB Verlag, 2016. – 451 p.
3. Derkach, V. N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie / V. N. Derkach. – Minsk : StrojMediaProekt, 2021. – 256 s.
4. Derkach, V. N. Vliyaniye temperaturno-vlazhnostnykh deformatsiy kamennoy kladki na treshchinostoykost' stenovogo zapolneniya karakasnykh zdaniy / V. N. Derkach // Vestnik BrGTU. – 2020. – № 1 : Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 38–30.
5. Kania, T. Testing Crack Resistance of Non-Load-Bearing Ceramic Walls with Door Openings / Tomasz Kania, Valery Derkach and Rafał Nowak // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 1379.
6. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Stroitel'nye normy proektirovaniya: SP 5.02.01-2021. – Vved.1.04.2021. – Minsk : MAiS, 2021. – 116 s.
7. Polyakov, S. V. Dlitel'noe szhatie kirpichnoy kladki / S. V. Polyakov. – M. : Gos. iz-vo literatury po stroit-vu, 1956. – 183 s.

Материал поступил 26.01.2023, одобрен 10.02.2023, принят к публикации 10.02.2023

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ОСЕВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

Н. Н. Шалобыта¹, Е. С. Матвеевко², Т. П. Шалобыта³, Н. В. Матвеевко⁴

¹ К. т. н., доцент кафедры строительных конструкций, проректор по научной работе

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

² М. т. н., аспирант кафедры строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: elizabeth.brenkovich@yandex.by

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

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: t_shalobyta@mail.ru

⁴ М. т. н., научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nikifarych@yandex.by

Реферат

Проведен анализ различных методов по оценке прочностных и деформационных характеристик на осевое растяжение бетонов нормального веса.

Ключевые слова: бетон, прочность на растяжение, испытания, напряженно-деформированное состояние.

EVALUATION OF METHODS FOR DETERMINING THE STRENGTH OF CONCRETE UNDER AXIAL EXTENSION

N. N. Shalobyta, E. S. Matveenko, T. P. Shalobyta, N. V. Matveenko

Abstract

The analysis of various methods for assessing the strength and deformation characteristics in axial tension of concrete of normal weight has been carried out.

Keywords: concrete, tensile strength, testing, stress-strain state.

Введение

Теоретическое решение вопроса о механической прочности бетона и о причинах его разрушения под действием внешних усилий встречает значительные трудности. Обычные теории прочности построены для материалов однородных и сплошных, между тем как в бетоне мы имеем пример материала с ярко выраженной неоднородностью строения. Поэтому многие теории можно применять к решению вопросов о прочности бетонных конструкций лишь с известным приближением, приписывая самому бетону, образующему конструкцию, некоторые средние свойства.

Прочностные характеристики бетона на растяжение значительно ниже прочности бетона на сжатие, поэтому в практике проектирования железобетонных конструкций данная характеристика в расчетах используется, как правило, в условиях для проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности. Однако следует отметить, что бетон над трещиной и между трещинами (с учетом совместной работы с арматурой) способен оказывать значительное сопротивление растяжению, что дает возможность увеличить несущую способность конструкции в целом благодаря его прочностным характеристикам на растяжение. Для целого ряда конструкций, подвергающимся в процессе эксплуатации целиком либо частично воздействию растягивающих усилий, прочность бетона на растяжение является одной из основных характеристик. Следует заметить, что не столько сама величина показателя прочности бетона на растяжение является причиной пренебрежения ею при расчётах предельных состояний, сколько в большей степени сложности, связанные с точностью ее определения.

Прочностные характеристики бетона являются характеристиками собственной прочности материала при условии их постоянства в различных точках, что, как правило, в бетоне и не наблюдается. Данные величины различны для частиц цементного камня, для частиц заполнителя и в зоне контакта цементного камня с зёрнами заполнителя могут весьма сильно отличаться от таких же величин внутри каждого из этих компонентов в отдельности. Таким образом, неоднородность структуры бетона создает большое разнообразие в количественных значениях характеристик для одного и того же бетона.

Механические свойства бетона, которыми определяется применение данного материала в конструкциях зданий и сооружений, зависят от весьма большого числа факторов, характеризующих состав бетона и технологию его производства (рисунок 1). Одновременное воздействие факторов делает задачу исследования и установления механических свойств бетона весьма сложной. Необходимо определить

влияние каждого из факторов, установить интенсивность и пределы этого влияния, выяснить взаимодействие отдельных параметров; все это требует большого количества экспериментов, тщательной их постановки и обработки и умелого анализа результатов, что в конечном итоге накладывает свои ограничения в использовании полученных экспериментальных данных.

Рассматривая влияние структуры бетона на его прочностные свойства, следует отметить, что сопротивление бетона растяжению имеет значительно меньшую величину, чем сопротивление сжатию. Данная величина связана непосредственно с наименьшей из характеристик собственной прочности бетона, а именно с нормальным сцеплением, что совместно с нарушением сплошности бетона способствуют развитию концентрации напряжений, особенно при действии растягивающей нагрузки. Эти обстоятельства и обуславливают малую прочность бетона на растяжение. С другой стороны, неоднородность строения бетона, которая вообще является одной из главных причин большого рассеяния результатов механических испытаний этого материала, должна сказываться при экспериментальном определении величины сопротивления бетона на растяжение гораздо сильнее, чем при определении прочности на сжатие. Отношение между средним значением прочности на осевое растяжение бетона f_{ctm} и средним значением прочности на осевое сжатие $f_{cm,cube}$ бетона нормального веса колеблется в весьма широких пределах. Еще в начале прошлого века в описанных профессором Залигером опытах [1] установлены следующие границы данного коэффициента $k = f_{ctm} / f_{cm,cube} = 0,167 - 0,042$, в опытах Дютрона (Dutron) [2] коэффициент $k = 0,10 - 0,05$, а если сопротивление растяжению относить к призмочной прочности бетона, то $k = 0,13 - 0,08$ [2]. Любопытные данные получились в венских опытах Ханиш и Шпицер (Hanisch и Spitzer) [2], которые производились с бетонными плитами с целью установления прочности бетона на изгиб. Из краев разрушенных при испытании плит были осторожно вырезаны образцы для определения прочности бетона на чистое осевое растяжение; плиты испытывались в возрасте 258 дней, и, хотя бетон в них имел постоянный состав, сопротивление разрыву вырезанных образцов колебалось в пределах 2,0–2,9 МПа (т. е. на 45 % от наименьшего значения), а сопротивление сжатию контрольных кубиков – от 25,6 до 35,2 МПа (т. е. на 38 % от наименьшего значения). Данный пример, как и многие другие, показывает, с какой осмотрительностью следует относиться к результатам экспериментов с бетоном при определении его механических свойств, особенно на растяжение.



Рисунок 1 – Факторы, влияющие на прочность бетона на растяжение

Методы и результаты исследований

В настоящее время все больше количество исследований посвящено поиску оптимальной методики испытания, позволяющей дать наиболее точное значение прочности бетона на растяжение. Следует отметить, что прочность бетона на растяжение может определяться как прямым методом, путем испытаний бетонного образца в условиях осевого растяжения, так и косвенными – например, испытанием цилиндров, призм или кубов на растяжение при раскалывании или призм на растяжение при изгибе [4].

1 Осевое растяжение

Первоначально определение значение прочности бетона на растяжение устанавливали из непосредственного испытания образцов в виде «восьмерок» с квадратным поперечным сечением на осевое растяжение. Образец принимали с призматическим участком значительной длины для того, чтобы обеспечить равномерное распределение внутренних усилий в его средней части [2].

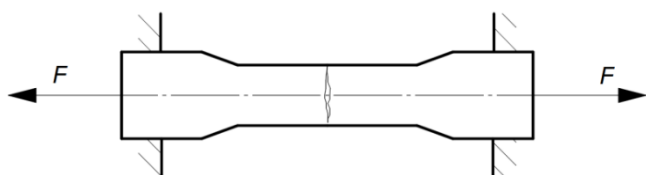


Рисунок 2 – Схема испытания образцов для определения прочности бетона на осевое растяжение [2]

Однако, как показали многочисленные экспериментальные исследования, применение образцов в виде «восьмерок» при испытании бетона на осевое растяжение, также, как это было принято и при испытании цементных растворных образцов, показывали весьма значительную неравномерность в распределении напряжений в сечении разрыва [2]. В свое время Кокер [10] изучал данный вопрос оптическим методом на прозрачных моделях. В цементных растворных образцах формой в виде английской восьмерки (рисунок 3) растягивающие напряжения σ_x в опасном сечении распределялись по кривой, причем наибольшая величина их у наружного контура в 1,74 раза превышала среднее напряжение, получающееся делением растягивающей силы на площадь сечения [2, 10]. Кроме напряжений σ_x , возникающих в направлении действующего усилия растяжения, наблюдались и напряжения в перпендикулярном направлении – σ_y , которые увеличивались от нуля на контуре до максимального значения в середине образца, где они достигали величины 0,47 от среднего значения напряжений σ_x . Данные результаты, конечно, в полной мере нельзя переносить на опыты с бетонными «восьмерками», но следует предполагать, что получаемые в результате испытаний последних результаты дают все же преуменьшенное значение для сопротивления на растяжение [2].

В настоящее время нормы [4], впрочем как и большинство других норм, только лишь **допускают** выполнять испытания бетона растягивающей нагрузкой, приложенной по оси испытательного образца в виде призмы с галтелями (рисунок 4), цилиндров или призм без галтелей (рисунок 5).

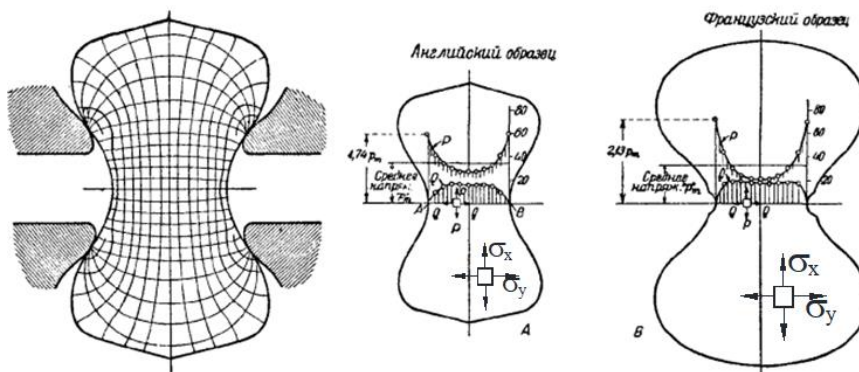
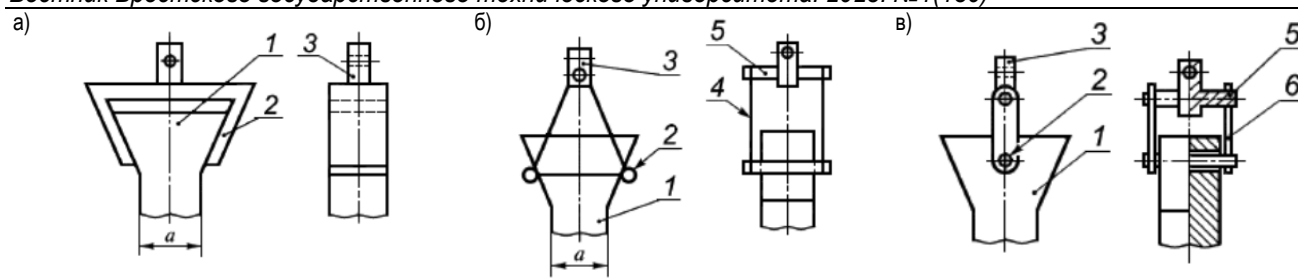
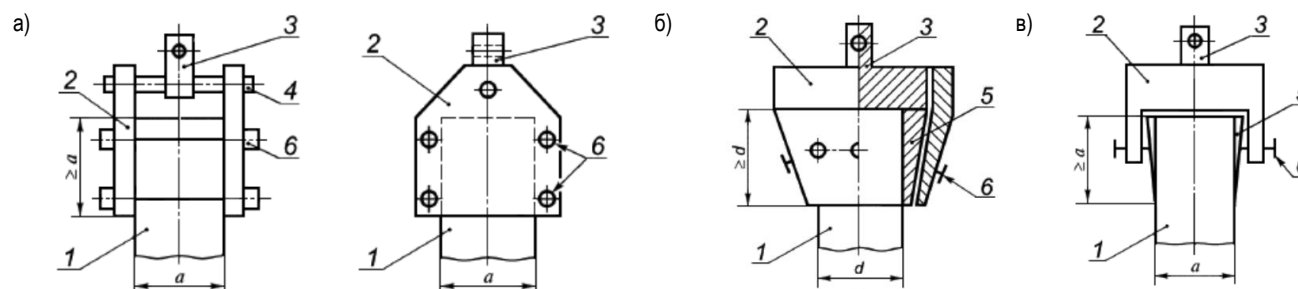


Рисунок 3 – Испытания образцов для определения прочности бетона на осевое растяжение [10, с. 496]



1 – образец; 2 – захват; 3 – концевой элемент шарнира Гука; 4 – гибкая тяга; 5 – ось; 6 – жесткая тяга

Рисунок 4 – Схемы захватов для крепления образца с галтелями [4]



1 – образец; 2 – захват; 3 – концевой элемент шарнира Гука; 4 – ось; 5 – цапга; 6 – стягивающие винты

Рисунок 5 – Схемы зажимных захватов [4]

При этом следует заметить, что только прямые испытания на осевое растяжение позволяют получить полную диаграмму деформирования бетона на растяжение. В то же время, рекомендуемые нормами косвенные методы для определения прочности бетона на осевое растяжение возможно объяснить в основном редким использованием полностью деформационных методов расчета железобетонных конструкций, а также тем, что результаты, получаемые при испытаниях на осевое растяжение, сильно зависят от правильности геометрической формы образца, точности его установки в машине и вида захватов и т. д. Так, например, захват образца в разрывной машине может создать условия, препятствующие равномерному распределению усилия по сечению образца, т. е. приведет к возникновению вторичных напряжений [6, с. 31–32]. Поэтому, на наш взгляд, при испытании на осевое растяжение важное значение имеет измерение деформации по граням образца, что дает возможность найти его физическую ось и получить более равномерное поле напряжений по всем сечениям [7].

2 Испытание трубчатого образца

Учитывая трудности безупречного проведения опыта с бетоном на осевое растяжение, Погани (Pogany) [2] предлагал определять величину прочности бетона на растяжение путем испытания полых цилиндрических образцов давлением воды. В его опытах длина образца принималась 100 мм, внешний диаметр – 54 мм, внутренний – 32 мм. Образец устанавливается, с одной стороны, в стальную трубу с запаянным дном, а с другой стороны – в трубу, соединенную с насосом и манометром. В местах соединения образца с трубами вводилась изолирующая прокладка. Пренебрегая напряжениями сжатия, возникающими по направлению оси образца, Погани вычислял прочность бетона на растяжение как кольцевое растягивающее напряжение, пользуясь формулой Ламе (Lame) для цилиндрической трубы с толстыми стенками, подверженной внутреннему давлению:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right), \quad (1)$$

где p – давление воды;

r_1 и r_2 – соответственно внешний и внутренний радиусы поперечного сечения образца;

r – радиус того кольца, в котором определяется напряжение σ_t .

Принимая $r = r_1$ для наружной поверхности образца, получаем:

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot p \cdot r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right). \quad (2)$$

С учетом размеров образца имеем, что $\sigma_t = 1.08 \cdot p$.

Сопоставляя результаты своих опытов с параллельными испытаниями нормальных «восьмерок», Погани [2] получил для образцов из цементно-песчаного раствора результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов определения прочности бетона на растяжение

Возраст образцов при испытании	Среднее значение прочности бетона на растяжение (разрыв), МПа	
	образцы «восьмерки» на осевое растяжение	образцы цилиндры на кручение
3 суток	1,21	1,295
7 суток	1,81	2,21

При этом, однако, следует заметить, что примененная для вычисления прочности бетона на растяжение формула относится к наименьшему из кольцевых напряжений, тогда как наибольшая величина его возникает, как это следует из формулы Ламе, на внутренней поверхности цилиндра, т. е. при $r = r_0$, что для рассматриваемых образцов дает почти вдвое большую величину против указываемой автором предложения [2].

3 Определение прочности бетона на растяжение при испытании на кручение

Величину прочности бетона на растяжение пытались определять также из опыта с кручением цилиндрического образца [2]. У поверхности такого образца (рисунок 6) в каждой точке возникают касательные напряжения τ , из которых одно направлено по образующей цилиндра, а другое – к нему перпендикулярно по касательной к окружности поперечного сечения, проходящего через рассматриваемую точку. Из формулы (3) для определения главных напряжений, лежащих в касательной к цилиндру плоскости следует, что оба главных напряжения направлены под углом 45° к оси цилиндра и одному из них – растягивающему – отвечают трещины разрыва, которые можно наблюдать при скручивании бетонных образцов. Действительно, сопротивление бетона растяжению значительно меньше его сопротивления сдвигу, поэтому в данном случае критическим для прочности образца является не касательное напряжение τ , а главное растягивающее напряжение σ_t той же величины.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau^2}. \quad (3)$$

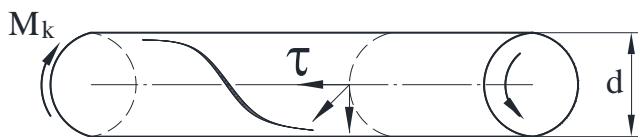


Рисунок 6 – Испытания образцов для определения прочности бетона на растяжение при кручении [1–2]

Допуская справедливость законов упругости до момента разрушения бетона, можно вычислить напряжение τ по известной формуле (4) и принять его равным среднему значению прочности бетона при растяжении f_{ctm} :

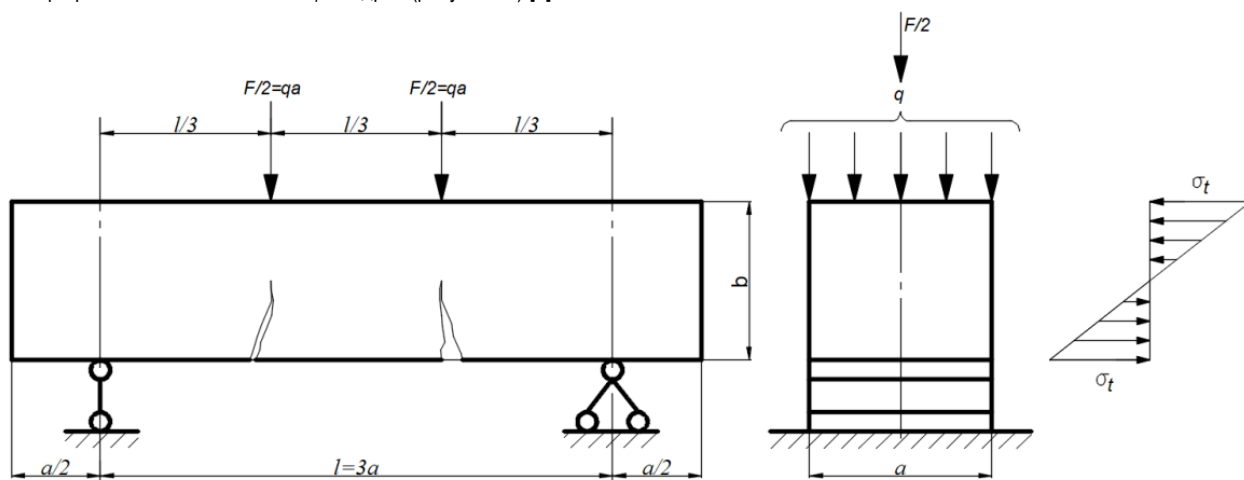
$$f_{ctm} = \tau = \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d^3} \quad (4)$$

Данную методику использовали Руделлоф, Бах (Rudeloff, Bach) и другие в своих опытах [2]. Так, в опытах Баха [2] с бетоном кубиковая прочность на осевое сжатие образцов, которого равнялась 29,4 МПа, среднее сопротивление скручиванию (или разрыву) получилось равным 2,56 МПа, т. е. $k = \frac{2,56}{29,4} \approx 0,09$.

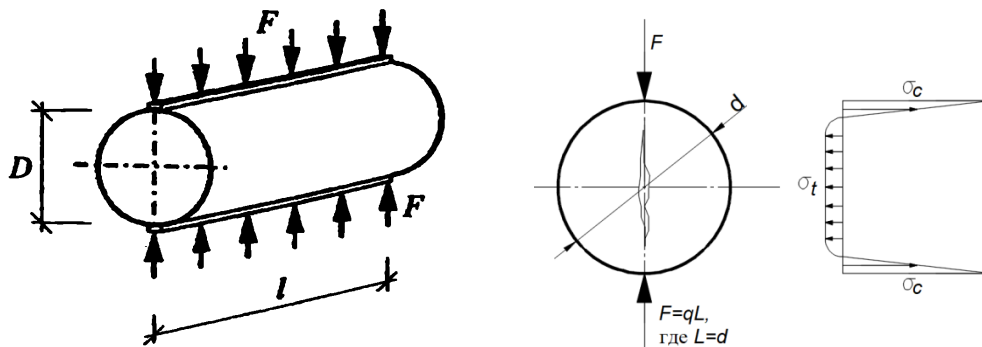
Кроме описанных выше методов экспериментального определения прочности бетона на растяжение, учитывая все сложности, возникающие при испытании образцов, в практике последних десятилетий в нормативные документы многих странах, как уже отмечалось выше, внесены и нашли наибольшее распространение косвенные методы.

Косвенные методы определения прочности бетона на растяжение возникли как альтернатива методу прямого (осевого) растяжения ввиду сложности его реализации. Суть косвенных методов заключается в создании вторичных растягивающих полей напряжения в отдельных участках опытного образца в результате приложения к нему внешней сжимающей нагрузки. Косвенные методы включают в себя: испытание на изгиб бетонных балок (рисунок 7а), испытание на растяжение при раскалывании бетонных цилиндров (рисунок 7б) [4].

а)



б)



а) испытание на растяжение при изгибе бетонных балок;

б) испытание на растяжение при раскалывании бетонных цилиндров

Рисунок 7 – Схема испытания образцов для определения прочности бетона косвенными методами [4]

4 Испытание бетонных балок на изгиб

Бетонная балка, подверженная действию изгибающей нагрузки, доходит до разрушения вследствие потери бетоном прочности в крайних растянутых волокнах. Первая трещина разрыва, появившаяся в растянутой зоне балки, немедленно влечет за собой разрушение, так как в поперечном сечении, соответствующем этой трещине, рабочая высота и момент сопротивления уменьшаются, а это вызывает дальнейший рост напряжений.

Отсюда, естественно, возникает мысль определять прочность бетона на растяжение $f_{ct,fe}$ из испытаний на изгиб бетонных балок. Однако вычисление величины $f_{ct,fe}$ по результатам экспериментальных исследований образцов-балок на изгиб представляет значительные трудности. Если балка имеет прямоугольное поперечное сечение $b \times h$, а изгибающий момент в балке равен M , то, допуская справедливость формулы Навье до момента разрушения бетона, имеем:

$$f_{ct,fe} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \quad (5)$$

Однако, как показывает сопоставление результатов, полученных данным условным путем, с результатами непосредственного испытания бетона нормального веса на осевое растяжение, первые всегда больше вторых в среднем в 2 раза [2]. Объяснить данное различие возможно только с точки зрения не совсем корректного применения формулы Навье, учитывающей упругий (линейный) закон распределения напряжений в сжатой и растянутой зонах, что применительно к такому материалу, как бетон, не совсем корректно. Поэтому наиболее правильный подход для определения прочности бетона на растяжение $f_{ct,fe}$ из испытаний на изгиб заключается, прежде всего, в установлении действительной эпюры напряжений.

Определения прочности бетона на растяжение при раскалывании, включающей изготовление бетонного образца (цилиндра или куба) и испытание его на сжатие путем приложения разрушающей нагрузки к его боковой поверхности образца с двух диаметрально расположенных сторон, до раскалывания, с последующим расчетом прочности по формулам:

– при испытании цилиндров
$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot l}; \quad (6)$$

– при испытании кубов
$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot a^2}. \quad (7)$$

Косвенные испытания не создают условий для равномерного распределения напряжений на поверхности образца, в первую очередь, осевых. Часто напряжения на поверхности разрушения не являются одноосными. Следовательно, определение прочности на растяжение становится приблизительным, и, кроме того, построение полной диаграммы деформирования «напряжение – деформация» по вышеупомянутым косвенным испытаниям невозможно.

5 Новые подходы к определению прочности бетона на растяжение

В настоящее время все больше экспериментальных исследований посвящено попыткам преодоления недостатков существующих методов и методик определения прочности бетона на растяжение.

J. Kim и M. R. Taha [5], исследуя метод прямого осевого растяжения бетона и столкнувшись с проблемой неравномерного приложения растягивающей осевой нагрузки, предложили усовершенствовать методику испытаний на осевое растяжение.

В качестве образцов для испытаний были выбраны цилиндры диаметром 101,6 мм и высотой 203,2 мм. К торцевым граням цилиндров на эпоксидной смоле приклеивались стальные пластины, имеющие отверстие с резьбой под болты определенного диаметра. Образец с помощью болтов крепился к пластинам специальных захватов испытательной установки (рисунок 6). Особенностью данных захватов является наличие в них подшипников качения, что позволяет в процессе нагружения максимально совместить оси приложения растягивающего усилия и центра тяжести образца.

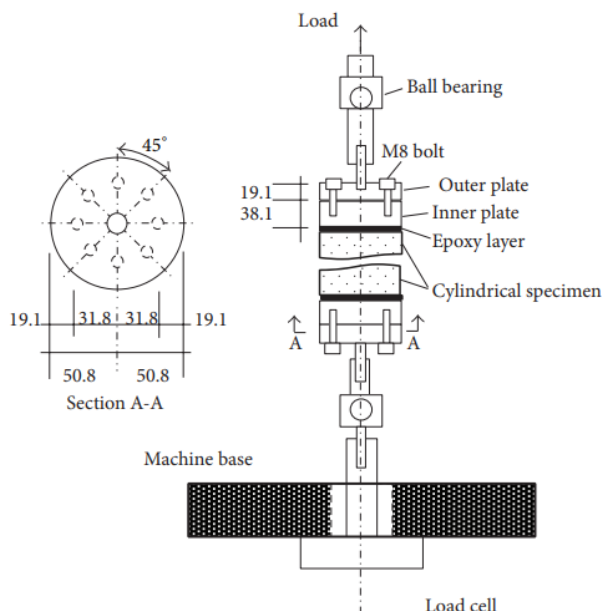
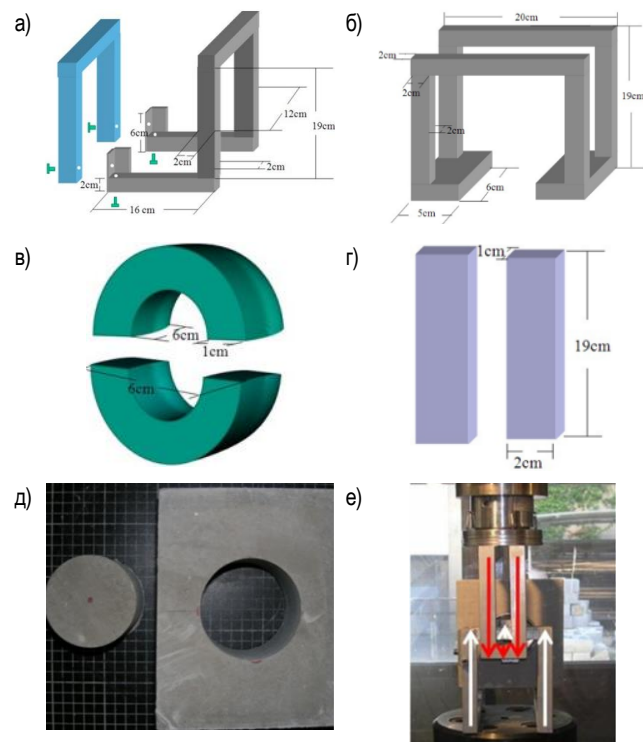


Рисунок 6 – Схема испытательной установки, предложенной J. Kim и M. R. Taha [5]

По результатам выполненных экспериментальных исследований 12 образцов, авторами [5] установлено, что прочность бетона на осевое растяжение в среднем в 2,5 раза ниже, чем прочность бетона на растяжение при изгибе образцов призм, выполненных из того же состава бетона и в 1,42 раза ниже прочности бетона на растяжение при раскалывании образцов цилиндров.

Определению прочности бетона методом прямого растяжения с использованием нового устройства нагружения посвящено исследование группы учёных под руководством V. Sarfarazi [8]. Перед авторами стояла задача разработать устройство, позволяющее преобразовывать сжимающее усилие, которое возможно создать при помощи любого промышленного пресса, в растягивающее. Предложенное устройство состоит из нескольких отдельных деталей, выполненных из металла (рисунок 7 а-г). Деталь № 1 разделена на две отдельные части: «U»-образную и такую же с двумя присоединенными к ней «L»-образными частями (рисунок 7а). Деталь № 2 неразделима и состоит из двух «U»-образных элементов, которые соединяются между собой двумя пластинами (рисунок 7б). Деталь № 3 представляет собой две полуцилиндрические пластины размером 75×60×10 мм (рисунок 7в). Деталь № 4 состоит из двух отдельных пластин с размерами 190×20×10 мм (рисунок 7г).

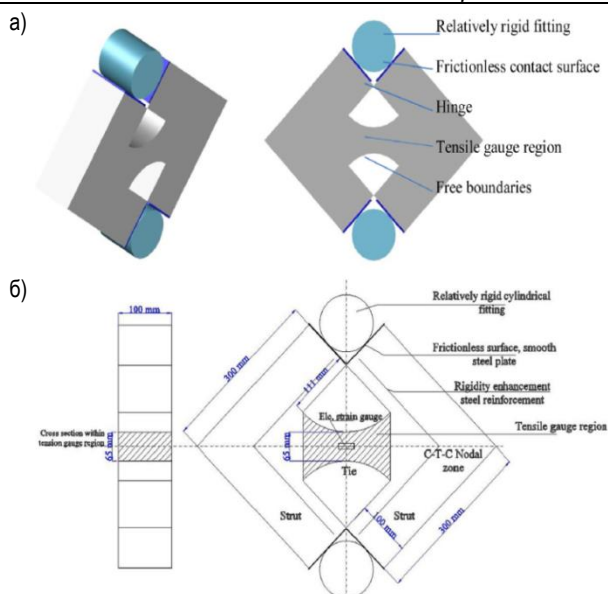


а), б), в) и г) – детали № 1, № 2, № 3 и № 4 устройства нагружения соответственно; д) – опытный образец; е) – испытание бетонного образца на растяжение
Рисунок 7 – Испытаний бетона на осевое растяжение V. Sarfarazi [8]

В качестве опытных образцов были использованы бетонные призмы размером 150×190×6 мм с внутренним отверстием диаметром в 75 мм (рисунок 7д). Полуцилиндрические пластины детали № 3 устанавливаются в отверстие образца, затем в это отверстие вставляются металлические пластины детали № 4. Вертикальное сжимающее усилие пресса через «U»-образные элементы деталей № 1 и № 2 передается соответственно на нижнюю и верхнюю пластины детали № 4. (рисунок 7е). Таки образом, участки бетонного образца призмы, расположенные по горизонтальной оси в обе стороны от отверстия, испытывают растягивающее воздействие.

Прочность бетона на осевое растяжение, полученная при испытании образца с использованием установки преобразования сжимающей нагрузки в растягивающую, была значительно ниже прочности бетона того же состава при испытании на раскалывание с разницей в 33 %.

Достаточно инновационный подход к определению характеристик прочности бетона на растяжение предложили ученые из Ирака [9]. Определение прочности бетона на растяжение авторами предлагается путем приложения равнодействующей усилий от внешней нагрузки к расчетному участку опытного образца (рисунок 8а). В бетонной перемычке образца в этом случае создается состояние чистого осевого растяжения и практически равномерных растягивающих напряжений в установленной области измерения (рисунок 8б).



а – геометрическая форма образцов;
 б – схема распределение напряжений
 в рассматриваемой зоне опытного образца
Рисунок 8 – Модель определения прочности
 бетона на осевое растяжение [9]

Сжимающая нагрузка прикладывается с помощью пресса через жесткую цилиндрическую опору на гладкие стальные пластины, закрепленные на образце. Размеры цилиндрической опоры выбраны таким образом, чтобы избежать неточностей в передаче нагрузки. Геометрия образцов симметрична относительно осей *x* и *y*, что исключает случайные отклонения в передаче сжимающей нагрузки.

Анализ распределения напряжений в пределах рассматриваемой области опытного образца показал, что нагруженное состояние в области переключки является чистым растягивающим напряжением, так как развитие дополнительных напряжений сжатия в ближайшей области не наблюдается.

Для оценки надежности предложенного метода определения прочности бетона на растяжение авторами [9] была подготовлена экспериментальная программа. С этой целью были изготовлены бетонные образцы с различной величиной крупного заполнителя и испытаны в возрасте 7 и 28 суток тремя методами: на изгиб, на раскалывание и по предложенной методике испытаний [9].

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что прочность на осевое растяжение, определенная с использованием предложенной модели, выше, чем значение прочности на растяжение при раскалывании, и ниже, чем полученное значение прочности на растяжение при изгибе. Результаты испытаний показывают, что образцы с высокой прочностью на осевое сжатие имеют более низкое отношение прочности на осевое растяжение к прочности на осевое сжатие. Среднее значение прочности на осевое растяжение составляет приблизительно 8 % и 6,8 % от среднего значения прочности кубов базового размера на осевое сжатие через 7 и 28 суток соответственно; в то время как для образцов с низкой прочностью на осевое сжатие соответствующие значения, как правило, составляют 11 % и 8 % соответственно.

Данные, полученные в результате экспериментальных исследований в работах [4], [8] и [9], содержат информацию о значениях прочности бетона на осевое растяжение рассмотренными полученную по предложенные методикам испытаний, а также значения прочности бетона на растяжение при изгибе и раскалывании для образцов с аналогичными характеристиками.

Прочностные характеристики бетона на осевое растяжение по результатам испытания опытных образцов согласно ISO 1920-4:2020 определяются:

- при раскалывании – $f_{ct,ax} = 0.9 \cdot f_{ct,sp}$; (6)
- при изгибе – $f_{ct,ax} = 0.5 \cdot f_{ct,fe}$; (7)

где $f_{ct,ax}$ – прочность бетона на осевое растяжение;
 $f_{ct,sp}$ – прочность бетона на растяжение при раскалывании;
 $f_{ct,fe}$ – прочность бетона на растяжение при изгибе.

Основываясь на выражениях (6) и (7), определяем соотношение прочности бетона на растяжение, полученное в результате реализации предложенных методик (таблица 2).

Таблица 2 – Оценка результатов определения прочности бетона на растяжение

Метод	Прочность бетона на растяжение при раскалывании ($f_{ct,sp}$), МПа	Прочность бетона на растяжение при изгибе ($f_{ct,fe}$), МПа	Прочность бетона при осевом растяжении			Коэффициент вариации
			($f_{ct,ax}$), МПа	$f_{iso_{ct,ax}} = 0.9 \cdot f_{ct,sp}$, МПа	$f_{iso_{ct,ax}} = 0.5 \cdot f_{ct,fe}$, МПа	
Kim J. и Taha M.R. [5]	2,28	3,75	1,55	2,052	1,875	0,133
	2,33	3,93	1,77	2,097	1,965	
	1,82	4,48	1,52	1,638	2,24	
	3,02	5,07	2,13	2,718	2,535	
	3,01	5	2,13	2,709	2,5	
	3,03	5,24	2,25	2,727	2,62	
	3,84	6,07	2,44	3,456	3,035	
	3,8	6,73	2,53	3,42	3,365	
	3,84	6,78	2,5	3,456	3,39	
$f_{ct,ax,m}$			2,091	2,697	2,614	
Sarfazai V. [8]	4,5	–	3,1	4,05	–	0,208
	4,7	–	3,1	4,23	–	
	4,4	–	2,9	3,96	–	
$f_{ct,ax,m}$			3,03	4,08		
Sa'ad Fahad Resan [9]	1,33	2,5	1,75	1,197	1,25	0,163
	1,5	2,59	2,11	1,35	1,295	
	1,5	2,69	2,46	1,35	1,345	
	2	4,08	2,27	1,8	2,04	
	2	4,27	2,39	1,8	2,135	
	2,4	4,47	2,56	2,16	2,235	
	1,51	2,38	1,67	1,359	1,19	
	1,67	2,57	1,9	1,503	1,285	
	1,82	2,78	2,14	1,638	1,39	
	1,82	3,37	1,92	1,638	1,685	
	1,92	3,41	2,08	1,728	1,705	
	2,01	3,97	2,23	1,809	1,985	
$f_{ct,ax,m}$			2,123	1,611	1,628	

Заключение

По результатам оценки методов определения прочности бетона при осевом растяжении следует, что весьма малая прочность бетона на растяжение по сравнению с его прочностью на сжатие представляет один из наиболее существенных дефектов данного материала. Использование различных методов, установок и образцов различных конфигураций, форм и размеров не позволили нейтрализовать вторичные напряжения, наличие которых приводят к неравномерному приложению напряжений к бетонным образцам. Поэтому большая неопределенность в точном установлении прочности на растяжение заставила «железобетонщиков» в своих расчетах использовать различные значения $f_{ctk,0.05}$, $f_{ctk,0.95}$ и f_{ctm} для учета сопротивления бетона в растянутых зонах армированных элементов.

Список цитированных источников

1. Залигер, Р. Железобетон. Его расчет и проектирование : пособие для высших технических учебных заведений / под редакцией проф. П. Я. Камenceва. – 5-е изд., стереотипное. – М. : ГНТИ, 1931. – 671 с.
2. Столяров, Я. В. Введение в теорию железобетона / Я. В. Столяров. – М. : Стройиздат Наркомстроя, 1941. – 448 с.
3. Байков, В. Н. Железобетонные конструкции : Общий курс: Учебник для вузов / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1991. – 767 с.
4. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : ГОСТ 10180-2012. – Введ. 01.02.2016. – Минск : Госстандарт, 2016. – 29 с.
5. Kim, J. Experimental and numerical evaluation of direct tension test for cylindrical concrete specimens / J. Kim, M. R. Taha // *Advances in Civil Engineering*. – 2014. – 1–8 pp.
6. Бушков, В. А. Железобетонные конструкции : в 2-х ч. / В. А. Бушков. – М. : Всесоюзная промышленная академия, 1940. – Ч. 1. – 158 с.
7. Безгодов, И. П. О повышении предела прочности и деформативности бетона при растяжении / И. П. Безгодов // *Бетон и железобетон*. – 2012. – № 1. – С. 5–7.
8. A new approach for measurement of tensile strength of concrete / V. Sarfarazi [et. al.] // *Period. Polytech. Civ. Eng.* – 2016. – №60 (2). – 199–203 pp.
9. Resan, S. F. New approach of concrete tensile strength test / S. F. Resan [et. al.] // *Case Studies in Construction Materials* – 2020. – Vol. 12.
10. Кокер, Э. Оптический метод исследований напряжений / Э. Кокер, Л. Файлон. – М. : ОНТИ-Л, 1936. – 645 с.
11. Испытания бетона. Часть 4. Прочность затвердевшего бетона : ISO 1920-4:2020. – Введ. 07.01.2020. – Минск : Госстандарт, 2020. – 36 с.

References

1. Zaliger, R. ZHelezobeton. Ego raschet i proektirovanie : posobie dlya vysshih tekhnicheskikh uchebnyh zavedenij / pod redakciej prof. P. Ya. Kamenceva. – 5-e izd., stereotipnoe. – M. : GNTI, 1931. – 671 s.
2. Stolyarov, Ya. V. Vvedenie v teoriyu zhelezobetona / Ya. V. Stolyarov. – M. : Strojizdat Narkomstroya, 1941. – 448 s.
3. Bajkov, V. N. ZHelezobetonnyye konstrukcii : Obshchij kurs: Uchebnik dlya vuzov / V. N. Bajkov, E. E. Sigalov. – 5-e izd., pererab. i dop. – M. : Strojizdat, 1991. – 767 s.
4. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam : GOST 10180-2012. – Vved. 01.02.2016. – Minsk : Gosstandart, 2016. – 29 s.
5. Kim, J. Experimental and numerical evaluation of direct tension test for cylindrical concrete specimens / J. Kim, M. R. Taha // *Advances in Civil Engineering*. – 2014. – 1–8 pp.
6. Bushkov, V. A. ZHelezobetonnyye konstrukcii : v 2-h ch. / V. A. Bushkov. – M. : Vsesoyuznaya promyshlennaya akademiya, 1940. – CH. 1. – 158 s.
7. Bezgodov, I. P. O povyshenii predela prochnosti i deformativnosti betona pri rastyazhenii / I. P. Bezgodov // *Beton i zhelezobeton*. – 2012. – № 1. – S. 5–7.
8. A new approach for measurement of tensile strength of concrete / V. Sarfarazi [et. al.] // *Period. Polytech. Civ. Eng.* – 2016. – №60 (2). – 199–203 pp.
9. Resan, S. F. New approach of concrete tensile strength test / S. F. Resan [et. al.] // *Case Studies in Construction Materials* – 2020. – Vol. 12.
10. Koker, E. Opticheskij metod issledovanij napryazhenij / E. Koker, L. Fajlon. – M. : ONTI-L, 1936. – 645 s.
11. Ispytaniya betona. CHast' 4. Prochnost' zatverdevshego betona : ISO 1920-4:2020. – Vved. 07.01.2020. – Minsk : Gosstandart, 2020. – 36 s.

Материал поступил 02.02.2023, одобрен 07.02.2023, принят к публикации 19.02.2023

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БЫВШЕГО МОНАСТЫРЯ БЕРНАРДИНОК НА ТЕРРИТОРИИ БРЕСТСКОЙ КРЕПОСТИ

А. Б. Шурин¹, В. Л. Шевчук², В. Н. Деркач³, В. М. Терлецкий⁴

¹К. т. н., доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: shuryn@mail.ru

²К. т. н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sk@bstu.by

³Д. т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет», директор филиала РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.by

⁴Методист ГУК «Брестский городской методический центр», Брест, Беларусь, e-mail: br.otkul@mail.ru

Реферат

Здание бывшего монастыря бернардинок на территории Волынского укрепления Брестской крепости включено в Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь и относится к категории «1», которые имеют международное значение.

В статье приведены основные результаты технической экспертизы строительных конструкций бывшего монастыря бернардинок. Описано конструктивное решение фундаментов, стен и перекрытий. Установлены основные этапы строительства и реконструкции монастыря.

Получены экспериментальные данные о прочностных характеристиках камня керамического клинкерного пустотелого с горизонтальным расположением пустот и полосовой стали при изгибе и сжатии. Результаты могут быть использованы при восстановлении разрушенных и усилении поврежденных конструктивных элементов не только здания монастыря, но и других исторических зданий на территории Брестской крепости.

Ключевые слова: памятники архитектуры, бернардинский монастырь, камень керамический, раствор, затяжка, фундаменты, прочность, консервация.

ANALYSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE BUILDING STRUCTURES OF THE FORMER BERNARDINE MONASTERY ON THE TERRITORY OF THE BREST FORTRESS

A. B. Shuryn, V. L. Shevtchuk, V. N. Derkach, V. M. Terletski

Abstract

The building of the former Bernardine monastery on the territory of the Volyn fortification of the Brest Fortress is included in the State List of Historical and Cultural Values of the Republic of Belarus and belongs to the category "1", which are of international importance.

The article presents the main results of the technical examination of the building structures of the former Bernardine monastery. The constructive solution of foundations, walls and ceilings is described. The main stages of construction and reconstruction of the monastery have been established.

Experimental data on the strength characteristics of ceramic clinker hollow stone with horizontal arrangement of voids and strip steel during bending and compression have been obtained. The results can be used to restore destroyed and strengthen damaged structural elements not only of the monastery building, but also of other historical buildings on the territory of the Brest Fortress.

Keywords: architectural monuments, bernardine monastery, brick, mortar, tightening, foundations, strength, conservation.

Введение

Среди многочисленных проблем современного градостроительства проблема сохранения исторического наследия занимает одно из ведущих мест. Исключительно важное значение при этом приобретают работы по исследованию и оценке технического состояния сохранившихся каменных зданий и сооружений, представляющих культурно-историческую ценность.

Необходимость работ по ремонту и усилению строительных конструкций исторических зданий чаще всего связана с восстановлением несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций, сниженных из-за повреждений, вызванных воздействиями окружающей среды, такими как коррозия и деструкция строительных материалов, ошибками при эксплуатации, а также случайными воздействиями (пожар, взрыв). Назначить эффективные и экономичные методы ремонта и усиления поврежденных конструкций можно только при наличии данных об особенностях конструктивных решений обследуемого здания, прочностных и деформативных характеристиках материалов несущих конструкций.

В настоящей статье приведены результаты обследования руин бывшего монастыря бернардинок, которые размещены на территории Волынского укрепления Брестской крепости. Данный памятник архитектуры включен в Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь [1, 2]. Этот объект относится к историко-культурным ценностям категории «1», которые имеют международное значение. К данной категории в Республике Беларусь относятся 42 объекта, среди них – комплекс иезуитского

коллегиума в г. Полоцке Витебской области, фрагменты Новоградского замка и т. д. [3].

Историческая справка

Бернардинский комплекс, состоящий из монастырей бернардинцев и бернардинок, их костелов, мост и площадь, создавал уникальный целостный градостроительный ансамбль. Располагался на Замухавецком предместье.

Бернардинцы появились на территории г. Брест-Литовска в 1604 г. благодаря приглашению луцкого бискупа Мартина Шишковского, отдавшего монахам свой участок с домом в Волынском предместье и построившего для них часовню. В 1605 г. в городе были построены деревянные костел и монастырь. На щедрые пожертвования канцлера Великого княжества Литовского Льва Сапег и синдика бернардинского конвента Яна Галемского началось строительство каменного костела мужского бернардинского монастыря [4].

В 1607 г. возведены деревянные женский монастырь и костел Св. Дороты, которые в XVIII в. были перестроены в каменные [4] и представляли собой однефоровую базилику с элементами «виленского барокко» [5]. Две четырехъярусные башни, основной объем которых скрывался в основном помещении костела, завершали главный фасад здания. В костеле было шесть позолоченных алтарей. Золочением главного из них занимался брестский художник И. Мисенгилевич. Пол в костеле был сделан из кирпича, перед великим алтарем – из дерева [6].

Во время войны со шведами 1654–1657 гг. костел бернардинцев был разобран для укрепления замка. Гетман Великого княжества Литовского Павел Сапега возместил монахам ущерб, выделив из казны 80 тыс. злотых на восстановление костела. По указу короля Речи Посполитой Яна II Казимира монахи ордена бернардинцев стали получать от брестских мещан ежегодно по 500 злотых [6].

В 1680 г. костел бернардинцев был отстроен заново в виде типичного для Беларуси трехнефного храма в стиле барокко со скульптурой Христа в арочной нише над входом. Венчала здание четырехъярусная башня с колокольной. В семи алтарях были установлены скульптуры святых Франциска, Антония, Клары. Орнаментальную работу на амвоне и алтаре костела выполнял резчик Булавский. Многоцветные фрески на стенах и сводах костела расписывали А. Деламарс, И. Мисенгилевич, Б. Мазуркевич. В подземельях костела были похоронены его основатели, покровители: Петр Патеи, Ян Галемский, Александр Звез, Мартиан Тризна, Бернард Арагон [6, 7].

Здание монастыря бернардинцев, построенное в стиле типичного барокко, постепенно сложилось из трех функциональных зон: культовой, жилой (кельи монахов, трапезная), производственной (пекарня, кухня, кладовая) [5, 6].

До наших дней частично сохранились женский монастырь, подземелья и фундамент отдельных частей мужского монастыря (рисунок 1).

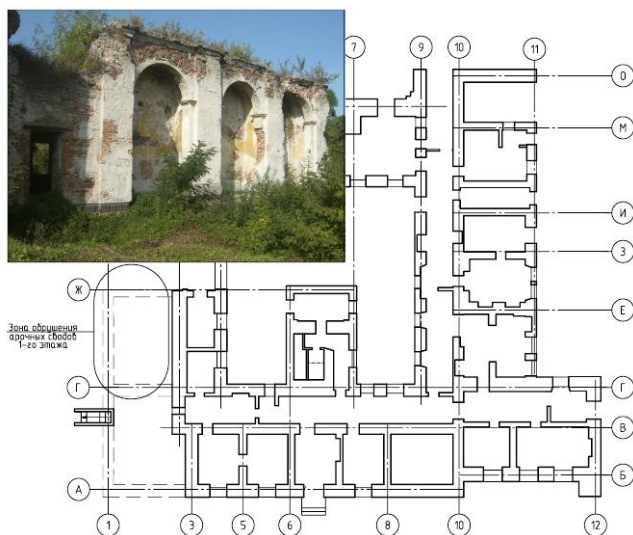


Рисунок 1 – План 1-го этажа (фасад в осях 9-1/Н)

Здание монастыря бернардинок, возведенное в 1780 г., так же как и здание монастыря бернардинцев, состояло из трех функциональных зон: культовой, жилой (кельи монахинь, трапезная), производственной (пекарня, кухня, кладовая). Квадратный внутренний двор монастыря бернардинок занимал сад [5].

После утверждения плана строительства крепости на месте города Брест-Литовска с 1833 г. начались массовые земляные работы. Великолепные постройки старого города были уничтожены или приспособлены для военных целей. Монастыри бернардинок и бернардинцев были переоборудованы по проекту архитектора Мордвинова. В них разместился названный в честь цесаревича Александровский кадетский корпус. После перевода корпуса в 1854 г. в Москву бывшие культовые сооружения до 1915 г. использовались как военный госпиталь для воинских частей, располагавшихся в Брест-Литовской крепости [8]. В 1921–1939 гг. данные здания остались в рамках прежней специализации [9].

Накануне Великой Отечественной войны в этих сооружениях располагался Брестский военный госпиталь № 2396 [9]. После Великой Отечественной войны поврежденные здания госпиталя находились на месте дислокации воинских частей. Келейный корпус бывшего монастыря бернардинок использовался военными как столовая. После 1990 г. руинированное сооружение больше не эксплуатировалось [7, 10].

Результаты технической экспертизы

На момент обследования в здании сохранились только стены 1-го этажа с перекрытиями, перекрытия подвальных помещений,

стены подвала, а также фундаменты. Стены второго этажа сохранились частично (рисунок 1).

Самой старой частью здания являются фундаменты в осях Г-Ж/1, которые можно отнести к начальному этапу строительства – конец XVII века (рисунок 1). Фундаменты выполнены из крупного бута (200–500 мм) с тщательной расщепкой, трамбованием и качественно выполненной заливкой раствором каждого ряда камней. Следует отметить высокое качество кладки фундаментов по плотности занимаемого буюм пространства, подгонку бута, вертикальность граней. Горизонтальная гидроизоляция фундаментов отсутствует (рисунок 2).



Рисунок 2 – Бутовая кладка фундамента XVII века (по оси 1/Г-Ж)

Наружные и внутренние стены, арочные своды и перекрытия выполнены из полнотелого красного обожженного кирпича М75 на известково-песчаном растворе М15 (рисунок 1). На отдельных участках, вследствие перепланировок внутренних стен и перегородок в XVIII и XIX вв. кладка выполнена из другого кирпича марки М75 на растворе М25.

Перекрытия 1-го этажа и над подвалом выполнены в основном в виде крестовых сводов. Необходимо отметить, что для восприятия возникающего в кладке кирпичных сводов распора в поддерживающих их подпружинных арках были применены железные затяжки из кованной стали прямоугольного сечения $b \times h = (22...24) \times (40...44)$ (рисунок 3). Затяжки установлены выше уровня пят арок, а их концы заделаны в кладку несущих стен с наружной анкерровкой (шпильки выведен за стену здания). Указанные затяжки воспринимают лишь часть теоретического полного распора, т. е. самостоятельно не гарантируют неподвижность пят арок. В качестве внутренних (дополнительных) связей затяжки препятствуют деформации наружу боковых участков сводов и провису замковой их части.

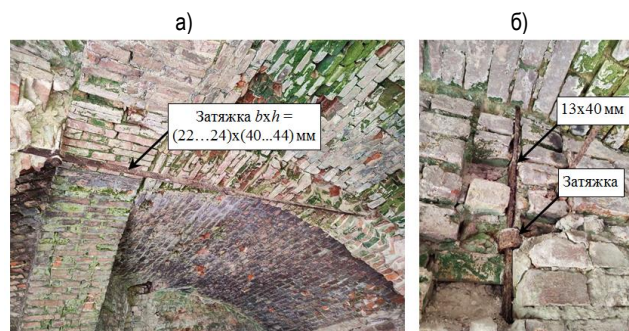
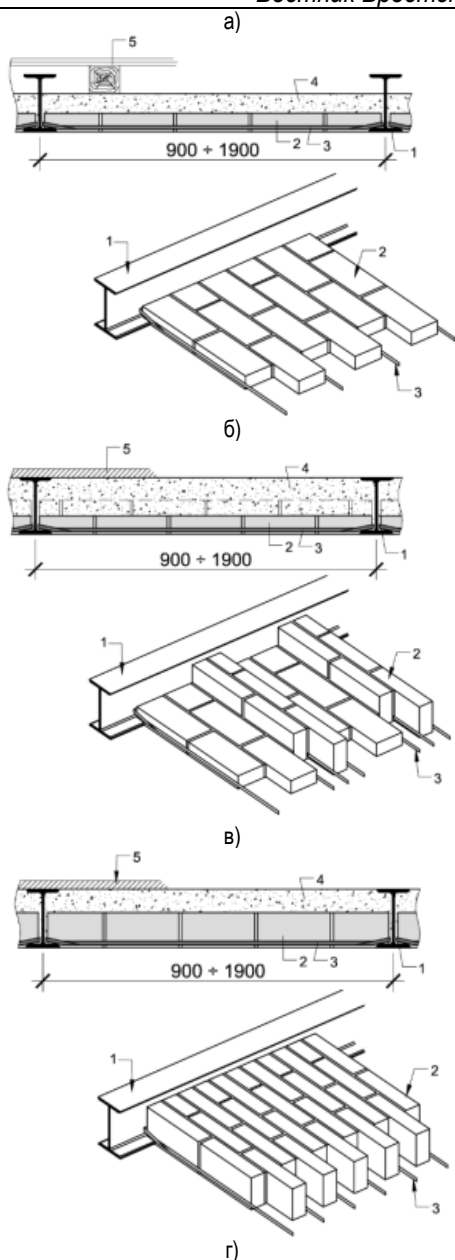


Рисунок 3 – Армирование обрушившейся подпружинной арки железной затяжкой (а) и анкерровка затяжки в кирпичной стене (б)

В (20...30)-е годы XX века в результате перепланировки часть перекрытий была выполнена в виде плоских перекрытий из керамического пустотелого камня, армированных полосовой сталью, установленной в растворные швы. Данный вид перекрытий был запатентован немецким инженером J.F. Klein в 1892 г. [12]. В зависимости от величины воспринимаемой нагрузки им было разработано три типа армокирпичных перекрытий: легкий, средний и тяжелый (рисунок 4а...4в).



1 – двутавровая балка; 2 – керамический камень; 3 – армирующий элемент; 4 – засыпка; 5 – пол
а) легкое; б) среднее; в) тяжелое;
г) общий вид обследуемого перекрытия

Обследуемое перекрытие выполнено по схеме, показанной на рисунке 4в, с применением кладки из керамических камней с горизонтальными пустотами, растворные швы между которыми армировались полосовой сталью сечением –25х2 мм (рисунок 4в).

Испытания аутентичного керамического камня и полосовой стали, отобранных в Кобринском укреплении мемориального комплекса «Брестская крепость-герой» с целью определения их прочностных характеристик, проведены в испытательной лаборатории филиала РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр. Результаты испытаний прочностных характеристик керамического камня с горизонтальными пустотами при изгибе и сжатии приведены в таблицах 1 и 2 соответственно. Результаты испытаний по определению временного сопротивления (предела прочности) полосовой стали представлены в таблице 3, диаграммы испытаний – на рисунке 4.

Таблица 1 – Результаты испытаний керамических камней на изгиб

№ п/п	Общий вид образца	Геометрические размеры, мм			Наибольшая нагрузка F_i , Н	Прочность при изгибе f_b , Н/мм ²
		Расстояние между осями опор l	ширина b	высота h		
1		200	120	70,0	5400	2,76
2		200	120	67,5	4800	2,63
3		200	125	67,4	8200	4,33
4		200	125	64,8	8200	4,69
5		200	120	65,0	4000	2,37
Среднее значение:		200	122	66,9	6120	3,35
Расширенная неопределенность величины прочности при изгибе ($k = 1,65$, $P = 95\%$): $\pm 0,80$ Н/мм ²						

Таблица 2 – Результаты испытаний керамических камней на сжатие

№ п/п	Общий вид образца	Геометрические размеры, мм			Площадь F_i , мм ²	Наибольшая нагрузка F_i , Н	Прочность при сжатии f_b , Н/мм ²
		длина d	ширина b	высота h			
1		120	84	148	10080	42800	4,2
2		120	102	142	12240	35000	2,9
3		125	100	142	12500	27000	2,2
4		125	110	140	13750	38200	2,8
5		120	128	135	15360	44900	2,9
Среднее значение:		122,0	104,8	141,4	12786	37580	3,0
Расширенная неопределенность величины прочности при сжатии ($k = 1,65$, $P = 95\%$): $\pm 0,53$ Н/мм ²							

В представленной на испытании выборке камня керамического клинкерного пустотелого с горизонтальным расположением пустот среднее значение прочности при изгибе составило 3,35 МПа, среднее значение прочности при сжатии составило 3,0 МПа.

Таблица 3 – Результаты испытаний по определению временного сопротивления (предела прочности) полосовой стали

№ п/п	Геометрические размеры, мм			Площадь F_0 , мм ²	Наибольшая нагрузка P_{max} , Н	Временное сопротивление f_{uk} , Н/мм ²
	длина l	ширина b	толщина t			
1	340	28	2,0	56	12,04	215
2	340	28	2,0	56	17,08	305
3	340	28	2,0	56	14,14	252,5
Среднее значение:	340	28	2,0	56	14,42	257,5
Расширенная неопределенность величины прочности при сжатии ($k = 1,65$, $P = 95\%$): $\pm 43,09$ Н/мм ²						

В представленной на испытание выборке стальной полосы, отобранной из швов кладки междуэтажного перекрытия, временное сопротивление (предел прочности) $f_{uk} = 257,5$ МПа.

Рисунок 4 – Конструкция плоских армокаменных перекрытий [13]

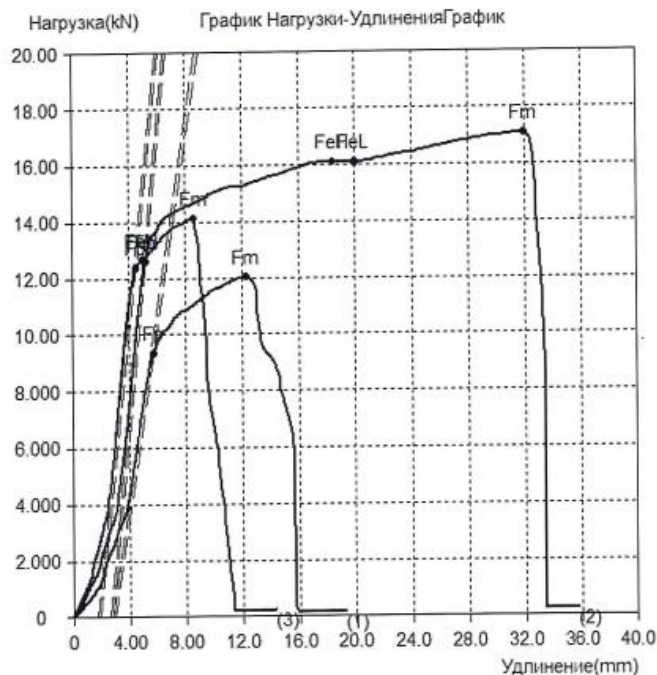


Рисунок 4 – Диаграммы испытаний полосовой стали

Полученные экспериментальные данные о прочностных характеристиках камня керамического клинкерного пустотелого с горизонтальным расположением пустот и полосовой стали позволили подтвердить достаточную несущую способность перекрытия и отсутствие опасности обрушения и могут быть использованы при восстановлении разрушенных и усилении поврежденных конструктивных элементов не только здания монастыря, но и других исторических зданий на территории Брестской крепости.

Установлено, что в результате длительных температурно-влажностных воздействий на конструкции стен, перекрытий и фундаментов (вследствие отсутствия кровли) имеются следующие дефекты и повреждения:

- трещины в кладке с шириной раскрытия до 30 мм;
- локальные обрушения и разрушения кладки;
- разрушение кирпичной кладки над оконными и дверными проемами;
- размораживание кирпичной кладки на глубину до 80...120 мм;
- биоразрушение кладки корневой системой деревьев;
- выпадение кирпича из клинчатых перемычек и их частичное разрушение;
- разрушение лицевого слоя кирпичной кладки.

Следует отметить, что часть кирпичных сводов первого этажа в осях 1-3/Г-Ж (рисунок 1) обрушилась, перегрузив тем самым перекрытие над подвалом и фундаменты. В результате в перекрытии над подвалом появились чрезмерные прогибы (исчерпание группы эксплуатационной пригодности), что чревато их обрушением (рисунок 2).

Заключение

Для сохранения здания бывшего монастыря бернардинок, находящегося на территории Волынского укрепления Брестской крепости, как историко-культурной ценности требуется, в первую очередь, выполнить работы по его консервации. Для этого необходимо:

- разгрузить находящееся в аварийном состоянии перекрытие над подвалом в осях 1-3/Г-Ж от обрушившихся кирпичных арочных сводов и перекрытий первого этажа;
- выполнить выкорчевку кустарников и деревьев, очистить стены и перекрытия от грунта;
- разработать мероприятия по отведению осадков от стен и перекрытий и восстановить отмостку вокруг здания;
- разработать временное (до начала работ по консервации) усиление конструкций в местах их возможного обрушения.

В случае замедления выполнения работ по консервации многие фрагменты здания могут быть утеряны навсегда.

Полученные экспериментальные данные о прочностных характеристиках камня керамического клинкерного пустотелого с горизонтальным расположением пустот и полосовой стали, позволили подтвердить достаточную несущую способность перекрытия и отсутствие опасности обрушения. Результаты могут быть использованы при восстановлении разрушенных и усилении поврежденных конструктивных элементов не только здания монастыря Бернардинок, но и других исторических зданий на территории Брестской крепости.

Список цитированных источников

1. Кодэкс Рэспублікі Беларусь аб культуры 20 ліпеня 2016 г. № 413-3 : прыняты Палатай прадстаўнікоў 24 чэрвеня 2016 года : Адобраны Саветам Рэспублікі 30 чэрвеня 2016 года // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. Центр правовой информации Республики Беларусь. – Минск, 2016.
2. Аб наданні статусу і катэгорыі гісторыка-культурнай каштоўнасці, пазбаўленні статусу гісторыка-культурнай каштоўнасці і ўнясенні змяненняў і далаўненняў у пастанову Савета Міністраў Рэспублікі Беларусь ад 14 мая 2007 г. № 578 : Пастанова Савета Міністраў Рэспублікі Беларусь 21 верасня 2010 г. № 1351 / Кодэкс, законы і законодательные документы Республики Беларусь. – Минск, 2010.
3. Понятие и состав историко-культурного наследия Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Электронная библиотека учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» – Режим доступа : <https://elib.grsu.by/katalog/467552pdf.pdf?d=true>.
4. Брест : путешествие сквозь века / сост. И. Б. Лавровская, А. П. Кондак ; ред. Л. В. Кравченко. – Минск : Тарпей прінтінг хаус, 2003. – 21 с.: ил.
5. Квитницкая, Е. Д. Монастыри Бреста XVII-XVIII вв. / Е. Д. Квитницкая // Архитектурное наследие. – М., 1979. – № 27. – С. 108–121.
6. Памяць : Гіст.-дакум. хроніка Брэста : у 2 кн.– Минск: БЕЛТА, 1997. – Кн. 1. – 576 с.
7. Заключение по Х/Д № 21 / 134 «Детальное обследование строительных конструкций историко-культурной ценности «руины управления Брестского военного госпиталя № 2396 (бывший монастырь бернардинок)». – Брест : БрГТУ – 2021. – 53 с.

8. Брест : Энциклопедический справочник. – Минск : Белорусская советская энциклопедия им. П. Бровки, 1987. – 408 с.
 9. Брестская крепость. Война и мир / автор концепции и текста А. Суворов; фото А. Суворов [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – Брест : Полиграфика, 2015. – 256 с. : ил.
 10. Воробей, А. В. Монастырь бернардинок на Госпитальном острове Брестской крепости / А. В. Воробей // Вестник Брестского государственного технического университета : Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 11–14.
 11. Техническое состояние зданий и сооружений. Основные требования : СН 1.04.01-2019. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Бел, 2021. – 68 с.
 12. Ahnert, R. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960. Band 2. 7 Auflage / R. Ahnert, K. H. Krause. – Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014. – 225 p.
 13. Drobiec, L. Uszkodzenia i sposoby napraw balkonów oraz stropów z belkami stalowymi i murowanym wypełnieniem / L. Drobiec // Awarie Budowlane. Zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje. – Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2017. – P. 273–282.
 4. Brest : puteshestvie skvoz' veka / sost. I. B. Lavrovskaya, A. P. Kondak ; red. L. V. Kravchenko. – Minsk : Tarpej printing haus, 2003. – 21 s.: il.
 5. Kvitnickaya, E. D. Monastyri Bresta XVII-XVIII vv. / E. D. Kvitnickaya // Arhitekturnoe nasledstvo. –M., 1979. – № 27. – S. 108–121.
 6. Pamyac' : Gist-dakum. hronika Bresta : u 2 kn.– Minsk.: BELTA, 1997. – Kn. 1. – 576 s.
 7. Zaklyuchenie po H/D № 21 / 134 «Detal'noe obsledovanie stroitel'nykh konstrukcij istoriko-kul'turnoj cennosti «ruiny upravleniya Brestskogo voennogo gospiatalya № 2396 (byvshij monastyr' bernardinok)». – Brest : BrGTU – 2021. – 53 s.
 8. Brest : Enciklopedicheskij spravochnik. – Minsk : Belorusskaya sovet'skaya enciklopediya im. P. Brovki, 1987. – 408 s.
 9. Brest'skaya krepost'. Vojna i mir / avtor koncepcii i teksta A. Suvorov; foto A. Cuvorov [i dr.]. – 4-e izd., pererab. i dop. – Brest : Poligrafika, 2015. – 256 s. : il.
 10. Vorobej, A. V. Monastyr' bernardinok na Gospital'nom ostrove Brestskoj kreposti / A. V. Vorobej // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta : Stroitel'stvo i arhitektura. – 2012. – № 1. – S. 11–14.
 11. Tekhnicheskoe sostoyanie zdaniy i sooruzhenij. Osnovnye trebovaniya : SN 1.04.01-2019. – Минск : Minstrojarchitektury Resp. Bel, 2021. – 68 s. Ahnert, R. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960. Band 2. 7 Auflage / R. Ahnert, K.H. Krause. – Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.–225 s.
 12. Ahnert R. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960. Band 2. 7 Auflage / R. Ahnert, K. H. Krause. – Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014. – 225 p.
 13. Drobiec, L. Uszkodzenia i sposoby napraw balkonów oraz stropów z belkami stalowymi i murowanym wypełnieniem / L. Drobiec // Awarie Budowlane. Zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje. – Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2017. – P. 273–282.
- References**
1. Kodeks Respubliki Belarus' ab kul'tury 20 lipenya 2016 g. № 413-Z : prynyaty Palataj pradžajnikoŭ 24 chervenya 2016 goda : Adobranay Savetam Respubliki 30 chervenya 2016 goda // ETALON. Zakonodatel'stvo Respubliki Belarus' / Nac. Centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – Minsk, 2016.
 2. Ab nadanni statusu i kategorij gistoryka-kul'turnaj kashtoŭnasci, pazbaŭlenni statusu gistoryka-kul'turnaj kashtoŭnasci i ūnyasenni zmyanennyja i dapaŭnennyja u pastanovu Saveta Ministraŭ Respubliki Belarus' ad 14 maya 2007 g. № 578 : Pastanova Saveta Ministraŭ Respubliki Belarus' 21 verasnya 2010 g. № 1351 / Kodeksy, zakony i zakonodatel'nye dokumenty Respubliki Belarus'. – Minsk, 2010.
 3. Ponyatie i sostav istoriko-kul'turnogo naslediya Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs] / Elektronnaya biblioteka uchrezhdeniya obrazovaniya «Grodenskij gosudarstvennyj universitet imeni YAnki Kupaly» – Rezhim dostupa : <https://elib.grsu.by/katalog/467552pdf.pdf?d=true>.

Материал поступил 28.11.2022, одобрен 10.02.2023, принят к публикации 10.02.2023

УДК 621.383.52

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА AlGa_n ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Н. Н. Ворсин¹, А. А. Гладыщук², Т. Л. Кушнер³, Н. П. Тарасюк⁴, С. В. Чугунов⁵

¹ К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры физики
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vorsin@hotmail.com

² К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры физики
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: phys.gaa@tut.by

³ К. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой физики
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: kushnertl@mail.ru

⁴ Старший преподаватель кафедры физики
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ntarasiuk@tut.by

⁵ Старший преподаватель кафедры физики
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: chugunovsv@ya.ru

Реферат

Тройное соединение AlGa_n с шириной запрещенной зоны от 3,4 до 6,2 эВ является перспективным материалом для построения различных электронных приборов: диодов, транзисторов, лазеров, СВЧ-микросхем. Замена кремния на нитрид галлия позволяет в несколько раз повысить рабочую температуру, граничную частоту, уменьшить в несколько раз потери переключения и проводимости в силовых приборах. Необходимым элементом освоения новых электронных устройств является компьютерное моделирование в них физических процессов. В настоящей работе с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics разработана модель гетеропереходного полевого транзистора на основе Al_xGa_{1-x}N, включающая его вольт-амперную характеристику и другие параметры.

Ключевые слова: гетеропереходный полевой транзистор, нитрид галлия, нитрид алюминия, диффузионно-дрейфовая модель, поляризация, вольт-амперная характеристика.

SIMULATION AND DESIGN AlGa_n HETEROJUNCTION FIELD-EFFECT TRANSISTOR

N. N. Vorsin, A. A. Gladyschuk, T. L. Kushner, N. P. Tarasiuk, S. V. Chugunov

Abstract

AlGa_n ternary alloys with a band gap of 3.4 to 6.2 eV are promising materials for the construction of various electronic devices: diodes, transistors, lasers, microwave circuits. Replacing silicon with GaN allows several times to increase the operating temperature, the cutoff frequency, and to reduce several times the switching and conduction losses in power devices. A necessary element in the development of new electronic devices is computer modeling of physical processes in them. In this work, a model of a heterojunction field-effect transistor (FET) based on Al_xGa_{1-x}N was developed using the COMSOL Multiphysics software, including its current-voltage characteristic and other parameters.

Keywords: heterojunction field-effect transistor, gallium nitride, aluminum nitride, diffusion-drift model, polarization, current-voltage characteristic.

Введение

Гетеропереходные полевые транзисторы (далее ГПТ или в англоязычной литературе – HEMT) на основе нитрида галлия с высокой подвижностью электронов обладают хорошими характеристиками, которые обеспечиваются свойствами материала. Широкая запрещенная зона 3,4 эВ позволяет устройствам на основе GaN работать при высоких температурах. Полупроводник GaN имеет высокое значение поля пробоя 3,3 МВ/см, что является основой высоковольтных приборов на основе GaN [1, 2]. Гетеропереход на границе AlGa_n/Ga_n создает двумерный электронный газ (ДЭГ) достаточно высокой плотности (порядка 10¹³ см⁻²). Подвижность электронов, образующих ДЭГ, весьма высока. Благодаря этим качествам ГПТ на основе AlGa_n/Ga_n обладают низким сопротивлением канала, высокой плотностью тока в нем и высоким быстродействием.

Замена Si на Ga_n в силовых приборах уменьшает потери проводимости и переключения в 2–6 раз. Сложные свойства системы материалов нитрида галлия должны быть хорошо поняты, чтобы в полной мере использовать преимущества этого полупроводника в устройствах. Моделирование на основе физики полупроводников помогает в этом, показывая количественную взаимосвязь между основными свойствами материала и поведением устройства. Оптимизация устройства в экспериментальной или производственной среде чрезвычайно дорога и затратна по времени, поэтому должна быть дополнена компьютерным моделированием.

В настоящей работе описана созданная модель гетеропереходного полевого транзистора AlGa_n/Ga_n с простым плоским затвором,

наиболее подходящим для первых реализаций. Выбранные размеры транзистора позволяют использовать микронный техпроцесс.

Модель гетеропереходного полевого транзистора AlGa_n/Ga_n

Структура моделируемого транзистора показана на рисунке 1. Она состоит из барьерного слоя AlGa_n толщиной h₂, канального слоя Ga_n толщиной h₁, который через промежуточный слой AlN опирается на подложку из Al₂O₃. Толщина слоя Ga_n должна быть сравнительно большой для уменьшения напряжений в верхней его части, обусловленных несогласованием в нижней части его решетки с решеткой подложки. Из-за разности ширины запрещенной зоны барьерного и канального слоев на границе их соприкосновения образуется двумерный слой электронного газа, выполняющий роль канала транзистора.

На рисунке этот слой обозначен темно-красной линией. Над каналом расположен металлический затвор Шоттки с достаточной работой выхода (предполагается Ni). Толщина канального слоя не легированного Ga_n, обозначенная как h₁, варьировалась только на первом этапе работы с моделью. При этом выяснилось, что, если h₁ > 200 нм, ее влияние на параметры транзистора становится пренебрежимо малым. Поэтому в дальнейших расчетах использовалось значение h₁ = 400 нм. Толщина подложки h₃ в расчетах не использовалась. Надо заметить, что на практике от h₁ зависит степень прораствания в вершину канального слоя дефектов, обусловленных несогласованием его кристаллической решетки с решеткой подложки, в моделировании эти дефекты не рассматривались.

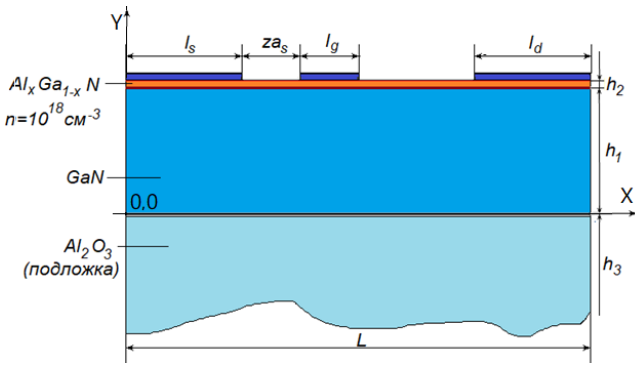


Рисунок 1 – Двумерная (X;Y) структура транзистора. Обозначены размеры – изменяемые при расчетах параметры. Толщина структуры в направлении оси Z равна 1 мкм

Методология

Модуль «Полупроводники» программного комплекса COMSOL Multiphysics базируется на диффузионно-дрейфовой модели процессов в полупроводниках, которая, видимо, справедлива для микронных и субмикронных размеров описываемых объемов. Данная модель выражается следующим набором уравнений.

Уравнение Пуассона дает связь между электрическим полем (E), концентрацией пространственного заряда (ρ) и электростатическим потенциалом (φ) [3].

$$\nabla^2 \varphi = -\nabla E = \rho / \varepsilon, \tag{1}$$

где ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость. Перенос носителей хорошо описывается дрейфово-диффузионной моделью, которая задается в виде уравнения для плотности тока:

$$J = qn\mu E + qD\nabla n, \tag{2}$$

- где μ – подвижность;
- q – величина заряда;
- n – концентрация зарядов;
- D – коэффициент диффузии.

Уравнение непрерывности используется для описания, зависящего от времени динамического поведения носителей зарядов.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - R + q\nabla J, \tag{3}$$

- где G – скорость генерации носителей;
- R – скорость рекомбинации соответственно.

Так как рассматривался стационарный режим работы, левая часть в уравнение (3) равна нулю.

Поляризация материала. Известно, что нитриды алюминия и галлия являются поляризованными материалами. При этом действуют два механизма поляризации: спонтанная, характеризуемая вектором \vec{P}^{SP} и пьезоэлектрическая, выражаемая вектором \vec{P}^{PZ} . На рисунке 2 показаны направления этих векторов. Эффекты поляризации играют важную роль в образовании ДЭГ и меры по их учету в модели являются ключевыми. Для этого использован имеющийся в COMSOL Multiphysics инструмент задания поверхностного заряда. В обоих слоях, образующих гетеропереход, действуют оба механизма поляризации. Но поскольку толщины слоев отличаются более чем в 20 раз, можно принять толстый слой GaN расслабленным, а слой AlGaN напряженным. Напряжение является растягивающим, при этом направления векторов спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, как показано на рисунке 2, совпадают.

Модуль суммарного вектора поляризации, численно равный поверхностному заряду, определяется равенством

$$P = P_{AlGaN}^{SP} + P_{GaN}^{PZ} - P_{GaN}^{SP}. \tag{4}$$

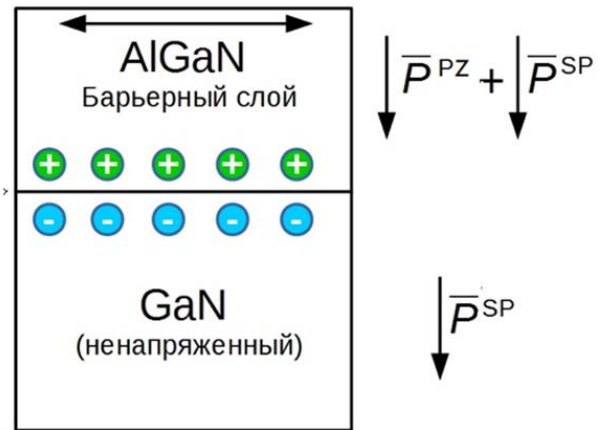


Рисунок 2 – Суммирование векторов поляризаций на гетеропереходе

Для векторов поляризаций в литературе имеются упрощенные формулы, выражающие их как функцию относительной доли алюминия в материале [4]. Подстановка данных формул в (4) дает используемое в модели выражение для величины поверхностного заряда, которая численно равна модулю вектора поляризации (измеряется в Кл/м²):

$$\sigma = [0,06095 \cdot x - 0,019 \cdot x \cdot (1 - x)]. \tag{5}$$

Легирование слоев. Барьерный слой Al_xGa_{1-x}N толщиной h₂ является источником свободных электронов для канала транзистора, поэтому он обильно легируется донорной примесью (Si) до концентрации n⁺=10¹⁸см⁻³. Канальный слой, имеющий толщину h₁, должен быть максимально чистым (нелегированным), что диктуется требованием сохранения подвижности электронов. Однако чистый GaN имеет небольшую исходную электронную проводимость. Поэтому в расчетах он полагается легированным донорной примесью, дающей концентрация свободных электронов n=10¹⁵см⁻³.

Металлические контакты. Модуль «Полупроводники» комплекса COMSOL Multiphysics содержит мини-модели контактов металла с полупроводником, что избавляет от специального их моделирования. Используются два типа контактов: невыпрямляющие контакты – для истока и стока и контакт Шоттки – для затвора. Однако высота барьера Шоттки для гетероструктуры GaN/AlGaN с напряженным слоем AlGaN отличается от значений, измеренных для их соответствующих объемных (т. е. расслабленных) аналогов. Происходит снижение высоты барьера Шоттки за счет поляризационных эффектов в гетероструктурах GaN/AlGaN. Более того, обычная теория термоэлектронной эмиссии не может быть применена из-за сильной пьезоэлектрической поляризации в напряженном слое AlGaN. Высота барьера Шоттки для контакта Ni-Al_xGa_{1-x}N уравнения модифицируется для гетероструктуры GaN/AlGaN по следующей формуле (выражается в эВ):

$$\varphi_B(Ni - Al_xGa_{1-x}N) = 0,917 + 1,784 \cdot x. \tag{6}$$

Величина электронного сродства χ – разность энергии нулевого уровня (вакуума) и дна зоны проводимости полупроводника. Данный параметр необходим для моделирования гетероперехода. Его значение для AlGaN зависит от доли алюминия и в модели определяется по эмпирической формуле [5] (выражается в эВ)

$$\chi = 4,1 - x. \tag{7}$$

Квантовые эффекты. Толщина слоя ДЭГ на гетеропереходе AlGaN/GaN сравнима или даже меньше длины волны де Бройля движущихся там электронов. Это обстоятельство требует учета квантовых эффектов в расчетах. COMSOL Multiphysics имеет для этого встроенные средства в виде подмодели системы уравнений Пуассона и Шредингера. В нашем случае движение электронов в канале транзистора может происходить только вдоль слоя ДЭГ. Поэтому результатом работы этой подмодели должна быть только величина концентрации электронов в ДЭГ, входящая в выражение (2). Квантование энергии движения в направлении, поперечном каналу, приводит к ее дискретизации и разделению зоны квантовой ямы

на счетное множество подзон. Обычно учитывается только вклад 2–3 нижних подзон. Вопрос влияния квантовых эффектов на концентрацию свободных электронов в ДЭГ исследовался отдельно.

На рисунке 3 показан типичный график зависимости концентрации свободных электронов от координаты по оси Y, направленной поперек гетероперехода. Синяя кривая относится к случаю пренебрежения эффектами квантования, красная – с учетом трех нижних подзон квантования. Видно, что учет квантовых эффектов приводит к уменьшению пика концентрации и расширению зоны ДЭГ.

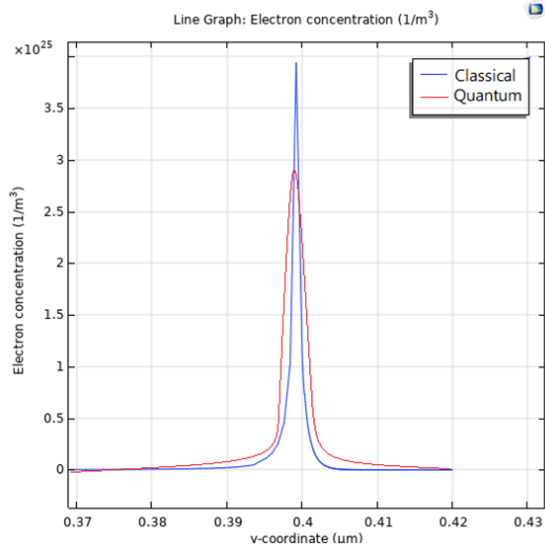


Рисунок 3 – Сравнение классической и квантовой концентрации свободных электронов в двумерном электронном газе

Думается, что этот результат – следствие погрешности расчета. Увеличение количества учитываемых подзон, вероятно, даст возрастание пика концентрации и сужением зоны ДЭГ. Однако проблемы сходимости совместного решения уравнений Пуассона и Шредингера препятствуют более точному рассмотрению. В то же время разность концентрации электронов ДЭГ, получаемых с учетом и без квантовых эффектов, оказывается небольшой и имеющей тенденцию к уменьшению с улучшением точности расчетов квантования. Из этого можно сделать вывод о том, что расчет параметров ГПТ без учета квантовых эффектов в слое ДЭГ будет вполне корректен.

Поверхностные состояния. Влияние поверхностных состояний на распределение заряда в структуре устройства может быть учтено с использованием соответствующей статистики распределения при расчете плотности заряда в уравнении Пуассона (путем включения поверхностных состояний через легированный слой). Поверхностные состояния обычно моделируются феноменологическим образом, на основе предположения о существовании их в виде акцептора и донора с определенной энергией ионизации. Возможно их ионизация на самом деле не следует предполагаемой ферми-статистике. В рассматриваемой модели мы пренебрегли особыми состояниями поверхности.

Дискретизация по конечным объемам. На поверхности раздела материалов гетероперехода имеется скачок их параметров. Разрыв может вызвать числовые проблемы, особенно для пространственной производной поляризации P_x . В нашем случае это может быть исправлено введением плавного изменения доли Al (y). Вместо этого можно использовать для дискретизации и решения уравнений метод конечных объемов, имеющийся в COMSOL Multiphysics, и выбрать прямоугольную форму сеточных элементов со стороны, параллельной границе раздела материалов.

Результаты и их обсуждение

В ходе расчета COMSOL Multiphysics запоминает огромные таблицы результатов, из которых затем можно сформировать наглядные графики зависимости одних величин от других. Показанная на рисунке 1 двумерная модель ГПТ предполагает, что зависимость всех характеристик от третьей координаты Z отсутствует. Ширина транзистора по третьей координате принята 1 мкм.

Распределение плотности свободных электронов по оси Y в центре исследуемой структуры ($x=2$ мкм) иллюстрирует образование

двумерного электронного газа. График данной зависимости показан на рисунке 4. Видно, что в очень узкой области, вблизи гетероперехода, концентрация свободных электронов возрастает до $3,9 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Это является свидетельством правильного отражения моделью физических процессов в рассматриваемой гетероструктуре.

Результаты моделирования при различных значениях доли алюминия (dol, %) в слое AlGaIn приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость концентрации электронов в двумерном электронном газе от мольной доли Al в барьерном слое

dol, %	17	21	22	23	26
n, $10^{25}, \text{ м}^{-3}$	0,50	2,75	3,10	3,90	7,10

Двумерная картина распределения электронной плотности при нулевых напряжениях стока и затвора приведена на рисунке 5. Из данной картины видно, что барьерный слой легирован донором до получения концентрации свободных электронов 10^{18} см^{-3} . По всей длине структуры (оси X) имеется область повышенной концентрации свободных электронов – узкая темно красная область, в которой концентрация электронов превышает величину 10^{19} см^{-3} . Именно эта область содержит двумерный электронный газ.

В области расположения затвора имеется узкая область, помеченная синим цветом, соответствующим концентрации свободных электронов 10^{12} см^{-3} . Таково действие контакта Шоттки. Существенная часть свободных электронов перешла из полупроводника в никелевый затвор, имеющий большую работу выхода из него электронов. Ближняя подзатворная область окрашена желтым цветом, соответствующим концентрации свободных электронов 10^{16} см^{-3} . Однако проводящий канал, образованный ДЭГ, полностью не перекрыт: под слоем желтого цвета сохранился красный, в котором концентрация электронов около 10^{18} см^{-3} .

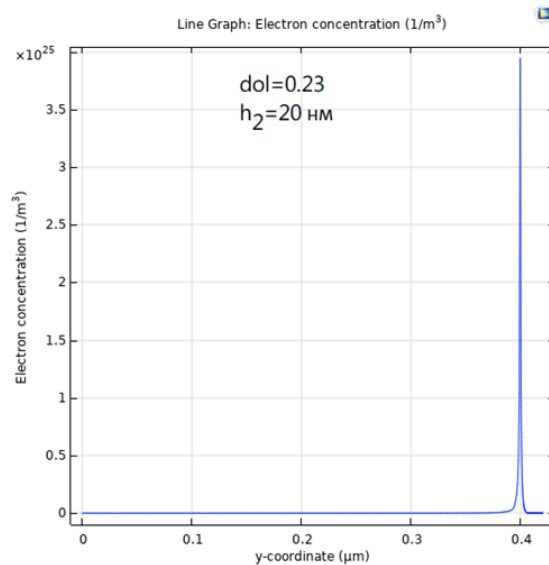


Рисунок 4 – Зависимость концентрации свободных электронов от вертикальной координаты при $h_1 = 0,4 \text{ мкм}$, $h_2 = 0,02 \text{ мкм}$, доли Al в барьерном слое $dol=0,23$

Картина распределения электронной плотности изменится после приложения к электродам транзистора напряжений стока и затвора. Рисунок 6 показывает результат подачи стокового напряжения 10 В. Вблизи правого края затвора, обращенного к стоку, произошло расширение обедненной до желтого цвета области, которая перекрыла канал транзистора. Однако концентрация электронов в этой области составляет порядка от 10^{15} см^{-3} до 10^{16} см^{-3} , что соответствует заметной проводимости канала. При увеличении стокового напряжения эта область расширяется, вследствие чего стоковый ток почти не увеличивается. Наблюдается эффект насыщения стокового тока.

На рисунке 7 показана цветовая картина распределения электронной плотности при стоковом напряжении 15 В и подаче на затвор напряжения –2 В. Видно почти полное перекрытие канала в правой части подзатворной области. При этом ток канала и ток стокового электрода будет почти нулевым.

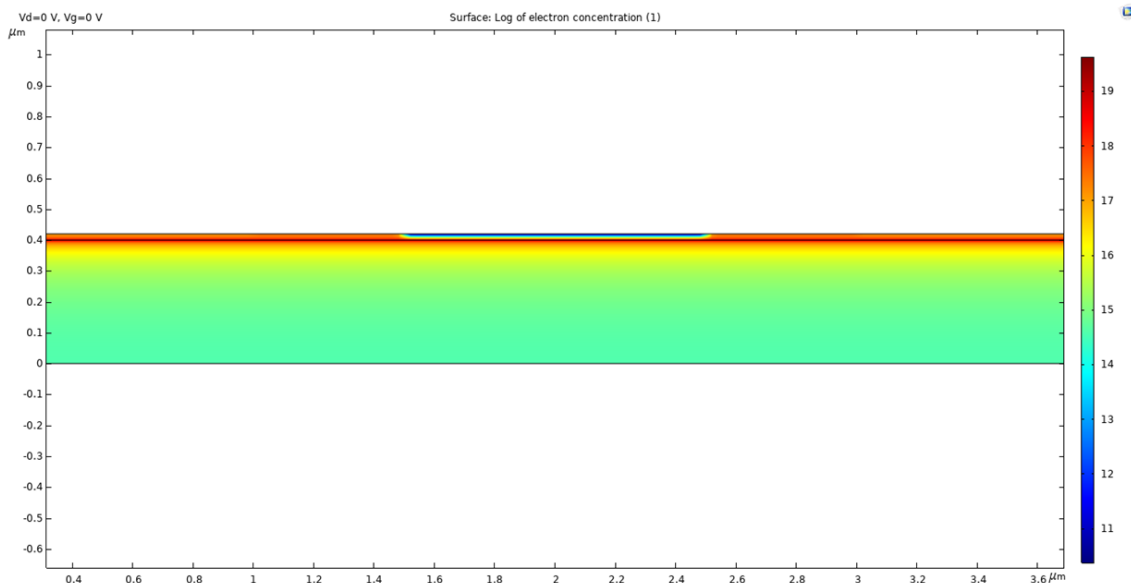


Рисунок 5 – Цветовая картина распределения концентрации свободных электронов по структуре гетеропереходного полевого транзистора при нулевых напряжениях смещения

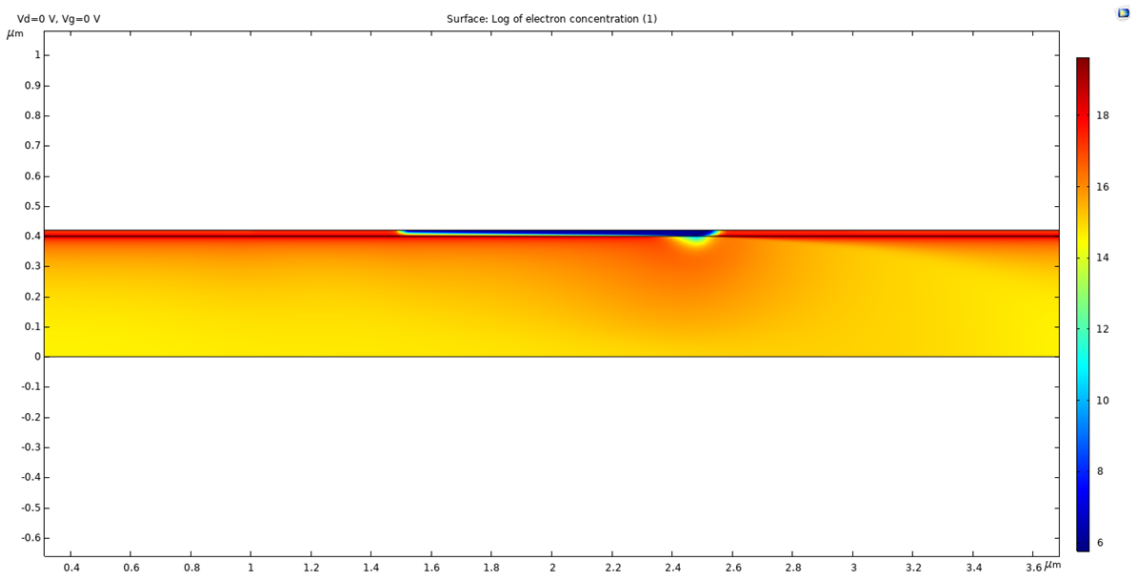


Рисунок 6 – Распределение электронной плотности при нулевом напряжении затвора и напряжении стока 10 В

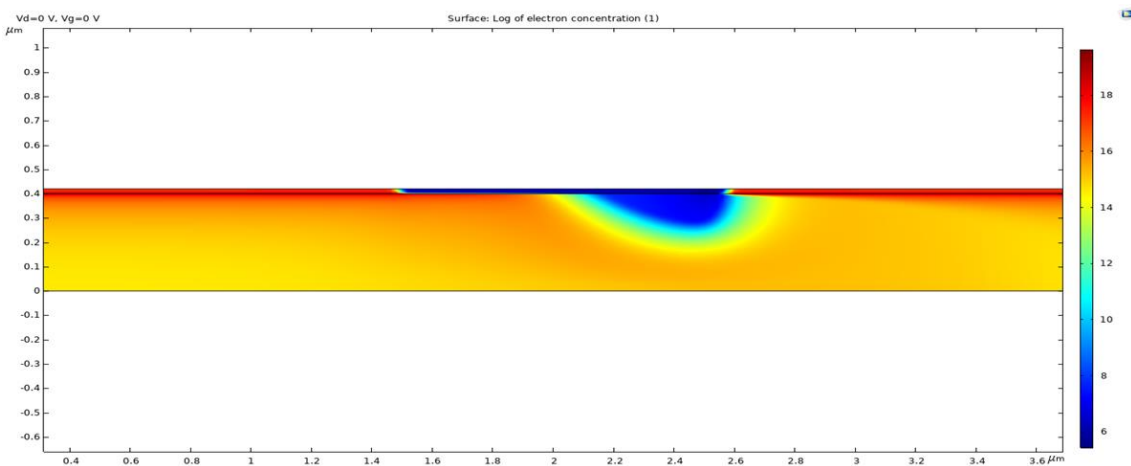


Рисунок 7 – Распределение электронной плотности при напряжении затвора -2 В и напряжении стока 15 В

Приведенные результаты расчетов свидетельствуют о работоспособности модели ГПТ и возможности получения из нее количественных характеристик транзистора, при варьировании его материалов и размеров.

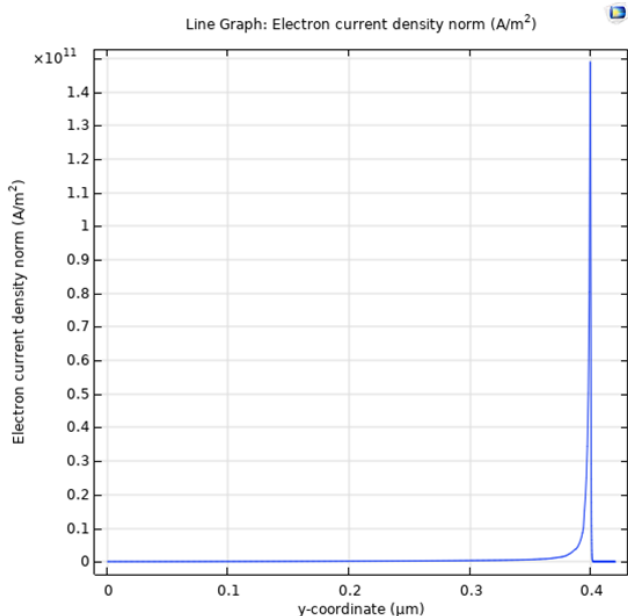


Рисунок 8 – График распределения плотности тока по высоте (оси Y) структуры транзистора

Возникает вопрос о распределении плотности тока по высоте структуры (по оси Y). На рисунке 8 показан соответствующий график, из которого видно, что весь ток сосредоточен в узкой области существования ДЭГ. Таким образом, построенная модель ГПТ правильно отражает физику процессов в нем и может быть использована для получения технических параметров транзистора.

Одним из таких параметров являются статические вольт-амперные характеристики (ВАХ), которые применяются в практике проектирования устройств, использующих транзисторы. ВАХ подразделяются на выходные, в которых выражается зависимость тока выходного электрода от напряжения на нем, входные и проходные. Последние выражают зависимость тока выходного электрода от напряжения (или тока) другого электрода. На рисунке 9 приведено семейство графиков выходных ВАХ (выходным электродом принят сток). Выходные ВАХ имеют типичную для транзисторов форму, которая характеризуется быстрым увеличением тока на начальном участке (малых напряжениях выходного электрода) и слабой зависимостью тока от напряжения при больших напряжениях на выходном электроде (область насыщения выходного тока). Построенная модель нитридного ГПТ дает ВАХ транзистора без дополнительных искусственных приемов и сшивок, используемых в [6]. Видимо, это приведет к большим затратам вычислительных ресурсов при работе модели, но и к более достоверным результатам.

Наличие графиков или таблиц ВАХ транзистора позволяет легко вычислить какой-либо малосигнальный параметр в заданной рабочей точке. Например, величина прямой проходной проводимости g_{21} , называемой крутизной проходной ВАХ, определенная по рисунку 9 в точке $v_g = -1$ В – напряжение затвора, $v_d = 10$ В – напряжение стока составляет $g_{21} = 0,55$ мА/В. Столь скромная величина g_{21} не должна приводить к скептическим выводам. Дело в том, что рассматривается транзистор с толщиной по оси Z равной 1 мкм. При увеличении толщины, например, до 1 мм стоковый ток и крутизна проходной ВАХ увеличатся в 1000 раз.

На рисунке 10 показано семейство графиков проходных ВАХ. Управляющим электродом считается затвор.

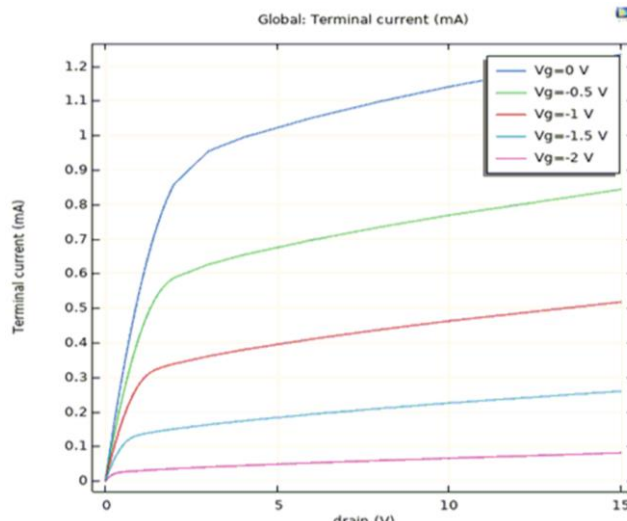


Рисунок 9 – Семейство выходных вольт-амперных характеристик моделируемого гетеропереходного полевого транзистора при $h_2 = 0,02$ мкм, $d_{ol} = 0,22$

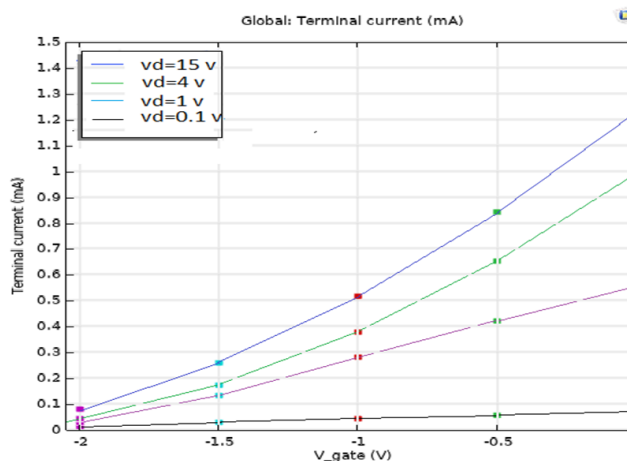


Рисунок 10 – Семейство проходных ВАХ моделируемого гетеропереходного полевого транзистора при $h_2 = 0,02$ мкм, $d_{ol} = 0,22$

Полученная модель нитридного ГПТ позволяет оценивать его характеристики при различных геометрических параметрах структуры. В частности, представляют интерес влияние толщины барьерного слоя – h_2 , длины затвора – l_g и положения затвора в пространстве между стоком и истоком – z_{as} .

Таблица 2 иллюстрирует влияние толщины барьерного слоя на концентрацию электронов в ДЭГ и величину прямой проходной проводимости транзистора. Рост концентрации ДЭГ с увеличением h_2 и резкое уменьшение крутизны ВАХ вполне ожидаемы: удаление от слоя ДЭГ затвора уменьшает его влияние на концентрацию электронов и каналный ток. Однако модель позволяет получить количественные оценки этого влияния.

Таблица 2 – Влияние толщины барьерного слоя на максимальную концентрацию электронов ДЭГ и крутизну ВАХ

Толщина AlGaN h_2 , нм	Максимальная концентрация электронов, 10^{25} , $1/m^3$	g_{21} , мА/В $V_g = -1$ В $V_d = 10$ В
18	3,8	0,75
20	3,9	0,55
22	4,1	0,41
30	4,3	0,18

В таблице 3 показано влияние длины затвора и его положения относительно истока на величину прямой проходной проводимости. Эти результаты нельзя назвать ожидаемыми. Из них следует, что,

уменьшая длину затвора, мы увеличиваем значения крутизны ВАХ в данной рабочей точке. С уменьшением длины затвора, конечно, будет уменьшаться время пролета под ним электронов и электроёмкость затвор-канал. И то, и другое способствуют улучшению частотных характеристик в СВЧ области. В данной работе частотные параметры ГПТ не рассматриваются.

Из таблицы 3 также видно, что смещение затвора к истоку несколько увеличивает крутизну ВАХ. Это обстоятельство нуждается в уточнении, но оно было замечено в [2], где моделировался ГПТ с Т-образным затвором.

Таблица 3 – Влияние длины затвора и его положения на величину прямой проходной проводимости в точке $V_g = -1$ В, $V_d = 10$ В

Длина затвора, мкм	g_{21} , мА/В
0,25 ($z_{as}=0,5$)	1,280
0,5 ($z_{as}=0,5$)	0,969
0,75 ($z_{as}=0,5$)	0,756
1,0 ($z_{as}=0,5$)	0,550
1,0 ($z_{as}=0,25$)	0,719
1,0 ($z_{as}=0,75$)	0,558

Заключение

Созданная в COMSOL Multiphysics модель нитридного гетеропереходного полевого транзистора дает правдоподобные результаты и позволяет оптимизировать изготовление таких приборов по параметрам размеров и легирования областей. Мультифизичность среды COMSOL Multiphysics должна позволить получать на основе созданной модели электрические, тепловые и другие характеристики гетеропереходного полевого транзистора. В настоящей работе не затрагивается вопрос частотных параметров транзистора, поскольку не задаются необходимые для этого величины: скорость движения электронов под затвором, сопротивления контактов, статистика дефектов решетки канального слоя. По мере накопления данных об этих параметрах они могут вводиться в модель и давать соответствующие результаты.

Список цитированных источников

1. Куэй, Р. Электроника на основе нитрида галлия: пер. с англ. / Р. Куэй; под ред. А. Г. Васильева. – Москва: Техносфера, 2011. – 592 с.
2. Zine-eddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications / T. Zine-eddine, H. Zahra, M. Zitouni // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2019. – Vol. 4, № 1. – P. 180–187.
3. Введение в физику полупроводников : пер. с англ. / под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 2011. – 430 с. : ил.
4. Исследование поляризации нитридных соединений (Al, Ga, AlGa)N и зарядовой плотности различных интерфейсов на их основе / И. А. Супрядкина [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Том 47, вып. 12. – С. 1647–1652.
5. Mizuno, I., Nihashi, T., Nagai, T., Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode / I. Mizuno, T. Nihashi, T. Nagai, // Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. – 2008. – Vol. 6945 IN.
6. ATLAS, 2D device simulator, SILVACO International, Santa Clara, User's Manual. – 2019.

References

1. Kuej, R. Elektronika na osnovе nitridа galliya: per. s angl. / R. Kuej; pod red. A. G. Vasil'eva. – Moskva: Tekhnosfera, 2011. – 592 s.
2. Zine-eddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications / T. Zine-eddine, H. Zahra, M. Zitouni // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2019. – Vol. 4, № 1. – R. 180–187.
3. Vvedenie v fiziku poluprovodnikov : per. s angl. / pod red. V. L. Bonch-Bruevicha. – Moskva : Izd-vo inostrannoј literatury, 2011. – 430 s. : il.
4. Issledovanie polarizacij nitridnyh soedinenij (Al, Ga, AlGa)N i zaryadovoj plotnosti razlichnyh interfejsov na ih osnove / I. A. Supryadkina [i dr.] // Fizika i tekhnika polupro-vodnikov. – 2013. – Tom 47, vyp. 12. – S. 1647–1652.
5. Mizuno, I., Nihashi, T., Nagai, T., Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode / I. Mizuno, T. Nihashi, T. Nagai, // Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. – 2008. – Vol. 6945 IN.
6. ATLAS, 2D device simulator, SILVACO International, Santa Clara, User's Manual. – 2019.

Материал поступил 28.02.2023, одобрен 05.03.2023, принят к публикации 06.03.2023

ТРЕХОСЕВОЙ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СИЛ РЕЗАНИЯ И ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Д. А. Довгяло¹, К. В. Корба², С. Н. Абраменко³

¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой энергетики и электроники
УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: d.dovgialo@psu.by

² М. т. н., УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»,
Новополоцк, Беларусь, e-mail: korba79@mail.ru

³ Старший преподаватель кафедры энергетики и электроники
УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: s.abramenko@psu.by

Реферат

Разработана конструкция трехкомпонентного силоизмерительного датчика для исследования процессов, протекающих при высокоскоростной обработке (ВСО) конструкционных материалов на станках фрезерной группы. Из опыта эксплуатации системы измерения и регистрации сил резания на базе датчика УДМ-600 сформулированы технические требования к конструкции спроектированного датчика. Произведен обоснованный анализ и выбор материалов, а также комплектующих датчика. Изготовлен опытный образец датчика, проведены его испытания на станке AG-400.

Ключевые слова: измерение сил резания, датчик, высокоскоростная обработка, тензорезистор.

THREE-AXIS FORCE MEASURING SENSOR OF THE SYSTEM FOR MONITORING CUTTING FORCES AND PROCESSES OCCURRING DURING HIGH-SPEED PROCESSING

D. A. Dauhiala, K. V. Korba, S. N. Abramenska

Abstract

The design of a three-component force measuring sensor has been developed to study the processes occurring during high-speed processing of structural materials on milling machines. From the experience of operating a system for measuring and registering cutting forces based on the UDM-600 sensor, technical requirements for the design of the designed sensor are formulated. A reasonable analysis and selection of materials, as well as sensor components, was made. A prototype of the sensor was made, its tests were carried out on the AG-400 machine.

Keywords: measurement of cutting forces, sensor, high-speed processing, strain gauge.

Введение

Определение технических характеристик процессов механической обработки изделий из металлов и сплавов относится к важной производственной задаче. Правильно подобранный инструмент и режимы обработки подобных изделий позволяет повысить производительность производственного процесса и сохранить целостность режущих инструментов. Наиболее опасным режимом обработки является автоколебательный режим с увеличивающейся амплитудой вибрации режущего инструмента или обрабатываемого изделия. Поэтому целью данной работы является разработка конструкции трехкомпонентного силоизмерительного датчика для исследования процессов, протекающих при высокоскоростной обработке, моделирование конструкции и испытания макетного образца на станке AG-400.

Проектирование силоизмерительного датчика

По результатам эксплуатации системы измерения сил резания, принцип работы которой описан в [1], обнаружен ряд недостатков, связанных с конструктивными особенностями динамометра-датчика УДМ-600, а именно:

1. низкая чувствительность датчика, в силу использования проводочных тензорезисторов на бумажной основе, которая с течением времени (данные датчики производились в 60–70-х годах) только ухудшилась;
2. узкая полоса пропускания 0–500 Гц [11], что недостаточно для исследования процессов, протекающих при ВСО;
3. большая монтажная высота, проблематичность закрепления исследуемого образца, что сильно ограничивает размер исследуемого образца и выбор станочного оборудования для проведения исследования (речь идет о вертикально фрезерных обрабатывающих центрах (ОЦ) с мотор-шпинделем, ограничения диктуются рабочем полем станка вдоль оси Z и системой смены инструмента);

4. низкая чувствительность в необходимом диапазоне измерения 0–1 кН. Ряд экспериментов, проведенных на УДМ-600, с использованием фрезы $\varnothing 40$ мм, с числом режущих кромок $Z = 3$, на материале Д16Т при глубине резания 2–4 мм с подачей 0,1 мм/зуб сила резания составляла до 0,5 кН. При ВСО обработке используется, как правило, мелкоразмерный инструмент (1–12 мм) с малой глубиной резания.

Исходя из экспериментальных данных, полученных при эксплуатации измерительной системы, описанной в [1], принято решение разработать и изготовить трехосевой датчик силы для исследования процессов ВСО с улучшенными техническими характеристиками. Основными техническими требованиями к разрабатываемому датчику являются:

1. измерение сил резания вдоль трех ортогональных осей X, Y и Z.
2. Диапазон измеряемых нагрузок 0–1,5 кН для каждой оси.
3. Возможность присоединения оснастки на базе универсально сборных приспособлений с пазом 8 мм (УСП-8) или другой оснастки для закрепления образцов исследуемого материала или деталей.
4. Монтажная высота в пределах 70 мм. Это обусловлено особенностями планируемого эксперимента и используемого оборудования.
5. Для параллельного измерения сил резания и вибрационных процессов, протекающих при ВСО, желательно наличие встроенного трехосевого акселерометра, оси чувствительности которого совпадают с осями измерения сил резания.
6. Низкая стоимость производства и доступность компонентов.
7. Полумостовая схема подключения чувствительных элементов в каналах датчика, что обеспечивает, с одной стороны, достаточную чувствительность, большую, чем у четверть мостовой схемы включения чувствительных элементов, однако, в отличие от мостовой схемы подключения, позволяет легко компенсировать возникший дисбаланс полумоста, образовавшийся в результате нагружения датчика устанавливаемой оснасткой и исследуемым образцом.

8. Датчик должен быть платформенного типа, т. е. чувствительные элементы значительно разнесены в пространстве, что в свою очередь позволяет в значительной степени компенсировать погрешности измерения, вызванные перемещением инструмента в пределах исследуемого объекта, закрепленного на датчике.

Выбор сделан в пользу тензорезистивной датчиковой системы, что позволяет обеспечить совместимость предлагаемой системы контроля сил резания со схемой обработки сигналов, разработанной для работы с датчиком УДМ-600. Альтернативным вариантом мог быть датчик, пьезоэлектрические чувствительные элементы используемые в датчиках фирмы «Kistler» [13]. Но этот подход крайне сложен и трудоемок, в силу сложности изготовления чувствительных элементов из пьезокерамики, а также очень сложной системой кондиционирования сигналов таких датчиков. Для практической реализации выбрана полумостовая схема включения тензорезисторов, которые образуют чувствительный элемент датчика для каждой отдельной оси.

В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к механической конструкции датчика (монтажная высота в пределах 70 мм, совместимость с системой универсально-сборных приспособлений УСП-8, конструктивное исполнение в виде платформы), разработана 3d-модель чувствительного элемента датчика – рисунок 1.

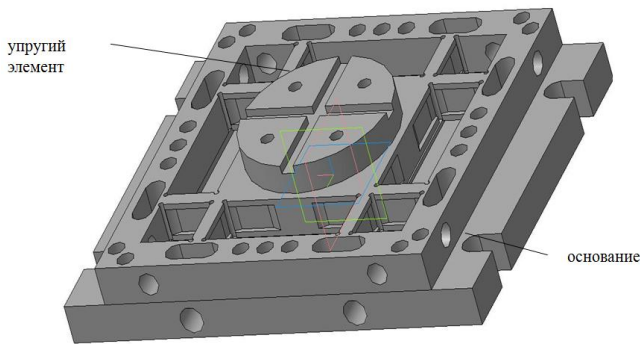


Рисунок 1 – Модель упругого элемента датчика и основания

В данной конструкции центральная платформа с монтажным фланцем для технологической оснастки УСП-8 обрешена восемью балками H-образного сечения, которые представляют собой упругие элементы канала датчика, отвечающего за измерение силы, направленной вдоль оси Z. Концы этих балок упираются в центр упругих элементов, представляющих собой защемленную с двух концов балку, образованную стенкой кармана, выполненного в основании упругого элемента датчика. Две пары подобных упругих элементов, расположенных на противоположных сторонах основания датчика, отвечают за измерение сил вдоль осей X и Y соответственно. Выбор конструкции был обусловлен рекомендациями данными в [14, 2, 3].

При анализе конструкционных материалов, используемых для упругих чувствительных элементов датчиков, необходимо принять во внимание следующие обстоятельства. Согласно [2] и [3] к основным свойствам материалов упругих элементов относятся: малое несовершенство упругости, высокая релаксационная стойкость, стабильность упругих свойств во времени и переменных внешних условиях, большая зона упругих деформаций.

Основными конструкционными материалами, используемыми для изготовления упругих элементов, являются конструкционные и легированные стали, бронзы, алюминиевые и титановые сплавы – таблица 1.

Анализ показывает, что лучшими материалами являются стали типа ШХ15 и 36НХТЮ. Однако для конструкции упругого элемента датчика с массивной центральной платформой для получения приемлемых частотных характеристик и высокой собственной частоты выбор был сделан в пользу сплава Д16Т. Использование данного материала за счет малой его плотности позволило уменьшить массу центральной платформы в 2,8 раза (по сравнению со сталью), что, в свою очередь, позволяет повысить собственную частоту. Важными преимуществами Д16Т по сравнению с легированными сталями, являются хорошая обрабатываемость материала и отсутствие сложного процесса термообработки для получения и стабилизации необходимых механических характеристик.

Таблица 1 – Свойства материалов, используемых для изготовления чувствительных упругих элементов

Материал	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_{10} , %	E, ГПа	$\alpha_E \cdot 10^{-6}$, 1/°C	$\alpha_1 \cdot 10^{-6}$, 1/°C	ρ , мг/м ³
Сталь 30ХГСА	1100	850	-	198	-	11,0	-
Сталь 35ХГСА	1650	1400	10	-	-	-	-
Сталь ШХ 15	2200	1700	15	210	-	12,0	7,8
Сталь 36НХТЮ	1150	750	14	180	-0,30	28,8	7,8
Сталь 42НХТЮ	-	-	-	180-190	-	9,5-10,0	-
Сталь 44НХТЮ	1200	800	20	180-195	-	8,0-9,0	-
Сталь 40ХНМ	2500-2500	2300-2500	3-5	200-220	-	12-15	-
Н41ХТА (нихром)	1400	1250	-	180	-0,02	8,0	7,9
БрБ2	1260	1400	9,0	129	-0,24	15,8	8,23
АМn3 (Al-Mg)	350	160	15	70	-1,07	24,0	2,64
Д16Т	400	280	10	72	-0,69	22,7	2,78
ВТ6(С)	1000	900	10	120	-0,36	8,4	4,43
ВТ9	1200	1030	9	118	-0,45	8,3	4,51
ВТ-15	1300-1500	1200-1400	3-4,5	110	-	-	-

При выборе типов и номиналов чувствительных элементов – тензорезисторов – следует принимать во внимание технические требования как по электрическим, так и механическим параметрам.

С точки зрения электрических характеристик наиболее важными являются:

- номинальное сопротивление тензорезисторов, из которых состоит канал датчика;
- суммарное сопротивление тензорезисторов в плече полумоста не должно превышать допустимое сопротивление плеча для модуля NI9237 фирмы National Instruments, используемого в измерительном комплексе, описанном в [1].

Согласно технической документации на данный модуль [4], рекомендованное сопротивление плеча полумоста составляет до 1кОм.

Схема включения тензорезисторов в датчике изображена на рисунке 2.

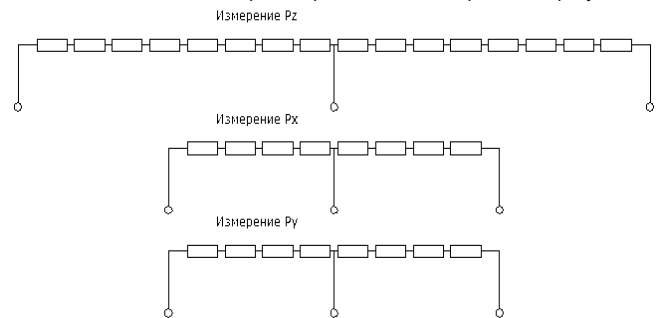


Рисунок 2 – Схема включения тензорезисторов в датчике

Плечо полумоста для измерения силы вдоль оси Z состоит из восьми тензорезисторов, включенных последовательно, что необходимо для улучшения чувствительности силоизмерительной системы датчика вдоль оси Z. Для осей X и Y каждое плечо состоит из четырех тензорезисторов. Поэтому максимальное сопротивление одиночного тензорезистора составит: $R = 1000 \text{ Ом} / 8 = 125 \text{ Ом}$.

С механической точки зрения требования к тензорезисторам сводятся в основном к выбору их геометрических размеров (в нашем случае это 8×20 мм), а также возможностью монтажа на упругом элементе датчика.

Лидерами в производстве тензорезисторов являются немецкая НВМ, японская KYOWA и украинская ВЕДА. Все производители предлагают для общепромышленного применения фольговые тензорезисторы на полиамидной основе с достаточно близкими техническими характеристиками, такими как ряд номинальных сопротивлений и коэффициент тензочувствительности S_{cp} , находящийся в диапазоне 1,9...2,3. В результате анализа каталогов продукции НВМ [5],

KYOWA [6] и ВЕДА [7] выбор сделан в пользу тензорезисторов ВЕДА марки 1ФКТК-10-100С-2 с номинальным сопротивлением 100 Ом, коэффициентом тензочувствительности S_{cp} 2,25 и длиной тензорешетки 10 мм.

Согласно п. 5 технических требований для исследования вибрационных процессов, протекающих при ВСО, желательна наличие в системе встроенного трехосевого акселерометра. При выборе акселерометра следует руководствоваться массогабаритными, электрическими и конструктивными требованиями.

По массогабаритным критериям целесообразно использовать акселерометр, обладающий наименьшими массогабаритными характеристиками (для снижения массы центральной платформы), с сохранением приемлемой осевой чувствительности.

Основными электрическими характеристиками являются осевая чувствительность (не ниже 1Пкл/г), собственная частота акселерометра (не менее 20 кГц).

С точки зрения механической конструкции акселерометра габаритные размеры не должны превышать 15×15×15 мм, кабель подключения должен отходить под прямым углом к оси крепежного элемента датчика, что упрощает его монтаж.

В результате анализа каталогов фирм производителей акселерометров [8,9] выбран датчик AP1021 производства фирмы «Глобалтест». Технические характеристики акселерометра AP1021 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики акселерометра AP1021

Параметр	Ось	Единицы измерения	Значение
Осевая чувствительность	X	Пкл/г*	2,41
	Y		2,52
	Z		2,38
Электрическая емкость	X	пФ	852
	Y		857
	Z		850
Сопротивление изоляции		МОм	>10000
Верхний уровень измеряемого ударного ускорения		g*	10000
Собственная частота закрепленного акселерометра		кГц	55
Относительная поперечная чувствительность	X	%	1,2
	Y		2,8
	Z		3,1
Масса (без кабеля)		г	5
Габариты		мм	9,6×9,6×16
Материал корпуса	Титановый сплав		

Так как проведение аналитического расчета жесткости упругого элемента датчика данной конфигурации (рисунок 1) является сложной задачей, проведен натурный эксперимент. Изготовлен тестовый образец, представляющий участок упругого элемента датчика, включающий в себя два упругих элемента:

- первый упругий элемент отвечает за измерение нагрузки вдоль оси Z. Он оснащен двумя тензорезисторами типа 1ФКТК-10-100С-2, включенными по полумостовой схеме измерения;
- второй упругий элемент отвечает за измерение усилия вдоль осей X или Y, в зависимости от его расположения. Тензорезистор 1ФКТК-10-100С-2, смонтированный на упругом элементе, включен по четверть мостовой схеме измерения с компенсационным сопротивлением для подключения к модулю NI9237.

В качестве связующего, обеспечивающего монтаж тензорезистора на упругий элемент, использовался циан-акрилатный клей Loctite 415, выбор которого был обусловлен его высокими механическими свойствами, такими как высокая адгезия, жесткость клеевого соединения, а также рекомендациями, даваемыми в [10].

Тестовый образец смонтирован на приспособлении (рисунок 3), обеспечивающим его надежное закрепление и позволяющем проводить механическое нагружение упругих элементов для определения передаточного отношения $dU_{вых}/dF$ элементов датчика.

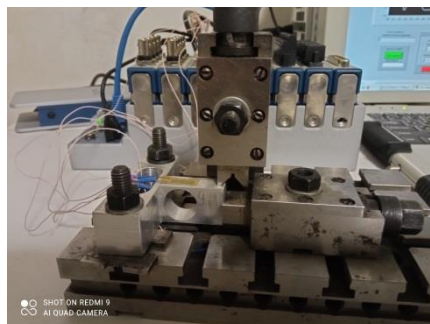
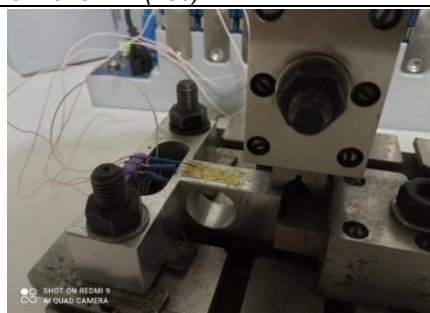


Рисунок 3 – Испытательный стенд с закрепленным образцом

Нагружение осуществлялось силой 1 кН. Так как тестовый образец представляет собой только участок датчика, соответствующий 1/4 измерительной системы для осей X и Y, и 1/8 измерительной системы для оси Z, то можно предполагать, что полноразмерный упругий элемент датчика будет обеспечивать измерение нагрузок в необходимом диапазоне 1,5кН как минимум с двукратным запасом. Напряжение питания измерительной цепи составляет 5 В. Питание и измерение выходного сигнала тензомостов реализовано посредством модуля NI9237, установленного в шасси NIcDAQ-9188, под управлением виртуального прибора, подготовленного в среде LabView.

В результате измерений получены следующие результаты: для элемента оси Z получена чувствительность порядка 850 мкВ/кН, для элемента осей X/Y чувствительность составила порядка 125 мкВ/кН. По результатам теста проведена корректировка конструкции и геометрических размеров упругого элемента, воспринимающего нагрузку вдоль оси Z.

Испытания макетного образца датчика

По результатам предварительных исследований изготовлен упругий элемент датчика из алюминиевого сплава Д16Т. Посредством циан-акрилатного клея на него смонтированы тензорезисторы 1ФКТК-10-100С-2, произведен монтаж электрических цепей проводом МГТФ-0,12. Акселерометр AP21 установлен в приемник, выполненным в основании центральной платформы. Внешний вид чувствительного элемента с тензорезисторами и акселерометром показан на рисунке 4 и 5. Датчик с установленной технологической оснасткой показан на рисунке 6.



Рисунок 4 – Чувствительный элемент датчика с тензорезисторами. Вид сверху

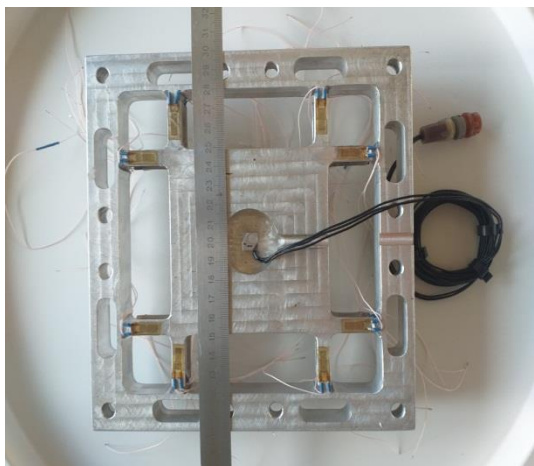


Рисунок 5 – Чувствительный элемент датчика с тензорезисторами и акселерометром. Вид снизу



Рисунок 6 – Датчик с технологической оснасткой

Для проверки работоспособности силоизмерительной части датчика проведен ряд экспериментов по измерению сил резания, возникающих при обработке алюминиевого сплава Д16Т, концевой фрезой диаметром 12 мм при глубине резания 1–3 мм, частоте вращения 1200^{-1} . Датчик с технологической оснасткой, смонтированный на станке AG400 в составе измерительного комплекса приведен на рисунке 7. Работа части датчика, отвечающая за регистрацию вибрационных процессов будет представлена в дальнейших исследованиях.



Рисунок 7 – Датчик с установленной оснасткой на станке AG400

На рисунке 8 приведена фотография лицевой панели виртуального прибора для просмотра, обработки и сохранения данных результатов экспериментов.

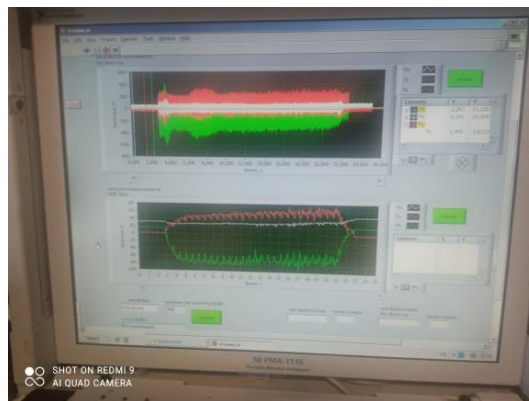


Рисунок 8 – Лицевая панель виртуального прибора для работы с данными, полученными при работе программно-аппаратного комплекса

Анализ работы датчика в составе программно-аппаратного комплекса для измерения и регистрации процессов, протекающих при ВСО, показал хорошие технические результаты. Типовые данные, получаемые при измерении сил резания с использованием данного датчика, показаны на рисунке 9 – 12. На рисунке 9 отражено изменение средней силы резания во времени. Отчетливо видна неравномерность подачи во времени, обусловленная действием системы позиционирования станка AG400.

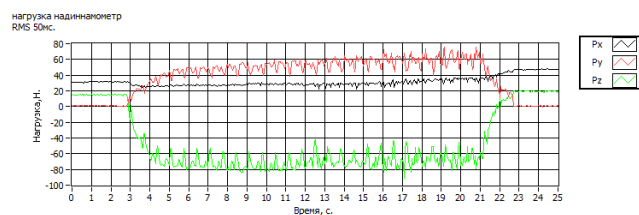


Рисунок 9 – График изменения сил резания во времени, при фрезеровании сплава Д16Т, усредненные значения, время интегрирования 50 мс

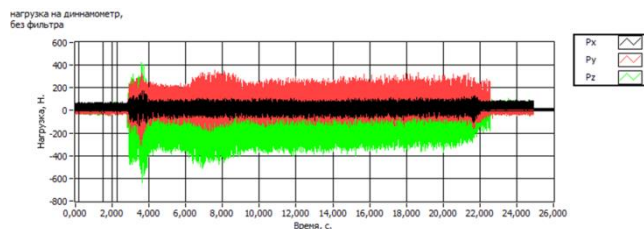


Рисунок 10 – График изменения сил резания во времени, без применения фильтрации, в течение всего эксперимента

На рисунке 11 изображено начало процесса резания. Отчетливо видно первое касание фрезой обрабатываемого образца, увеличение силы резания по мере врезания в материал образца, а также хорошо обнаруживается неравномерность сил резания, создаваемых отдельными режущими кромками фрезы (радиальное биение фрезы, либо ее неправильная заточка).

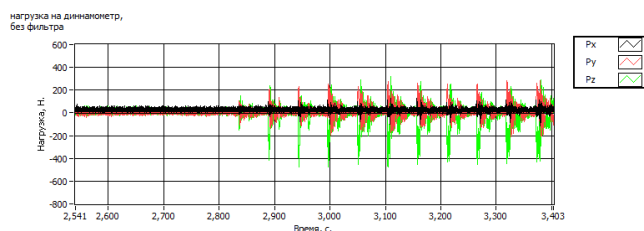


Рисунок 11 – График изменения сил резания во времени. Начало процесса резания

На рисунке 12 показано изменение сил резания во времени при установившемся процессе фрезерования. На данном графике тоже хорошо видна неравномерность сил резания вследствие биения фрезы либо ее неправильной заточки.

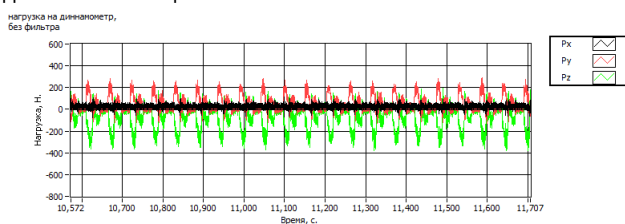


Рисунок 12 – График изменения сил резания о времени. Установившейся процесс резания

Заключение

Применение трехосевого силоизмерительного датчика в системе контроля сил резания и процессов, протекающих при ВСО, в составе программно-аппаратного комплекса для измерения, регистрации и последующей оцифровки данных позволяет детально изучить процессы, протекающие при ВСО. Это предоставляет возможность осуществлять качественную оптимизацию технологических процессов обработки деталей, особенно малогабаритных и тонкостенных, выявлять оптимальные траектории движения инструмента и режимы резания в привязке к конкретной детали. Потенциал, заложенный в датчике и программно-аппаратном комплексе, позволяет проводить детальное изучение процессов ВСО, силовых и вибрационных, развитие автоколебательных процессов в системе станок-приспособление-инструмент-деталь (система СПИД), осуществлять подавление развития автоколебательных процессов в системе СПИД на программном и аппаратном уровне, а также изучать поведение системы СПИД современных обрабатывающих центров и станков ЧПУ в лабораторных и производственных условиях.

Список цитированных источников

1. Программно-аппаратный комплекс для измерения, регистрации и последующей оцифровки процессов, протекающих при высокоскоростной механической обработке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elib.psu.by/handle/123456789/26808>
2. Антоновец, И. В. Методы расчета и моделирования упругих элементов: учебное пособие / И. В. Антонец, А. П. Терешенок. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 121 с.
3. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. – Москва: Mashgiz 1962.–456 с.
4. NI 9237, 4 AI, ± 25 mV/V, 24 Bit, 50 kS/s/ch Simultaneous, Bridge Completion [Electronic resours]. – Mode of access: http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf.
5. Strain Gauges [Electronic resours]. – Mode of access: https://www.hbm.com/en/0014/strain-gauges/?product_type_no=HBM%20Strain%20Gauges:%20First%20Choice%20for%20Strain%20Measurements.
6. Products, Strain Gauges [Electronic resours]. – Mode of access: https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/index.html.
7. Тензорезисторы Каталог[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://veda.com.ua/catalogue/tenzorezistory>.
8. Каталог акселерометров фирмы ENDEVCO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://buy.endevco.com/accelerometer>.
9. Датчиковая измерительная аппаратура. Каталог продукции фирмы «Глобалтест» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://globaltest.ru/catalogpdf/catalog_Global_Test_ru.pdf.
10. Клокова, Н. П. Тензорезисторы. Теория, методики расчета, разработки / Н. П. Клокова. – Москва: Машиностроение. – 1990г. – 224 с.
11. Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. Москва, 1983.– 21 с.
12. Тихонов, А. И. Упругие элементы датчиков механических величин: учебное пособие / А. И. Тихонов, В. А. Тихоненков, Е. А. Мокров. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. –120 с.
13. Датчики силы для измерения сил резания фирмы «Кистлер» https://www.kistler.com/ru/products/components/force-sensors/?pfv_metrics=metric&pfv_force_applications=cutting_force.
14. Осадчий, Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

References

1. Programmno-apparatnyj kompleks dlya izmereniya, registracii i posleduyushchej ocifrovki processov, protekayushchih pri vysokoskorostnoj mekhanicheskoj obrabotke [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://elib.psu.by/handle/123456789/26808>
2. Antonovec, I. V. Metody rascheta i modelirovaniya uprugih elementov: uchebnoe posobie / I. V. Antonec, A. P. Tereshenok. – Ul'yanovsk : UIGTU, 2013. – 121 s.
3. Andreeva L. E. Uprugie elementy priborov / L. E. Andreeva. – Moskva: Mashgiz 1962.–456 s.
4. NI 9237, 4 AI, ± 25 mV/V, 24 Bit, 50 kS/s/ch Simultaneous, Bridge Completion [Electronic resours]. – Mode of access: http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf.
5. Strain Gauges [Electronic resours]. – Mode of access: https://www.hbm.com/en/0014/strain-gauges/?product_type_no=HBM%20Strain%20Gauges:%20First%20Choice%20for%20Strain%20Measurements.
6. Products, Strain Gauges [Electronic resours]. – Mode of access: https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/index.html.
7. Tenzorezistory Katalog[Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://veda.com.ua/catalogue/tenzorezistory>.
8. Katalog akselerometrov firmy ENDEVCO [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://buy.endevco.com/accelerometer>.
9. Datchikovaya izmeritel'naya apparatura. Katalog produkcii firmy «Globaltest» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://globaltest.ru/catalogpdf/catalog_Global_Test_ru.pdf.
10. Klokova, N. P. Tenzorezistory. Teoriya, metodiki rascheta, razrabotki / N. P. Klokova. – Moskva: Ma-shinostroenie. – 1990g. – 224 s.
11. Rukovodstvo k universal'nomu dinamometru UDM konstrukcii VNII. Moskva, 1983.– 21 s.
12. Tihonov, A. I. Uprugie elementy datchikov mekhanicheskikh velichin: uchebnoe posobie / A. I. Tihonov, V. A. Tihonenkov, E. A.Mokrov. – Ul'yanovsk: UIGTU, 1998. –120 s.
13. Datchiki sily dlya izmereniya sil rezaniya firmy «Kistler» https://www.kistler.com/ru/products/components/force-sensors/?pfv_metrics=metric&pfv_force_applications=cutting_force.
14. Osadchij, E. P. Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin / E. P. Osadchij. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 480 s.

Материал поступил 14.02.2023, одобрен 06.03.2023, принят к публикации 09.03.2023

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ ОРИЕНТИРОВАННЫХ АБРАЗИВСОДЕРЖАЩИХ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЭЛАСТИЧНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ

А. С. Кириенко¹, С. Э. Завистовский², В. Э. Завистовский³

¹ К. т. н., доцент кафедры технологии и методики преподавания

УО «Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: a.kirienko@psu.by

² К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии и методики преподавания

УО «Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: s.zavistovsky@psu.by

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта

УО «Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: v.zavistovsky@psu.by

Реферат

Авторами статьи представлены результаты теоретических исследований разработки математического аппарата получения ленточного шлифовального инструмента с управляемым ориентированием абразивных зерен в электростатическом поле, что позволяет повысить производительность отделочной обработки поверхностей деталей машин. В статье также приводятся результаты исследований, направленных на определение оптимального изменения угла ориентирования зерен электрокорунда 14А в рабочем слое на 120–140° относительно тканевой основы, что способствует повышению режущей способности и стойкости инструмента в 1,3–1,5 раза, в сравнении с известными однослойными шлифовальными инструментами на гибкой основе. Это решает важные для промышленного производства задачи по снижению материалоемкости продукции и повышению эффективности металлообработки.

Ключевые слова: шлифовальный инструмент, поверхностный слой, ориентированность зерен абразива, электростатическое поле, производительность.

THEORY AND PRACTICE OF CONTROL FOR THE FORMATION OF ORIENTED ABRASIVES CONTAINING WORKING SURFACES IN ELASTIC GRINDING TOOLS

A. S. Kiryienka, S. E. Zavistovsky, V. E. Zavistovsky

Abstract

The authors of the article present the results of theoretical studies on the development of a mathematical apparatus for obtaining a belt grinding tool with controlled orientation of abrasive grains in an electrostatic field, which makes it possible to increase the productivity of finishing surface treatment of machine parts. The article also presents the results of studies aimed at determining the optimal change in the grain orientation angle of electrocorundum 14A in the working layer by 120–140° relative to the fabric base, which contributes to an increase in cutting ability and tool life by 1.3–1.5 times, in comparison with known single-layer grinding tools on a flexible basis. This solves the tasks that are important for industrial production in terms of reducing the material consumption of products and increasing the efficiency of metalworking.

Keywords: grinding tool, surface layer, orientation of abrasive grains, electrostatic field, productivity.

Введение

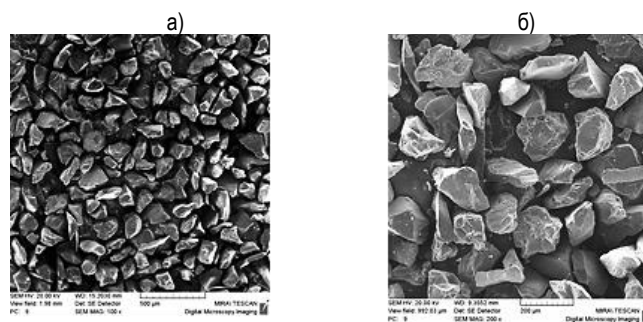
В настоящее время наибольший интерес в производственной деятельности для членов Всемирной организации безопасности абразивных материалов OSA и Европейской федерации производителей абразивных товаров (FEPA) представляет возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик шлифовальных инструментов на стадии проектирования и достижения необходимых параметров при изготовлении и последующей эксплуатации [1].

Для получения высоких показателей производительности отделочной обработки необходимо стабилизировать условия резания в контакте поверхности детали и зерна абразива. Рационально ориентированные зерна абразива обладают повышенной режущей способностью, поскольку резание материала происходит по изученным законам лезвийной обработки. Для решения этой задачи возникла потребность в исследовании, разработке и технологическом обеспечении процесса ориентации зерен абразива в электростатическом поле. При моделировании эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента необходимо выявить влияние формы геометрии и направленной ориентации абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. По сравнению с другими инструментами форма и геометрия режущей части которых определена и известна, геометрия и форма вершин зерен традиционного абразивного инструмента неопределенна [2].

Известна зависимость между определенным образом сориентированными структурами рабочих слоев шлифовальных инструмен-

тов, геометрия которых влияет на напряженно-деформированное состояние абразивных зерен при шлифовании и эксплуатационными характеристиками самого инструмента.

Предлагается повысить производительность отделочной обработки ленточным инструментом путем образования наиболее рациональной ориентации зерен абразива в рабочем поверхностном слое, как показано на рисунке 1.



а) увеличение $\times 100$;

б) увеличение $\times 200$

Рисунок 1 – Образцы однослойной рабочей поверхности с ориентированными зернами абразива ленточного шлифовального инструмента, полученного электростатическим нанесением абразива с углом ориентированности зерен абразива $\beta = 0^\circ$

Однако не были известны научно обоснованные и экспериментально подтвержденные способы технологического обеспечения получения ориентированных ленточных шлифовальных инструментов и значений углов ориентирования абразива в рабочих слоях инструментов, используемых для шлифования конкретных конструкционных материалов. В связи с чем указанная проблема является актуальной для изучения с целью управления поведением зерен абразива при формировании рабочего слоя инструмента для регулирования его эксплуатационных характеристик за счет реализации электростатического нанесения рабочего слоя из абразивных материалов [2–4].

Для достижения поставленной цели использовали анализ теоретических и практических знаний, закономерностей и факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики ленточных шлифовальных инструментов. Практические исследования базировались на методике комплексной оценки механических и эксплуатационных характеристик, включающей: отбор абразивных материалов для получения шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя по размерам, форме и восприимчивости абразивов к воздействию электростатического поля; исследование технологических параметров электростатического нанесения рабочего слоя из электрокорунда; исследование характера расположения зерен абразива относительно поверхности тканевой основы и вектора направления движения резания; исследование эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зёрнами электрокорунда; статистическую обработку результатов исследований получения ленточного шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя из ориентированных зерен электрокорунда.

Формирование ориентированных абразив содержащих рабочих поверхностей с использованием электростатического поля

Процесс нанесения рабочего слоя инструмента под действием электростатического поля, схематично представленный на рисунке 2, описывается тремя последовательно протекающими стадиями: заряджение частицы, образование заряженного диполя с последующей его ориентацией в направлении действия электростатического поля; отрыв от поверхности электрода и полет заряженного диполя под действием электростатического поля; контакт и проникновение движущейся частицы в вязкую основу.

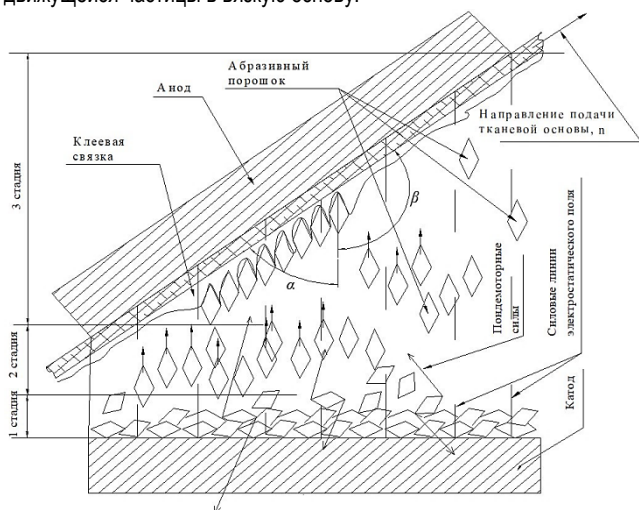


Рисунок 2 – Стадии процесса получения рабочего слоя ленточного шлифовального инструмента в электростатическом поле

В соответствии с требованиями неравносности формы абразивных зерен принята физическая модель зерна абразива с соотношением сторон 4 к 1 в виде цилиндра с коническими концами и углом конусности 2γ. Для адекватного описания эффективного формирования рабочего слоя инструмента из зерен, ориентированных в электростатическом поле, разработана математическая модель, включающая:

- зависимость, определяющую размеры зерен абразива от условий электростатического поля:

$$a \leq \frac{27\varepsilon_0\varepsilon}{4g\rho(\varepsilon + 2\varepsilon_0)} E^2, \tag{1}$$

- где a – размер абразивного материала, м;
- E – напряженность электростатического поля, кВ/м;
- ρ – плотность абразивного материала, кг/м³,
- ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы;
- ε_0 – диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м = $8,85 \cdot 10^{-12}$ М⁻³·КВ⁻¹·С⁴·А⁻²;
- g – ускорение свободного падения, м/с²;

- зависимость, определяющую оптимальную дистанцию перемещения абразива при его нанесении на тканевую основу от размеров зерна, скорости и условий электростатического поля:

$$L = \frac{\pi a^3 \rho}{2} \frac{V^2}{9\varepsilon \Theta E^2 - 4\rho a g}, \tag{2}$$

- где $\Theta = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2\varepsilon_0}$ – относительная качественная характеристика электростатического поля;

L – оптимальное расстояние нанесения абразива на проклеенную основу, м; V – максимальная скорость абразивного зерна, м/с;

- зависимость, определяющую скорость проникновения абразива v_0 , м/с в клеевую среду основы от размеров абразивного материала, действующих сил сопротивления при величине угла проникновения – γ :

$$v_0 = \sqrt{-\frac{2}{5} b H_{\max}^{5/2} F\left(-\frac{\alpha}{3\lambda}, \frac{5}{6}; \frac{11}{6}; -\lambda H_{\max}^3\right)} \tag{3}$$

при угле атаки $\alpha = const$, $\lambda = const$, $\lambda \neq 0$, комплексном параметре

$b = -2 \frac{\beta v_0^2}{m}$ гипергеометрической функции F и максимальной глубине проникновения абразива в клеевую среду $H_{\max} = 2a$, м;

- зависимость, определяющую оптимальное расстояние перемещения абразива при его нанесении на тканевую основу от технологических параметров напряженности электростатического поля, марки и размера абразива, глубины и углов проникновения абразива, учитывая, что $V=v_0$:

$$L = \frac{\pi a^3 \rho b H_{\max}^2 F\left(-\frac{\alpha}{3\lambda}, \frac{5}{6}; \frac{11}{6}; -\lambda H_{\max}^3\right)}{5(9\varepsilon \Theta E^2 - 4\rho a g)}. \tag{4}$$

Математическая модель является основой для определения технологических параметров формирования рабочего слоя нанесением абразива в электростатическом поле. При получении инструмента важно обеспечить ориентированность абразивного зерна относительно эластичной основы на оптимальный угол. Попытки связать те или иные преимущества абразивного материала с различной формой и геометрией зерен не учитывают взаимное расположение зерен в рабочем слое инструмента, характер и степень перекрытия траекторий зерен в процессе движения, условия взаимодействия материала абразивного зерна с обрабатываемым материалом и образовавшейся стружкой, т. е. кинематические и динамические условия процесса шлифования. Различие в форме и геометрии ориентированных зерен не только не объясняет, а, наоборот, вуалирует приобретаемые в связи с их ориентированностью преимущества. Поэтому для анализа работы ориентированных зерен требуется заменить «неопределенные» зерна зернами эквивалентной формы, поддающимися математическому описанию. Такая операция связана с упрощением геометрических параметров и утратой некоторых физических свойств реальных зерен, однако позволяет определить влияние ориентированности абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. В работах П. И. Ящерицына и А. Г. Зайцева, В. Н. Бакуля, А. В. Королева, М. Мацуи, Сато Седзаки при моделировании встречаются следующие допущения: 1) абразивные зерна приводят к форме шара одного радиуса r_0 ; 2) абразивные зерна заменяют цилиндром или

эллипсоидом вращения с постоянным соотношением полуосей; 3) режущие вершины зерен заменяют эквивалентным конусом или пирамидой, имеющими угол при вершине, равный некоторой постоянной величине 2γ , т. е. не эквивалент зерна, а модель его режущей части. Рассмотрим взаимодействие абразивного зерна и обрабатываемой поверхности заготовки при шлифовании. При врезании абразивного зерна в металл в нем возникают зоны текучести [6]. Удельная мощность взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла при шлифовании определили из зависимости:

$$N_{y\delta} = K_{pV} \cdot \sigma_B \cdot \sin \Delta\beta \cdot V, \quad (5)$$

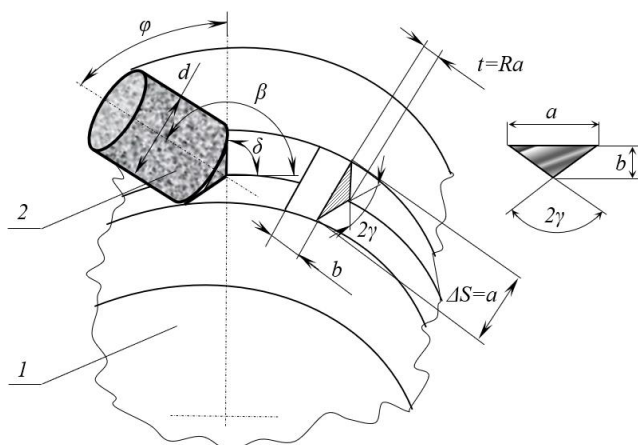
где K_{pV} – коэффициент, учитывающий рост давления в контакте «зерно – металл»;

σ_B – временное сопротивление разрушению обрабатываемого металла;

$\Delta\beta$ – угол наклона контакта абразивного зерна к поверхности заготовки;

V – скорость резания.

При ударном взаимодействии абразивного зерна и заготовки, в поверхностном слое которой образуются зоны текучести, возникает неустойчивость и локализация пластической деформации. Из [6] известно, что засаливание абразивного зерна снижается по мере роста глубины внедрения абразивного зерна, что приводит к росту объема застойной зоны у передней поверхности, формированию ударной волны, приводящей к переводу металла в пластическое состояние. Соответственно, для повышения удельной мощности взаимодействия абразивных зерен и обрабатываемого металла при прочих равных условиях необходимо сориентировать абразивные зерна в рабочем слое инструмента. В связи с этим представим геометрию резания ориентированным абразивным зерном в соответствии с рисунком 3.



1 – обрабатываемая заготовка, 2 – абразивное зерно

Рисунок 3 – Схема резания ориентированным абразивным зерном

При исследовании процесса шлифования поверхности заготовки одиночным зерном абразива учтено, что величина глубины резания t и ширина срезаемого слоя b находятся в прямой зависимости от размеров и геометрии абразивного зерна. Режущую способность ленточного шлифовального инструмента с направленной ориентацией абразивных зерен в рабочем слое определили соотношением объема сошлифованного материала $V_{общ}$ с заготовки за единицу времени t по формуле

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin \beta_i}{4\tau} \cdot n_i \cdot \pi D \cdot l \cdot n_{об} \quad (6)$$

где β – угол ориентированности абразивного зерна к тканевой основе;

n_i – скорость движения абразивной ленты, м/с;

$n_{об}$ – частота вращения заготовки, об/мин;

D – диаметр заготовки, мм;

l – длина ошлифованного участка, равного ширине шлифовальной ленты, мм.

Исходя из того, что при традиционной схеме хаотического расположения абразива в шлифовальных инструментах примерно 78 % зерен являются не режущими, 12 % – давящими и только 10% – режущими, можно предположить, что у инструмента с ориентированными зернами все зерна являются режущими [2]. Следовательно, можно допустить, что шлифовальный инструмент с ориентированными зернами абразива в рабочем слое имеет максимальную режущую способность Q_{max} , а инструмент с хаотическим расположением зерен минимальную Q_{min} . В соответствии с проведенными расчетами выявлено, что при ориентировании зерен абразива в рабочем слое ленточного шлифовального инструмента его режущая способность может изменяться в диапазоне от $q_{min} = 0,5k/0,75k = 0,66k$ до $q_{max} = k/0,75k = 1,33k$ раз, поскольку номинальное увеличение режущей способности $q_{nom} = 1,33k/0,66k = 2$ раза. В соответствии с выражением (6) определены расчетные значения режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента при углах ориентированности β зерен абразива зернистостью, равной 0,10 мм, 0,16 мм и 0,20 мм (рисунок 4) [3]. В соответствии с данными расчетов для всех зернистостей абразивных зерен максимальное значение режущей способности Q_{max} достигается при угле ориентированности абразива относительно основы $\beta = 90^\circ$. Например, для абразивных зерен зернистости $a = 0,1$ мм режущая способность $Q_{max} = 255$ мм³/мин. Оптимальные значения углов ориентированности β для исследуемых зернистостей абразива установили в соответствии со статистическим методом графического определения оптимальных границ, проведя биссектрису на рисунке 4.

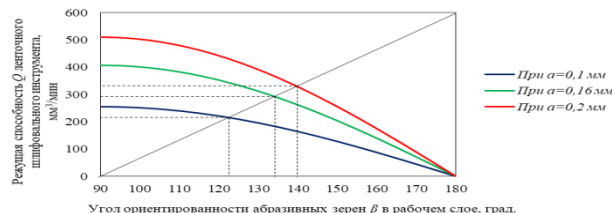


Рисунок 4 – Зависимость режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента от угла ориентированности абразивных зерен β

В результате для зерен размером $a = 0,1$ мм оптимальное значение угла ориентированности $\beta = 123^\circ$, при котором режущая способность $Q = 214$ мм³/мин, что согласуется с алгебраическими расчетами. Для зерен размером $a = 0,16$ мм $\beta = 135^\circ$, а $Q = 288,98$ мм³/мин. Для зерен размером $a = 0,2$ мм $\beta = 140^\circ$, а $Q = 328,46$ мм³/мин [5].

При целенаправленном ориентировании зерен абразива размером $a = 0,1$ мм под углом $\beta = 123^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 214/165 = 1,3$ раза. При ориентировании зерен абразива размером $a = 0,16$ мм под углом $\beta = 135^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 288,98/200 = 1,4$ раза, а при ориентировании зерен абразива размером $a = 0,2$ мм под углом $\beta = 140^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 328,46/216 = 1,5$ раза, что соответствует прогнозируемому [7, 8].

Заключение

Значительное влияние на режущую способность и стойкость абразивного зерна оказывает его ориентированность относительно движения резания, и изменение угла ориентирования зерен абразива в рабочем слое на $120-140^\circ$ относительно основы должно приводить к увеличению производительности примерно в 1,5 раза, что является весьма ощутимым резервом использования абразивных материалов в шлифовании. Повышению долговечности инструмента будет способствовать применение эластичных связок, обладающих высокой адгезионной способностью к наполнителю, способных выдерживать без разрушения перемещение абразивного зерна до половины его размера. Расположение зерен абразива под углом β к эластичной основе требует применения связок, исключающих возможность образования пор при отверждении. Благодаря наличию растягивающих напряжений в прилегающих к режущей кромке областях и периодическому разрушению кромок при резании ориентированным абразивом обеспечивается его самозатачивание.

Список цитированных источников

1. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, Ch. Guo // NewYork :Industrial Press Inc. – 2008. – 372 p.
2. Никифоров, И. П. Состояние и перспективы производства абразивных материалов / И. П. Никифоров // Труды ППИ. Сер. Машиностроение. Электротехника. – 2012 – № 15(3). – С. 265–270.
3. Кириенко, А. С. Влияние технологических параметров формирования рабочего слоя инструмента с ориентированными зёрнами на его эксплуатационные характеристики / А.С. Кириенко // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр./ редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2018. – Вып. 41. – С. 257–262.
4. Кириенко, А. С. Инновационные решения в области изготовления эластичных шлифовальных инструментов / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : материалы Международной научно-технической конференции, Брест, 27–28 мая 2019 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: М. В. Нерода [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – С. 83–85.
5. Кириенко, А. С. Ленточный шлифовальный инструмент с ориентированным рельефом абразивосодержащего поверхностного слоя / А. С. Кириенко // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2018. – № 6. – С. 90–95.
6. Никифоров, И. П. Роль внешнего и внутреннего трения в процессе микрорезания абразивным зерном / И. П. Никифоров, П. Н. Мальцев // Вестник Псковского государственного университета. Сер. Экономические и технические науки. – 2012. – № 1. – С. 116–123.
7. Кириенко, А. С. Оптимизация расположения зёрен абразива при электростатическом нанесении рабочих слоёв эластичного инструмента с управляемой режущей способностью / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский // Инновационные технологии в машиностроении : сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега; д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 136–141.
8. Кириенко, А. С. Реализация технологии управления образованием ориентированных структур в гибких абразивных инструментах / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский, В. Э. Завистовский // Перспективные машиностроительные технологии (Advanced engineering technologies) AET-2022 : сборник материалов международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии AET-2022», Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 г. / Сан.-Петербургский политех. ун-т. Петра Великого; под. ред. член-корр., д-ра техн. наук А. А. Поповича; д-ра техн. наук Д. П. Гасюка. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. – С. 116–122.

References

1. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, Ch. Guo // NewYork :Industrial Press Inc. – 2008. – 372 p.
2. Nikiforov, I. P. Sostoyanie i perspektivy proizvodstva abrazivnyh materialov / I. P. Nikiforov // Trudy PPI. Ser. Mashinostroenie. Elektrotehnika. – 2012 – № 15(3). – S. 265–270.
3. Kirienko, A. S. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov formirovaniya rabocheho sloya instrumenta s orientirovannymi zernami na ego ekspluatatsionnye harakteristiki / A.S. Kirienko // Poroshkovaya metallurgiya: Resp. mezhved. sb. nauch. tr./ redkol.: A. F. Il'yushchenko [i dr.]. – Minsk : Belarus. navuka, 2018. – Vyp. 41. – S.257–262
4. Kirienko, A. S. Innovatsionnye resheniya v oblasti izgotovleniya elastichnyh shlifoval'nyh instrumentov / A. S. Kirienko, S. E. Zavistovskij // Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Brest, 27–28 maya 2019 goda / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: M. V. Neroda [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2019. – S. 83–85.
5. Kirienko, A. S. Lentochnyj shlifoval'nyj instrument s orientirovannym rel'efom abrazivosoderzhashchego poverhnostnogo sloya / A. S. Kirienko // Vestnik Poloc. gos. un-ta. Ser. V. Prikladnye nauki. Promyshlennost'. – 2018. – № 6. – S. 90–95.
6. Nikiforov, I. P. Rol' vneshnego i vnutrennego treniya v processe mikrorezaniya abrazivnym zernom / I. P. Nikiforov, P. N. Mal'cev // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Ekonomicheskie i tekhnicheskie nauki. – 2012. – № 1. – S. 116–123.
7. Kirienko, A. S. Optimizatsiya raspolozheniya zeren abraziva pri elektrostatischekom nanesenii rabochoh sloev elastichnogo instrumenta s upravlyae moy rezhushchej sposobnost'yu / A. S. Kirienko, S. E. Zavistovskij // Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii : sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 50-letiyu mashinostroitel'nyh special'nostej i 15-letiyu nauchno-tekhnologicheskogo parka Polockogo gosudarstvennogo universiteta, Novopolock, 21–22 apr. 2020 g. / Poloc. gos. un-t ; pod. red. chl.-korr., d-ra tekhn. nauk, prof. V. K. Shelega; d-ra tekhn. nauk, prof. N. N. Popok. – Novopolock : Poloc. gos. un-t, 2020. – S. 136–141.
8. Kirienko, A. S. Realizatsiya tekhnologii upravleniya obrazovaniem orientirovannyh struktur v gibkikh abrazivnyh instrumentah / A. S. Kirienko, S. E. Zavistovskij, V. E. Zavistovskij // Perspektivnye mashinostroitel'nye tekhnologii (Advanced engineering technologies) AET-2022 : sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivnye mashinostroitel'nye tekhnologii AET-2022», Sankt-Peterburg, 21–25 noyabrya 2022 g. / San.-Peterburgskij politekh. un-t. Petra Velikogo; pod. red. chlen-korr., d-ra tekhn. nauk A. A. Popovicha; d-ra tekhn. nauk D. P. Gasyuka. – Sankt-Peterburg : Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo, 2022. – S. 116–122.

Материал поступил 21.11.2022, одобрен 14.12.2022, принят к публикации 09.01.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ОПЕРАТОР-КОМБАЙН-ТРАНСПОРТ» НА УБОРКЕ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР

А. Н. Орда¹, А. Л. Мисун²

¹Д. т. н., профессор, профессор кафедры механики материалов и деталей машин
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: SLM_90@mail.ru

²К. т. н., старший преподаватель кафедры технологии и организация технического сервиса
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: LLM_90@mail.ru

Реферат

Получена статистическая характеристика функциональных отказов кормоуборочных комбайнов при их эксплуатации в течение рабочего дня от компонентов технологической системы «оператор-комбайн-транспорт». Установлена средняя продолжительность нахождения оператора мобильной сельскохозяйственной техники в травмоопасной зоне, рассчитан ущерб от простоя кормоуборочного комбайна, обусловленный, в том числе, от недоиспользования труда оператора.

Ключевые слова: безопасность, кормоуборочный комбайн, отказы, травмоопасная зона, оператор мобильной сельскохозяйственной техники, транспорт.

STUDY OF THE SAFETY AND EFFICIENCY OF THE FUNCTIONING OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM "OPERATOR-HARVESTER-TRANSPORT" IN FORAGE CROPS HARVESTING

A. N. Orda, A. L. Misun

Abstract

A statistical characteristic of the functional failures of forage harvesters during their operation during the working day from the components of the technological system "operator-combine-transport" is obtained. The average duration of the stay of the operator of mobile agricultural machinery in the traumatic zone was established, the damage from the downtime of the forage harvester, due, among other things, to the underutilization of the operator's labor, was calculated.

Keywords: safety, forage harvester, failures, trauma zone, operator of mobile agricultural machinery, transport.

Введение

Как любые факторы производственной среды, так и любые действия персонала в трудовом процессе становятся опасными для работника только в определенной взаимосвязи в рамках производственной ситуации. Проведенный анализ статистических данных Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Министерства труда и социальной защиты, литературных источников показал, что, с одной стороны, современная мобильная сельскохозяйственная техника (МСХТ) способствует повышению производительности труда, выполнению наиболее трудоемких работ в растениеводстве, с другой – при ее эксплуатации довольно часто имеет место травматизм обслуживающего персонала, а к числу наиболее травмоопасных технологических процессов производства продукции растениеводства относится заготовка кормов и более 60 % заготавливаемых кормов занимают измельченные, производство которых осуществляется кормоуборочными комбайнами [1]. Поэтому целью исследований является оценка безопасности и эффективности функционирования технологической системы «оператор-комбайн-транспорт» на уборке кормовых культур. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач: проанализировать временные показатели функционирования элементов технологической системы на уборке кормовых культур («оператора», «комбайна», «транспорта»); обосновать причины и ущерб от простоя кормоуборочного комбайна, в том числе связанный с недоиспользованием труда «оператора».

Основная часть

Экспериментальные исследования показателей работы кормоуборочных комбайнов. Для проведения исследований по определению потенциальной травмоопасности кормоуборочных комбайнов при восстановлении их работоспособности все непроизводительные затраты времени их работы (простой) принимались за условные

отказы [2]. Это простои комбайна при устранении эксплуатационных и технологических отказов; простои, когда оператор МСХТ не управляет комбайном по организационным причинам, а также физиологическим потребностям; простои комбайна при контроле качества уборки [3] и в случае выпадения осадков, когда техническое средство не может выполнять технологический процесс из-за состояния убираемой растительной массы. По результатам хронометражных наблюдений были составлены статистические ряды временных характеристик технологического процесса кормоуборки [4–5]. Продолжительностью рабочего дня считалось время от начала передвижения (доставки) оператора МСХТ к месту стоянки комбайна до отвозки его на стоянку после работы (конец рабочего дня). Результаты обработки статистических рядов основных временных характеристик приведены в таблице 1.

Анализ результатов исследований (таблица 2) показывает, что наибольшие простои наблюдаемых кормоуборочных комбайнов имели место при устранении их эксплуатационных отказов, а наибольшее время простоев наблюдалось по причине «комбайн»: от 1,50 ч («Клаас Ягуар») до 1,63 ч (КВК-800 «Палессе») таблица 3. Причиной этому в основном являются поломки режущих и подбирающих механизмов. Средняя продолжительность нахождения оператора МСХТ в травмоопасной зоне для устранения отказов комбайна составляет 1,53 ч. Следующий в порядке убывания показатель продолжительности простоев (условных отказов) – непроизводительное время на подготовку комбайна к работе с учетом его заправки. Отсутствие простоев по метеоусловиям объясняется тем, что уборка кормовых культур проводилась в хорошую погоду. Также комбайны простаивали и в ожидании транспортных средств для загрузки убираемой растительной массы. Результаты хронометражных наблюдений за технологическим процессом кормоуборки приведены в таблицах 4–6.

Таблица 1 – Временные показатели работы кормоуборочных комбайнов

№ п/п	Временные показатели	КВК-800 «Палессе»		«Клаас Ягуар»		К-Г-6 «Палессе»	
		ч	%	ч	%	ч	%
1	Время начала рабочего дня, $T_{\text{дн}}^H$	8,394	-	7,893	-	8,950	-
2	Затраты времени на передвижение комбайнера от места отдыха до стоянки комбайна, t_{m-c}	0,212	2,4	0,267	3,3	0,294	3,7
3	Время на подготовку комбайна к работе, t_{na}	0,384	4,3	0,362	4,5	0,617	7,7
4	Время простоя комбайна по организационным причинам, $t_{орг}$	0,059	0,7	0,043	0,5	0,376	4,7
5	Продолжительность времени простоя по физиологическим причинам, t_{ϕ}	1,058	11,9	1,079	13,4	1,416	17,6
6	Время на техническое обслуживание комбайна, t_y	0,113	1,3	0,087	1,07	0,432	5,4
7	Время на устранение эксплуатационных отказов, t_n	0,569	6,4	0,481	5,96	1,059	13,2
8	Время на устранение технологических отказов, t_{nm}	0,092	1,0	0,039	0,5	0,068	0,8
9	Время на заправку комбайна, t_z	0,054	0,6	0,051	0,6	0,052	0,6
10	Подготовительное время, $t_{\text{подг}}$	0,764	8,7	0,588	7,3	2,063	25,7
11	Заключительное время, $t_{\text{зкл}}$	0,315	3,6	0,236	2,9	0,894	11,1
12	Продолжительность работы, T_p	7,719	87,5	7,9	97,8	7,1	88,3
13	Время на организационные мероприятия, t_o	9,423	-	9,281	-	11,01	-
14	Продолжительность переезда комбайна после окончания последнего рабочего хода до места его межсменной стоянки, t_p^k	17,09	-	16,23	-	18,17	-
15	Непроизводительное время комбайна, $\Delta t_{\text{нпр}}^l$ за период T_p	3,561	40,4	2,289	28,3	3,884	48,3
16	Время безотказной (чистой) работы комбайна, t_p	4,189	47,5	5,153	63,8	3,826	47,6
17	Время конца рабочего дня, $T_{\text{дн}}^K$	17,2	-	16,0	-	17,0	-
18	Продолжительность рабочего дня, $T_{\text{дн}}$	8,821	100,0	8,076	100,0	8,040	100,0

Таблица 2 – Статистическая характеристика непроизводительных затрат времени рабочего дня при эксплуатации кормоуборочных комбайнов

№ пп	Элементы времени, их продолжительность	Ср. значение продолжительности		Среднее квадратическое отклонение, σ	Дисперсия, D	Минимальное значение, X_{min}	Максимальное значение, X_{max}
		Абсол. величина, ч	% к $T_{\text{дн}}$				
1	Затраты времени на передвижение комбайнера от места отдыха до стоянки комбайна, t_{m-c}	0,373	3,1	0,109	0,012	0,128	0,798
2	Время на подготовку комбайна к работе, $t_{\text{пк}}$	0,746	6,2	0,150	0,023	0,255	1,209
3	Время на заправку комбайна, t_z	0,120	1,0	0,033	0,001	0,041	0,195
4	Холостой ход от места стоянки (заправки) до поля, t_{x_1}	0,265	2,2	0,074	0,005	0,091	0,429
5	Подготовка поля, $t_{\text{пн}}$	-	-	-	-	-	-
6	Холостые повороты, t_{x_1}	0,482	4,0	0,130	0,011	0,165	0,780
7	Холостые переезды по полю, t_{x_2}	0,457	3,8	0,097	0,009	0,157	0,741
8	Технологическое обслуживание, t_m	1,276	10,6	0,385	0,149	0,474	2,242
9	Время на устранение технологических отказов, t_{nm}	0,482	4,9	0,130	0,017	0,165	0,780
10	Время на техническое обслуживание комбайна, t_y	0,229	1,9	0,063	0,004	0,078	0,370
11	Время на устранение эксплуатационных отказов, t_n	2,023	16,8	0,626	0,393	0,770	3,646
12	Время простоя комбайна по организационным причинам, $t_{орг}$	0,325	2,7	0,090	0,008	0,111	0,526
13	По метеоусловиям, $t_{\text{мту}}$	-	-	-	-	-	-
14	Продолжительность времени по физиологическим причинам, t_{ϕ}	1,096	9,1	0,305	0,093	0,375	1,774
15	Контроль качества работы, t_k	0,072	0,6	0,071	0,005	0,025	0,860

Таблица 3 – Продолжительность простоев («условных отказов») кормоуборочных комбайнов по причинам «оператор» и «комбайн»

№ п/п	Продолжительность простоев по причинам	КВК-800 «Палессе»		К-Г-6 «Палессе»		«Клаас Ягуар»	
		ч	%	ч	%	ч	%
1	«Оператор», t_o	0,339	3,8	1,042	13,5	0,838	7,7
2	«Комбайн», t_r	1,628	19,3	1,568	19,4	1,501	13,5

Таблица 4 – Результаты хронометражных наблюдений за технологическим процессом уборки кормовых культур до и после устранения отказов (причина «оператор»)

№ п/п	Наименование непроизводительного элемента времени рабочего дня (отказа)	Обозначения	До устранения отказа		После устранения отказа		Величина снижения времени простоев		Проведенные мероприятия в ряде агропредприятий по снижению простоев
			ч	%	ч	%	ч	%	
1	Продолжительность перемещения оператора МСХТ от места стоянки комбайна	$t_{м-с}$	0,37	3,1	0,17	1,5	0,19	1,6	Организация доставки операторов МСХТ транспортом агропредприятия к месту стоянки комбайна
2	Время на подготовку комбайна (без заправки)	$t_{пм}$	0,75	6,2	0,6	5	0,14	1,2	Выделение помощи оператору из числа подсобных рабочих. Полнокомплектное оснащение инструментами
3	Простои по организационным причинам	$t_{ор}$	0,32	2,7	0,22	1,8	0,11	0,9	Планерки и выдача заданий оперативнее и после работы
4	Простои по физиологическим причинам	$t_{ф}$	1,09	9,1	0,702	5,8	0,4	3,3	Своевременная доставка обеда и ужина на поле с поочередным подъездом к каждому комбайну

Таблица 5 – Результаты хронометражных наблюдений за технологическим процессом уборки кормовых культур до и после устранения отказов (причина «комбайн»)

№ п/п	Наименование непроизводительного элемента времени рабочего дня (отказа)	Обозначения	До устранения отказа		После устранения отказа		Величина снижения времени простоев		Проведенные мероприятия в ряде агропредприятий по снижению простоев
			ч	%	ч	%	ч	%	
1	Продолжительность устранения эксплуатационных отказов	t_n	2,25	18,7	1,23	10,2	1,02	8,5	Оснащение комбайнов запчастями, устранение неисправностей
2	Техническое обслуживание во время работы	t_y	0,23	1,9	0,12	0,8	0,11	0,8	Организация технического обслуживания и регулировки комбайнов
3	Устранение непредвиденных нарушений технологического процесса	t_m	0,48	4,0	0,28	2,3	0,2	0,7	Более тщательный осмотр комбайна и его заблаговременная подготовка
4	Продолжительность холостых переездов (условный отказ)	$\sum t_x$	0,60	5,0	0,25	2,10	0,35	2,9	Оптимальная скорость движения. Приближение полевого стана непосредственно к убираемым полям. Выбор рационального способа движения. Окультуривание полей, снижение различных препятствий

Для снижения времени нахождения оператора МСХТ в травмоопасной зоне, повышения оперативности устранения эксплуатационных отказов кормоуборочных комбайнов первой и второй группы сложности в период проведения уборочных работ предусматривалось применение передвижных ремонтно-диагностических средств, укомплектованных на базе автомобилей ГАЗ 2705 фургон, ГАЗ-3309, ГАЗ-3308, МАЗ-457043 [6]. Количество запасных частей, которыми укомплектовывалась передвижная ремонтная мастерская, определялись из условия минимизации суммарных потерь от простоя кормоуборочного комбайна и издержек хранения запаса. Определение ущерба от наличия в течение рабочего простоя (таблица 5), например отказа по причине «комбайн» КВК-800 «Палессе», включало в себя потери, вызванные уменьшением питательной ценности кормовых культур в результате увеличения срока уборки $P_{ур}$, а также ущерб, связанный с недоиспользованием техники $P_{тех}$, и труда комбайнера P_k :

$$C_M = P_{ур} + P_{тех} + P_k \quad (1)$$

Поскольку на агропредприятиях республики зеленый корм, сенаж и обезвоженный корм (травяная мука, гранулы и брикеты) приготавливаются в основном из многолетних сеянных и естественных трав, а силос – из кукурузы, то при рассмотрении первой составляющей выражения (1) $P_{ур}$ учитывалось влияние увеличения срока уборки из-за простоев комбайна на питательную ценность многолетних трав и кукурузы. При этом учитывалось, что продолжительность периода максимального выхода веществ при заготовке кормов из многолетних трав и кукурузы невелика и полная уборка в этот период практически невозможна, так как требует огромного количества материальных и трудовых ресурсов. Уборка же раньше этого периода приводит к недобору питательной ценности кормов, позже – к их потере. С учетом вышеизложенного потери урожая за час простоя кормоуборочного комбайна можно определить из зависимости:

$$P_{ур} = 0,5(C_3 - C_{н.д}) I_{пл} K_d W_r T_{B.P} (0,5 + K_{пр}), \quad (2)$$

где C_3 – цена сенажа (силоса, зеленого корма);

$C_{н.д}$ – стоимость послеуборочной обработки травы (кукурузы);

$I_{пл}$ – плановая урожайность;

K_d – коэффициент дифференциальных потерь урожая, отражающий относительные потери, вызванные несвоевременным выполнением работ;

W_r – производительность комбайна за час сменного времени;

$K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий простои комбайна по техническим причинам в общем рабочем времени.

Расчет потерь питательной ценности кормов $P_{ур}$, вызванных увеличением срока уборки, проведен для многолетних трав, убираемых на сенаж, зеленый и обезвоженный корм, а также кукурузы – на силос. Потери из-за недоиспользования комбайнов во времени определялись по формуле

$$P_{тех} = \frac{Z \cdot Ц \cdot (E + d + \varepsilon)}{T_r}, \quad (3)$$

где Z – число технических средств, необходимых для выполнения планируемой работы на одну единицы техники в установленный срок ($Z = 0,16$);

$Ц$ – балансовая стоимость кормоуборочного комбайна КВК-800 «Палессе» $Ц = 1.267.000$ руб.); E, d, ε – нормативные коэффициенты соответственно эффективности капиталовложений, годовых отчислений на реновацию и хранение комбайна (принимаются следующие: $E = 0,15$; $d = 0,142$; $\varepsilon = 0,029$);

T_r – продолжительность работы комбайна [7] корректируется по результатам хронометражных наблюдений с учетом простоев по организационным причинам и из-за непогоды (принимаем $T_r = 750$ ч). Подставив исходные данные в формулу 3, получим $P_{тех} = 86,76$ руб/ч.

Потери, связанные с недоиспользованием труда комбайнера P_k :

$$P_k = \kappa \cdot v \sum_{i=1}^n C_{r_i}, \quad (4)$$

где k – коэффициент, учитывающий долю тарифной ставки, подлежащей оплате за простои ($K = 0,5$);

v – подлежащая оплате доля времени простоя комбайнера (принимается $v = 0,6$);

n – количество комбайнеров, обслуживающих технику (в нашем случае $n = 1$);

C_{pi} – повременная тарифная ставка по III разряду II группы i -го комбайнера ($C_{pi} = 0,79$ руб/ч).

Выполнив соответствующие вычисления (формула 4), имеем $P_k = 0,24$ руб./ч. В результате расчетов по формуле (2) получены следующие значения величин потерь урожая из-за простоя комбайна ($P_{ур}$): при уборке многолетних трав на зеленый и обезвоженный корм – 24,7, на сенаж 9,7, кукурузу на силос – 42,0 руб. за 1 ч. Учитывая, что в среднем из общей занятости комбайна на уборку трав для заготовки зеленого и обезвоженного корма приходится 39 %, сенажа и кукурузы на силос соответственно 33 и 28 %, получено средневзвешенное значение потерь урожая из-за простоев комбайна КВК-800 «Палессе» равное 24,6 руб. за 1 ч.

Ущерб от простоя кормоуборочного комбайна, обусловленный от недоиспользования комбайна и труда оператора МСХТ составил 111,60 руб/ч.

Задачей исследований также было определение непроизводительных затрат времени («условных отказов») по причине «транспорт» (таблица 6), так как если отвозка убранных кормовых культур запаздывает, то комбайн простаивает [8].

Таблица 6 – Результаты хронометражных наблюдений за технологическим процессом уборки кормовых культур до и после устранения отказов (причина «транспорт»)

№ п/п	Наименование непроизводительного элемента времени рабочего дня (отказа)	Обозначения	До устранения отказа		После устранения отказа		Величина снижения времени простоев		Проведенные мероприятия в ряде агропредприятий по снижению простоев
			ч	%	ч	%	ч	%	
1.	Затраты времени на технологическое обслуживание	t_r	1,38	11,5	0,96	8,0	0,45	3,5	Привлечение дополнительного транспорта для отвозки растительной массы. Устройство промежуточных накопителей (стационарных или передвижных)
2.	Продолжительность холостых переездов	$\sum t_x$	0,6	5,0	0,25	2,1	0,35	2,9	Подготовка подъездных дорог. Снижение простоев транспорта на гонах. Выгрузка на ходу без остановки комбайнов

Следует также отметить, что в период заготовки кормов часто выпадают дожди, ухудшается состояние внутрихозяйственной дорожной сети, что приводит к снижению безопасности и эффективности функционирования технологической системы на кормоуборке и, в частности, при выполнении транспортных работ [9].

Заключение

В результате проведенных исследований проанализированы отказы технологической системы «оператор-комбайн-транспорт» по причинам ее компонентов. Определена средняя продолжительность (1,53 ч) нахождения оператора МСХТ в течение рабочего дня в травмоопасной зоне для устранения отказов кормоуборочного комбайна.

Список цитированных источников

1. Мисун, А. Л. Прогнозируемая травмоопасность при восстановлении работоспособности кормоуборочных комбайнов / А. Л. Мисун // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. Химическая технология. Охрана труда. – 2016. – № 3. – С. 179–185.

2. Агейчик, В. А. Снижение воздействия вредных и опасных производственных факторов на операторов мобильной сельскохозяйственной техники / В. А. Агейчик, А. Л. Мисун // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 4–6 июня 2014 г. в 2 ч. / под общ. ред. И. Н. Шило, Н. А. Лабушева. – Минск : БГАТУ, 2014. – Ч. 1. – С. 403–406.

3. Муравский, А. К. Оценка травмобезопасности рабочих мест для целей их аттестации по условиям труда как элемент оценки профессионального риска / А. К. Муравский // Материалы Международной науч.-практ. конф., Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та. – 13–14 ноября 2007 г. – Пермь, 2007. – С. 126–130.

4. Справочник по вероятностным расчетам / Г. Г. Абезгауз [и др.]. – М: Воениздат, 1970. – 536 с.

5. Мисун, А. Л. Продолжительность простоев кормоуборочных комбайнов КВК-800 «Палессе», К-Г-6 «Палессе», «Клаас Ягуар» по причинам «оператор» и «комбайн» / А. Л. Мисун, А. Г. Туник, А. М. Матусевич // Техсервис – 2020 : материалы науч.-практ. конф. студ. и магистр., Минск, 20–22 мая 2020 г. ; редкол.: А. В. Миранович [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2020. – С. 89–92.

6. Применение передвижных ремонтных мастерских на базе автомобилей для оперативного устранения отказов машин / В. С. Ивашко [и др.] // Изобретатель. – 2013. – № 1. – С. 43–45.

7. Техника сельскохозяйственная. Показатели надежности СТБ 1616 – 2011. – Минск: Госстандарт, 2011. – 14 с.

8. Азаренко, В. В. Исследование причин и условий возникновения опасной ситуации в процессе уборки кормовых культур / В. В. Азаренко, А. Л. Мисун // Вестн. Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. аграрных навук. – 2015. – № 4. – С. 105–113.

9. Загоровский, И. И. Интенсивные технологии механизированной заготовки кормов из трав и силосных культур : монография / И. И. Пиуновский, В. Р. Петровец. – Горки : БГСХА, 2012. – 397 с.

References

1. Misun, A. L. Prognoziruemaya travmoopasnost' pri vosstanovlenii rabotosposobnosti kormouborocznyh kombajnov / A. L. Misun // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Himicheskaya tekhnologiya. Ohrana truda. – 2016. – № 3. – S. 179–185.

2. Agejchik, V. A. Snizhenie vozdejstviya vrednyh i opasnyh proizvodstvennyh faktorov na operatorov mobil'noj sel'skohozyajstvennoj tekhniki / V. A. Agejchik, A. L. Misun // Sovremennye problemy osvoiniya novoy tekhniki, tekhnologij, organizacii tekhnicheskogo servisa v APK : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Минск, 4–6 iyunya 2014 g. v 2 ch. / pod obshch. red. I. N. Shilo, N. A. Labusheva. – Minsk : BGATU, 2014. – CH. 1. – S. 403–406.

3. Muravskij, A. K. Ocenka travmobeopasnosti rabochih mest dlya celej ih attestacii po usloviyam truda kak element ocenki professional'nogo riska / A. K. Muravskij // Materialy Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf., Perm': Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta.– 13–14 noyabrya 2007 g. – Perm', 2007. – S. 126–130.

4. Spravochnik po veroyatnostnym raschetam / G. G. Abezgauz [i dr.]. – M: Voenizdat, 1970. – 536 s.

5. Misun, A. L. Prodolzhitel'nost' prostoev kormouborocznyh kombajnov KVK-800 «Palesse», K-G-6 «Palesse», «Klaas YAguar» po prichinam «operator» i «kombajn» / A. L. Misun, A. G. Tunik, A.M. Matusevich // Tekhservis – 2020 : materialy nauchn.-prakt. konf. stud. i magistr., Минск, 20–22 maya 2020 g. ; redkol.: A. V. Miranovich [i dr.]. – Minsk : BGATU, 2020. – S. 89–92.

6. Primenenie peredvizhnyh remonnyh masterskih na baze avtomobilej dlya operativnogo ustraneniya otkazov mashin / V. S. Ivashko [i dr.] // Izobretatel'. – 2013. – № 1. – S. 43–45.

7. Tekhnika sel'skohozyajstvennaya. Pokazateli nadezhnosti STB 1616 – 2011. – Minsk: Gosstandart, 2011. – 14 s.

8. Azarenko, V. V. Issledovanie prichin i uslovij vozniknoveniya opasnoj situacii v processe uborki kormovyh kul'tur / V. V. Azarenko, A. L. Misun // Vesci Nacyanal'naj akademii navuk Belarusi. Ser. agrarnykh navuk. – 2015. – № 4. – S. 105–113.

9. Piunovskij, I. I. Intensivnye tekhnologii mekhanizirovannoj zagotovki kormov iz trav i silosnykh kul'tur : monografiya / I. I. Piunovskij, V. R. Petrovec. – Gorki : BGSKHA, 2012. – 397 s.

Материал поступил 20.01.2023, одобрен 05.03.2023, принят к публикации 06.03.2023

МАДЭЛІРАВАННЕ І АНАЛІЗ СІЛОВОГА ЎЗАЕМАДЗЕЯННЯ ЗВЕННЯЎ У РАБОЧАЙ КАМЕРЫ ЛАНЦУЖНАГА АГРЭГАТА

У. А. Патапаў¹, С. І. Русан², Л. А. Сівачэнка³

¹ Старшы выкладчык кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі Баранавіцкага дзяржаўнага ўніверсітэта, Баранавічы, Рэспубліка Беларусь, e-mail: vladimir-potapov-1990@mail.ru

² К. т. н., дацэнт, Баранавічы, Рэспубліка Беларусь, e-mail: rusan33@mail.ru

³ Д. т. н., прафесар, прафесар кафедры транспартных і тэхналагічных машын Беларуска-Расійскага ўніверсітэта, Магілёў, Рэспубліка Беларусь, e-mail: 228011@mail.ru

Рэферат

У артыкуле выкладзены алгарытм разліку рабочай камеры ланцужнага агрэгата, які дазваляе набліжана вызначыць сілы ўзаемадзеяння рабочых органаў з каромыслам прываднога механізма і нерухомай апорай. Праведзены статычны і дынамічны аналіз разліковай мадэлі. Вынікі работы могуць быць выкарыстаны для канструявання ланцужных агрэгатаў і даследавання працэсаў дэзінтэграцыі і класіфікацыі матэрыялаў.

Ключавыя словы: ланцужны агрэгат, рабочая камера, разліковая мадэль, статычны аналіз, дынамічны аналіз.

MODELING AND ANALYSIS OF FORCE INTERACTION OF LINKS IN THE WORKING CHAMBER OF THE CHAIN UNIT

V. A. Potapov, S. I. Rusan, L. A. Sivachenko

Abstract

The article presents an algorithm for calculating the working chamber of a chain unit, which makes it possible to approximately determine the forces of interaction of the working bodies with the rocker arm of the drive mechanism and the fixed support. A static and dynamic analysis of the calculation model was carried out. The results of the work can be used to design chain units and study the processes of disintegration and classification of materials.

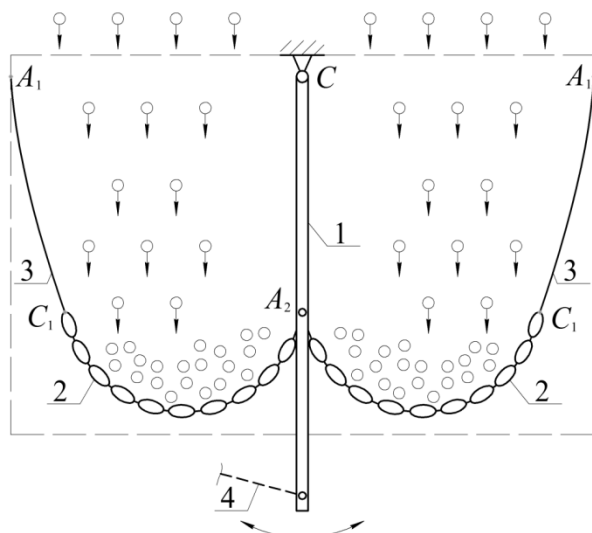
Keywords: chain unit, working chamber, calculation model, static analysis, dynamic analysis.

Уступ

Прызначэнне, канструкцыі і функцыянаванне ланцужных агрэгатаў, як і іншых машын для дэзінтэграцыі матэрыялаў, апісаны ў манаграфіі [1] і часткова ў артыкулах [2, 3] ды іншых. У наш час працягваецца распрацоўка перспектывіўных варыянтаў здрабняльнай тэхнікі, адаптаваных да перапрацоўкі і класіфікацыі канкрэтных матэрыялаў. У сувязі з гэтым узнікае набыдчасць паглыбленага вывучэння іх рабочых органаў, ад якіх залежыць патрэбная якасць перапрацоўкі і прадукцыйнасць агрэгатаў.

Канструкцыя і функцыянаванне рабочай камеры

Рабочай камерай у структуры ланцужнага агрэгата будзем называць частку прасторы са звеннямі, што рухаюцца ў ёй, дзе адбываецца перапрацоўка рэчыва – яго разбурэнне і прасейванне. Аб'ектам нашага даследавання з'яўляецца варыянт рабочай камеры, схема якой прадстаўлена на рысунку 1 (абмежавана пункцірнай лініяй).



1 – два каромыслы (на рысунку сумяшчаюцца);

2 – ланцужныя палотны; 3 – гнуткія сценкі; 4 – шатун

Рысунк 1 – Мадэль рабочай камеры ланцужнага агрэгата

У стане раўнавагі звенняў камера мае дзве вертыкальныя плоскасці сіметрыі: адна з іх паралельна да плоскасці рысунка – у ёй рухаецца шатун 4 прываднога механізма, другая праходзіць праз два каромыслы 1 (на рысунку яны сумяшчаюцца). Ланцужныя палотны 2 адной старонаю з дапамогай штангі (на рысунку не паказана) злучаны з каромысламі, другой – з гнуткімі рухомымі сценкамі 3. Падчас работы агрэгата каромыслы, замацаваныя на восі С, выконваюць вагальныя рухі, якія перадаюцца ланцужным палотнам і сценкам. Часцінкі рэчыва засыпаюцца ў камеру зверху, трапляюць пад удары ланцужных палотнаў, разбураюцца і прасыпаюцца ў падланцужную ёмісць.

Заўважым, што на рысунку 1 паказаны не ўсе рабочыя органы камеры, а толькі тыя, сілавое ўзаемадзеянне якіх патрабуе найбольшай увагі пры праектаванні ланцужных агрэгатаў. Найперш – гэта сілы, што ўзнікаюць у злучэннях палотнаў з каромысламі і гнуткімі сценкамі, і сценкам з жорсткімі апорамі А1. На першым этапе даследавання будзем вывучаць сілы ўзаемадзеяння рабочых органаў камеры без уліку сіл інерцыі. Аб'ектам раўнавагі прымем сукупнасць палотнаў 2 са сценкамі 3. Наяўнасць сіметрыі рабочай камеры адносна вертыкальнай плоскасці, што праходзіць праз каромыслы 1, дазваляе разглядаць толькі адну яе левую палову. Форма выбраннага намі аб'екта раўнавагі нават пры дзеянні на яго толькі ўласнай сілы цяжару не мае дакладнага матэматычнага апісання. Адсутнасць ідэальнай гнуткасці і характар знешняй нагрузкі не дазваляюць мадэліраваць аб'ект раўнавагі ланцужнай лініяй [4, 5]. Таму для набліжанага сілавога аналізу прымем мадэль аб'екта, даступную для апісання сродкамі тэарэтычнай механікі, у выглядзе стрыжняў А1В і ВА2 (рысунк 2), злучаных шарнірна паміж сабою, са стойкай (апорай) А1 і каромыслам 1 (рысунк 1).

Даўжыні стрыжняў і іх скарачэнныя назвы абазначым літарамі l_1 , l_2 . Прымем $l_1 + l_2 = L$, дзе L – сумарная даўжыня лініі А1С1А2 (рысунк 1). Каб каардынату z магла прымаць значэнне $z = 0$, будзем лічыць у разліках, што $l_1 = l_2 + e$.

У прынятай мадэлі левая апора А1, як і ў рэальнай рабочай камеры, застаецца нерухомай, а правая А2 можа перамяшчацца. Пры вывучэнні залежнасці сіл узаемадзеяння ў стане раўнавагі ад габарытнай шырыні z паловы камеры апоры А2 разам са стрыжнем СВ2 будзем надаваць паступальнае перамяшчэнне, змяняючы каардынату z . Пры выведзенай з дапамогай шатуна 4 (рысунк 1) сістэме са стану раўнавагі апора А2 будзе рухацца па дузе акружнасці радыуса e . Яе становішча будзем вызначаць вуглом павароту φ стрыжня СВ2 пры $z = const$.

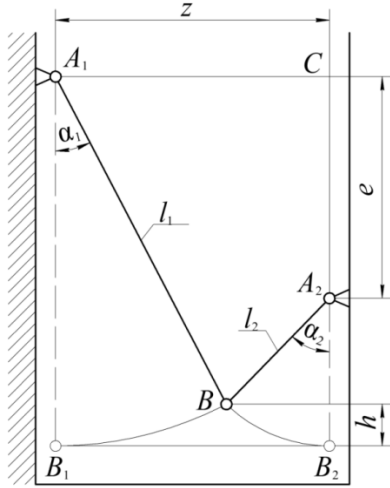


Рисунок 2 – Ілюстрація да визначення геаметрычных параметраў пры вертыкальным становішчы каромысла

Визначэнне становішча аб'екта раўнавагі ў рабочай камеры
Становішча сістэмы стрыжняў l_1, l_2 , якое адпавядае нерухомаму (вертыкальнаму) каромыслу, будзем задаваць вугламі α_1, α_2 (рысунак 2). Знайдзем іх. Аналізуючы рысунак, устанавліваем відавочныя суадносіны:

$$\begin{cases} l_1 \sin \alpha_1 + l_2 \sin \alpha_2 = z; \\ l_1 \cos \alpha_1 - l_2 \cos \alpha_2 = e \end{cases} \quad (1)$$

Перапісваем сістэму (1) у выглядзе:

$$\begin{cases} (l_2 \sin \alpha_2)^2 = (z - l_1 \sin \alpha_1)^2; \\ (l_2 \cos \alpha_2)^2 = (l_1 \cos \alpha_1 - e)^2 \end{cases}$$

Складшы тут паасобку левыя і правыя часткі роўнасцей, атрымаем:

$$2l_1(z \sin \alpha_1 + e \cos \alpha_1) = z^2 + e^2 + l_1^2 - l_2^2 \text{ ці скарачана}$$

$$z \sin \alpha_1 + e \cos \alpha_1 = d, \quad (2)$$

дзе $d = (z^2 + e^2 + l_1^2 - l_2^2) / 2l_1$. Улічваем, што ў роўнасці (2)

$\cos \alpha_1 = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_1}$. Тады, выключыўшы ў ёй радыкал, атрымаем: $(e^2 + z^2) \sin^2 \alpha_1 - 2dz \sin \alpha_1 + (d^2 - e^2) = 0$. Адсюль

$$\sin \alpha_1 (\sin \alpha_1) = \left(dz \pm e \sqrt{z^2 + e^2 - d^2} \right) / (e^2 + z^2). \quad (3)$$

Аналіз формулы (3) паказвае, што ў ёй неабходна перед радыкалам пакінуць знак «-». Далей, з першага ўраўнення сістэмы (1) знаходзім:

$$\sin \alpha_2 = (z - l_1 \sin \alpha_1) / l_2. \quad (4)$$

Калі ўлічыць, што ў формуле (3) велічыня d , вызначаемая па формуле (2), уяўляе сабою даўжыню адрэзка A_1E (рысунак 3), дзе E – аснова перпендыкуляра p , апушчанага з пункта A_2 на стрыжень A_1B , то яе можна перапісаць у выглядзе:

$$\sin \alpha_1 = (dz - ep) / l^2, \quad (5)$$

дзе пераменная $l = \sqrt{z^2 + e^2} = A_1A_2$.

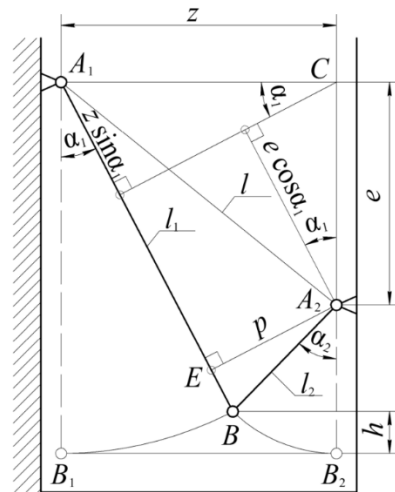


Рисунок 3 – Ілюстрація да вызначення геаметрычных суадносін пры вертыкальным становішчы каромысла

Параўноўваючы формулы (5) і (3), заўважым, што даўжыня перпендыкуляра p у формуле (5) роўна радыкалу $\sqrt{z^2 + e^2 - d^2}$ ў формуле (3). Адзначым, што пераменная l змяняецца ў межах ад $l_{\min} = e$ да $l_{\max} = l_1 + l_2$. Формула (4) застаецца без змянення.

Пры павароце каромысла (рысунак 4) вуглы α_1, α_2 узрастаюць. Каб знайсці іх новыя значэнні α'_1, α'_2 , выкарыстаем спосаб, распрацаваны намі раней [6].

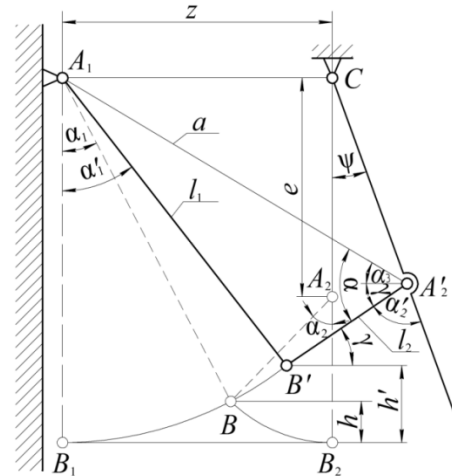


Рисунок 4 – Ілюстрація да вызначення геаметрычных параметраў пры адхіленым становішчы каромысла

Звернемся да названага рысунка 4. Пункт B' знаходзім на перасячэнні дзвюх акружнасцей з цэнтрамі ў пунктах A_1, A'_2 , радыусы якіх раўны l_1, l_2 . Пачатак восей каардынат сумясцім з пунктам A_1 . У якасці параметрычных вуглоў прымем α'_1 і γ . Запішам ураўненні акружнасцей для пункта B' :

$$\begin{cases} x_{B'} = x_{A'_2} - l_2 \cos \gamma; \\ y_{B'} = y_{A'_2} + l_2 \sin \gamma \end{cases} \quad (6)$$

$$(x_{B'} = l_1 \sin \alpha'_1; y_{B'} = l_1 \cos \alpha'_1). \quad (7)$$

Тут $x_{A'_2} = z + e \sin \psi$; $y_{A'_2} = e \cos \psi$. У роўнасцях (6) пакуль невядомы параметрычны вугал γ . Знайдзем яго. Спачатку разгледзім трохвугольнік $A_1B'A'_2$. Абзначым яго невядомую старану

A_1A_2' літарай a і вызначым яе з трохвугольніка $A_1A_2'C$. Паводле тэарэмы косінусаў $a^2 = z^2 + e^2 - 2ze \cos(\pi/2 + \psi)$. Цяпер на падставе той жа тэарэмы запісваем $l_1^2 = a^2 + l_2^2 - 2al_2 \cos \alpha$, адкуль $\cos \alpha = (a^2 + l_2^2 - l_1^2) / 2al_2 = t_1$ і $\alpha = \arccos t_1$. Як відаць на рысунку 4, шукаемый пры вяршыне A_2' вугал $\gamma = \alpha - \alpha_3$, дзе $\alpha_3 = \arcsin(e \cos \psi / a)$. Такім чынам:

$$\gamma = \arccos t_1 - \arcsin t_2,$$

дзе $t_2 = e \cos \psi / a$. Далей з першых роўнасцей (6), (7) выключаем $x_{B'}$; атрымліваем: $x_{A_2'} - l_2 \cos \gamma = l_1 \sin \alpha_1'$, адкуль $\sin \alpha_1' = (x_{A_2'} - l_2 \cos \gamma) / l_1 = t_3$ і

$$\alpha_1' = \arcsin t_3.$$

Аналізуючы вуглы пры пункце A_2' , знаходзім: $\pi/2 - \psi + \gamma + \alpha_2' = \pi$. Адсюль:

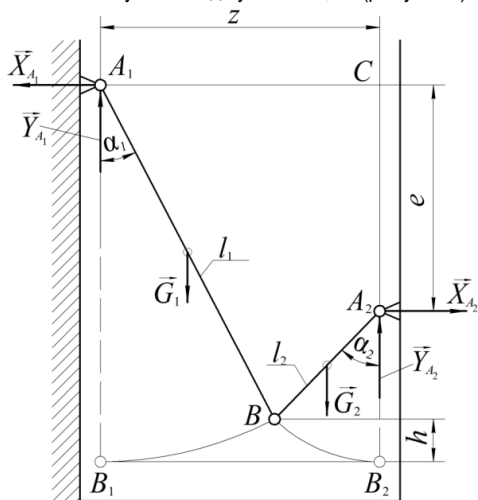
$$\alpha_2' = \pi/2 + \psi - \gamma.$$

Пераходзім да сілавога аналізу. Сілы ўзаемадзеяння звенняў будзем разглядаць як рэакцыі сувязей, накладзеных на матэрыяльны аб'ект. Для іх вызначэння прыменім методыку, выкладзеную ў курсах тэарэтычнай механікі ў раздзеле «Статыка».

У якасці аб'екта раўнавагі прымем апісаную вышэй мадэль (ці яе частку) рабочага органа камеры ў выглядзе статычнавызначальнай механічнай сістэмы, што складаецца з аднародных стрыжняў l_1, l_2 (рысункі 3, 4). Іх сілы цяжару абазначым літарамі G_1, G_2 . Будзем даследаваць два варыянты нагружэння: а) сілы G_1, G_2 прыкладзены ў цэнтрах цяжару стрыжняў; б) сілы G_1, G_2 перанесены ў шарнір B (гл. рысунак 7). Рэакцыі знойдзем пры вертыкальным і павёрнутым становішчы каромысла. Паколькі стрыжні аднародны і з аднолькавай пагоннай масай, то паміж іх сіламі цяжару мае месца наступная залежнасць: $G_2 / G_1 = l_2 / l_1$; адсюль $G_2 = l_2 G_1 / l_1$. Калі ўлічыць, што тут $l_2 = l - e = (1 - \mu)l_1$, то канчаткова атрымліваем: $G_2 = (1 - \mu)G_1$, дзе $\mu = e / l_1$. Суму сіл, перанесеных у шарнір B , абазначым літарай G : $G = G_1 + G_2 = (2 - \mu)G_1$.

Вызначэнне сіл ўзаемадзеяння звенняў пры вертыкальным становішчы каромысла

Вызваляем сістэму A_1BA_2 ад сувязей A_1, A_2 (рысунак 5).



Рысунак 5 – Ілюстрацыя да вызначэння сіл ўзаемадзеяння звенняў пры вертыкальным становішчы каромысла (сілы G_1, G_2 прыкладзены ў цэнтрах цяжару стрыжняў)

І запісваем для яе і асобна стрыжня A_1B умовы раўнавагі:

$$\left. \begin{aligned} \sum M_B(\vec{F}_i) &= X_{A_1} l_1 \cos \alpha_1 - Y_{A_1} l_1 \sin \alpha_1 + G_1 l_1 \sin \alpha_1 / 2 = 0; \\ \sum M_{A_2}(\vec{F}_i) &= X_{A_1} e - Y_{A_1} z + G_1(z - l_1 \sin \alpha_1 / 2) + G_2 l_2 \sin \alpha_2 / 2 = 0 \end{aligned} \right\}$$

Ці
$$\left. \begin{aligned} m_1 X_{A_1} - n_1 Y_{A_1} &= k_1; \\ m_2 X_{A_1} - n_2 Y_{A_1} &= k_2 \end{aligned} \right\}, \tag{8}$$

дзе
$$\left. \begin{aligned} m_1 &= l_1 \cos \alpha_1; m_2 = e; n_1 = l_1 \sin \alpha_1; n_2 = z; k_1 = -G_1 l_1 \sin \alpha_1 / 2; \\ k_2 &= -[G_1(z - l_1 \sin \alpha_1 / 2) + G_2 l_2 \sin \alpha_2 / 2] \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

Тут сістэму ўраўненняў (8) з двума невядомымі X_{A_1}, Y_{A_1} , як і далей, будзем рашаць спосабам ураўноўвання каэфіцыентаў пры аднолькавых невядомых. Так, каб выключыць з сістэмы (8) невядомую Y_{A_1} , першае яе ўраўненне памножым на n_2 , другое – на $(-n_1)$, і складзем паміж сабою атрыманыя новыя роўнасці; знойдзем: $(m_1 n_2 - m_2 n_1) X_{A_1} = n_2 k_1 - n_1 k_2$. Адсюль:

$$X_{A_1} = (n_2 k_1 - n_1 k_2) / (m_1 n_2 - m_2 n_1). \tag{10}$$

Аналагічна, пасля памнажэння першага ўраўнення сістэмы (8) на m_2 , а другога – на $(-m_1)$ і складання вынікаў, атрымаем:

$$Y_{A_1} = (m_2 k_1 - m_1 k_2) / (m_1 n_2 - m_2 n_1). \tag{11}$$

Калі цяпер падставім каэфіцыенты (9) у формулы (10), (11) і ўлічыць залежнасць паміж сіламі G_2 і G_1 , то атрымаем канчатковыя формулы для вылічэння кампанентаў рэакцыі апоры A_1 :

$$(X_{A_1} = p_1 G_1, Y_{A_1} = p_2 G_1). \tag{12}$$

На падставе залежнасцей (12) знаходзім раўнадзейную рэакцыю той жа апоры:

$$R_{A_1} = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} G_1. \tag{13}$$

Яе вугал нахілу β_1 да восі A_1x вызначаецца з формулы:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = Y_{A_1} / X_{A_1} = p_2 / p_1. \tag{14}$$

У формулах (12), (13), (14) прыняты абазначэнні:

$$p_1 = l_1 \sin \alpha_1 \left\{ \left[z - l_1 \sin \alpha_1 / 2 + (1 - \mu)^2 l_1 \sin \alpha_2 / 2 \right] - z / 2 \right\} / p;$$

$$p_2 = l_1 \left\{ \cos \alpha_1 \left[z - l_1 \sin \alpha_1 / 2 + (1 - \mu)^2 l_1 \sin \alpha_2 / 2 \right] - e \sin \alpha_1 / 2 \right\} / p;$$

$$p = l_1 (z \cos \alpha_1 - e \sin \alpha_1).$$

Для вызначэння рэакцыі апоры A_2 разглядаем раўнавагу сістэмы A_1BA_2 цалкам і асобна стрыжня BA_2 . Атрымліваем наступныя ўмовы раўнавагі:

$$\left. \begin{aligned} \sum M_B(\vec{F}_i) &= Y_{A_2} l_2 \sin \alpha_2 - X_{A_2} l_2 \cos \alpha_2 - G_2 l_2 \sin \alpha_2 / 2 = 0; \\ \sum M_{A_1}(\vec{F}_i) &= Y_{A_2} z + X_{A_2} e - G_2(z - l_2 \sin \alpha_2 / 2) - G_1 l_1 \sin \alpha_1 / 2 = 0 \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

Перапісваем умовы (15) у скарачаным выглядзе:

$$\left. \begin{aligned} a_1 Y_{A_2} - b_1 X_{A_2} &= g_1; \\ a_2 Y_{A_2} + b_2 X_{A_2} &= g_2 \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

Сістэму ўраўненняў (16) рашаем тым жа спосабам, што і (8). Спачатку памнажаем першае ўраўненне сістэмы (16) на a_2 , другое – на $(-a_1)$, складываем паміж сабою новыя роўнасці. З іх сумы знаходзім:

$$X_{A_2} = (a_1 g_2 - a_2 g_1) / (a_2 b_1 + a_1 b_2). \quad (17)$$

Затим памнажаем першую і другую роўнасці (16) адпаведна на b_2 і b_1 і зноў складваем выніковыя роўнасці. З іх сумы атрымаем:

$$Y_{A_2} = (b_2 g_1 + b_1 g_2) / (a_1 b_2 + a_2 b_1). \quad (18)$$

Казфіцыенты, што ўваходзяць у (16), (17), (18), вызначаюцца па формулах:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= (l_1 - e) \sin \alpha_2; \quad a_2 = z; \quad b_1 = (l_1 - e) \cos \alpha_2; \\ b_2 &= e; \quad g_1 = G_2 (l_1 - e) \sin \alpha_2 / 2; \\ g_2 &= G_1 l_1 \sin \alpha_1 / 2 + G_2 [z - (l_1 - e) \sin \alpha_2 / 2]; \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

тут множнік a_1 можа быць прадстаўлены ў выглядзе: $a_1 = z - l_1 \sin \alpha_1$. Пасля падстаноўкі каэфіцыентаў (19) у (17), (18)

атрымаем кампаненты $X_{A_2} = d_1 G_1$; $Y_{A_2} = d_2 G_1$, а затым і раўнадзейную рэакцыю апоры A_2 у выглядзе:

$$R_{A_2} = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} G_1,$$

дзе $d_1 = a_1 [(z - a_1) / 2 + (1 - \mu)(z - a_1) / 2 - (1 - \mu)a_2 / 2] / d$;

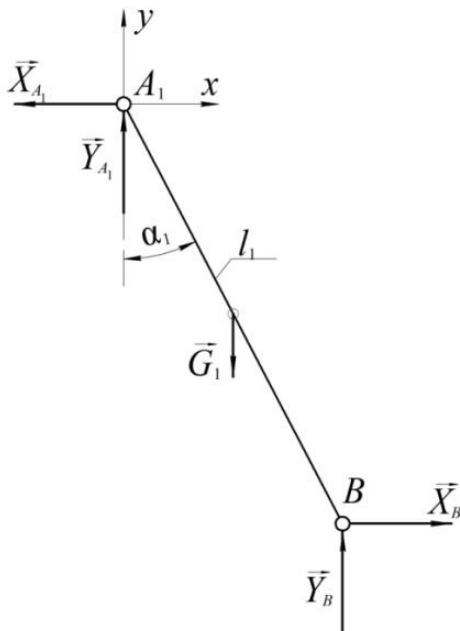
$$d_2 = \{b_1 [(z - a_1) / 2 + (1 - \mu)(z - a_1) / 2] + b_2 a_1 (1 - \mu) / 2\} / d$$
;

$$d = (l_1 - e)(e \sin \alpha_2 + z \cos \alpha_2).$$

Вугал нахілу β_2 рэакцыі R_{A_2} да восі $A_1 x$ вызначаем з формулы:

$$\operatorname{tg} \beta_2 = d_2 / d_1.$$

Для вызначэння сілы ўзаемадзеяння паміж стрыжнямі l_1, l_2 у шарніры B разгледзім раўнавагу стрыжня l_1 (рысунак 6).



Рысунак 6 – Ілюстрацыя да вызначэння сіл узаемадзеяння стрыжняў l_1, l_2 у шарніры B

Запісваем яго ўмовы раўнавагі:

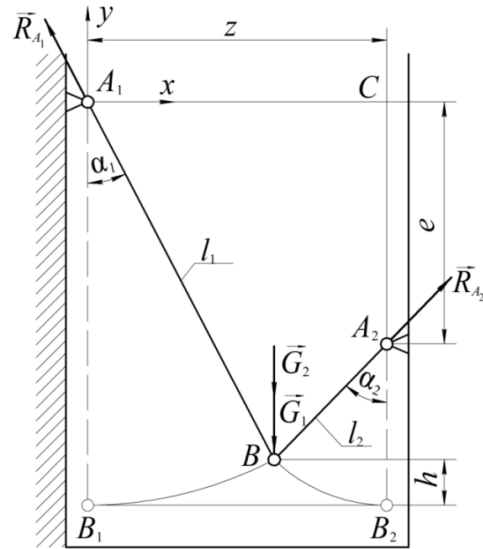
$$\sum X_i = X_B - X_{A_1} = 0; \quad \sum Y_i = Y_B + Y_{A_1} - G_1 = 0.$$

Адкуль $X_B = X_{A_1}$; $Y_B = G_1 - Y_{A_1}$ і $R_B = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2}$

ці з улікам формул (12):

$$X_B = p_1 G_1; \quad Y_B = (1 - p_2) G_1 \quad \text{і} \quad R_B = \sqrt{p_1^2 + (1 - p_2)^2} G_1.$$

Пераходзім да другога варыянта нагружэння. Сілы цяжару G_1, G_2 прыкладаем у шарнір B (рысунак 7).



Рысунак 7 – Ілюстрацыя да вызначэння сіл узаемадзеяння звянаў пры вертыкальным становішчы каромысла (сілы G_1, G_2 прыкладзены ў шарнір B)

Цяпер кожны са стрыжняў l_1, l_2 нагружаны толькі ў сваіх канцах – шарнірах A_1, A_2, B . У гэтым выпадку паводле аксіёмы аб абсалютна цвёрдым целе (з курса тэарэтычнай механікі) лініі дзеяння рэакцый супадаюць з прамымі, што праходзяць праз шарніры $A_1 B$ і $A_2 B$.

Значыць, напрамкі рэакцый R_{A_1}, R_{A_2} знешніх сувязей вядомы. У якасці аб'екта раўнавагі разглядаем сістэму $A_1 B A_2$. Складаем для яе ўмовы раўнавагі:

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i &= R_{A_2} \sin \alpha_2 - R_{A_1} \sin \alpha_1 = 0; \\ \sum Y_i &= R_{A_2} \cos \alpha_2 + R_{A_1} \cos \alpha_1 - (G_1 + G_2) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

З першага ўраўнення сістэмы (20) знаходзім $R_{A_1} = \sin \alpha_2 R_{A_2} / \sin \alpha_1$ і падстаўляем у другое; маем:

$$R_{A_2} (\cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 / \sin \alpha_1) - (G_1 + G_2) = 0. \quad \text{Адкуль:}$$

$$R_{A_2} = (2 - \mu) G_1 / (\cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \operatorname{ctg} \alpha_1). \quad (21)$$

Аналагічна знаходзім другую невядомую рэакцыю. З першага ураўнення (20) выражаем R_{A_2} : $R_{A_2} = \sin \alpha_1 R_{A_1} / \sin \alpha_2$.

Падстаўляем знойдзенае R_{A_2} у другое ўраўненне гэтай жа сістэмы:

$$R_{A_1} (\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 / \sin \alpha_2 + \cos \alpha_1) - (G_1 + G_2) = 0.$$

Адкуль

$$R_{A_1} = (2 - \mu) G_1 / (\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 \operatorname{ctg} \alpha_2). \quad (22)$$

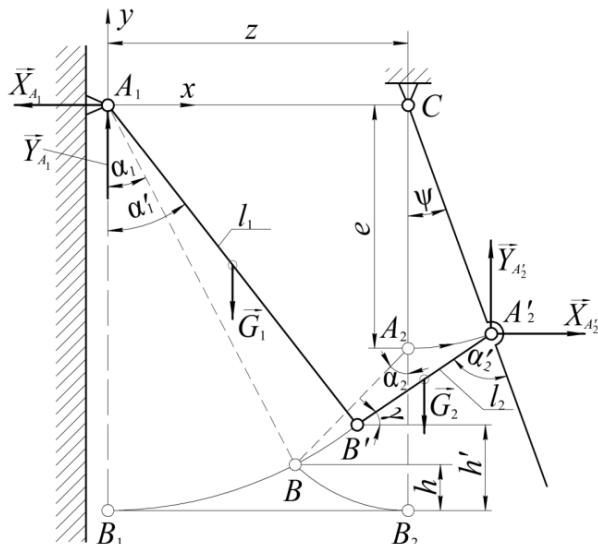
Знаходзім складовыя вектараў R_{A_1}, R_{A_2} па воясах каардынат:

$$\left(\begin{aligned} X_{A_1} &= R_{A_1} \sin \alpha_1; \quad Y_{A_1} = R_{A_1} \cos \alpha_1; \\ X_{A_2} &= R_{A_2} \sin \alpha_2; \quad Y_{A_2} = R_{A_2} \cos \alpha_2 \end{aligned} \right). \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum M_{B'}(\vec{F}_i) &= -X_{A_2} l_2 \sin \gamma + Y_{A_2} l_2 \cos \gamma - G_2 l_2 \cos \gamma / 2 = 0; \\ \sum M_{A_1}(\vec{F}_i) &= X_{A_2} e \cos \psi + Y_{A_2} (z + e \sin \psi) - G_2 (l_2 \cos \gamma / 2 + l_1 \sin \alpha'_1) - G_1 l_1 \sin \alpha'_1 / 2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Вызначэнне сіл узаемадзеяння звенняў пры адхіленым становішчы каромысла

Вугал адхілення абазначым літарай ψ (рысунак 8).



Рысунак 8 – Ілюстрацыя да вызначэння сіл узаемадзеяння звенняў пры адхіленым становішчы каромысла (сілы G_1, G_2 прыкладзены ў цэнтрах цяжару стрыжняў)

Разглядаем раўнавагу сістэмы $A_1 B' A_2'$. Прымаем першы варыянт нагружэння сіламі G_1, G_2 . Вызваляем аб'ект раўнавагі ад сувязей $A_1 A_2'$. Для вызначэння складаемых X_{A_2}' , Y_{A_2}' запісваем умовы раўнавагі асобна для стрыжня $B' A_2'$ і для ўсёй сістэмы $A_1 B' A_2'$.

Запісваем ураўненні сістэмы (24) у скарачаным выглядзе:

$$(-c_1 X_{A_2}' + d_1 Y_{A_2}' = e_1; c_2 X_{A_2}' + d_2 Y_{A_2}' = e_2). \quad (25)$$

Памнажаем першае ўраўненне сістэмы (25) на c_2 , другое на c_1 і складваем памножаныя ўраўненні:

$$(c_2 d_1 + c_1 d_2) Y_{A_2}' = e_1 c_2 + e_2 c_1. \text{ Адсюль:}$$

$$Y_{A_2}' = (e_1 c_2 + e_2 c_1) / (c_2 d_1 + c_1 d_2). \quad (26)$$

Зноў вяртаемся да сістэмы (25). Памнажаем першую яе роўнасць на $(-d_2)$, другую – на d_1 , і складваем вынікі:

$$(c_1 d_2 + c_2 d_1) X_{A_2}' = d_1 e_2 - d_2 e_1. \text{ Адсюль знаходзім:}$$

$$X_{A_2}' = (d_1 e_2 - d_2 e_1) / (c_1 d_2 + c_2 d_1). \quad (27)$$

Па кампанентах (26), (27) знаходзім раўнадзейную рэакцыю ў кінематычнай пары A_2' :

$$R_{A_2}' = \sqrt{X_{A_2}'^2 + Y_{A_2}'^2}.$$

З параўнання (24) і (25) устанавліваем, што

$$\left[\begin{aligned} c_1 &= l_2 \sin \gamma; c_2 = e \cos \psi; d_1 = l_2 \cos \gamma; \\ d_2 &= z + e \sin \psi; e_1 = G_2 l_2 \cos \gamma / 2; \\ e_2 &= G_2 (l_2 \cos \gamma / 2 + l_1 \sin \alpha'_1) + G_1 l_1 \sin \alpha'_1 / 2 \end{aligned} \right] \quad (28)$$

Для вызначэння рэакцыі R_{A_1} разглядаем раўнавагу стрыжня $A_1 B'$ і ўсёй сістэмы $A_1 B' A_2'$ (рысунак 8). Запісваем для іх умовы раўнавагі:

$$\left. \begin{aligned} \sum M_{B'}(\vec{F}_i) &= X_{A_1} l_1 \cos \alpha'_1 - Y_{A_1} l_1 \sin \alpha'_1 + G_1 l_1 \sin \alpha'_1 / 2 = 0; \\ \sum M_{A_2}'(\vec{F}_i) &= X_{A_1} e \cos \psi - Y_{A_1} (z + e \sin \psi) + \\ &+ G_1 (e \sin \psi + z - l_1 \sin \alpha'_1 / 2) + G_2 l_2 \cos \gamma / 2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Прадстаўляем сістэму ўраўненняў (29) у скарачаным выглядзе:

$$(f_1 X_{A_1} - h_1 Y_{A_1} = i_1; f_2 X_{A_1} - h_2 Y_{A_1} = i_2). \quad (30)$$

Памнажаем першае ўраўненне на $(-h_2)$, другое – на h_1 . Выніковыя роўнасці складваем; з атрыманых выражэнняў знаходзім:

$$X_{A_1} = (i_2 h_1 - i_1 h_2) / (f_2 h_1 - f_1 h_2). \quad (31)$$

Аналагічна вызначаем Y_{A_1} : першае ўраўненне сістэмы (30) памнажаем на $(-f_2)$, другое – на f_1 . З атрыманых пасля складання вынікаў роўнасці вызначаем:

$$Y_{A_1} = (i_2 f_1 - i_1 f_2) / (f_2 h_1 - f_1 h_2). \quad (32)$$

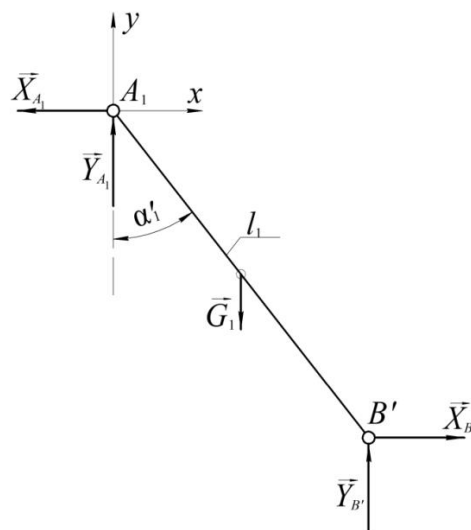
У формулах (30), (31), (32) прыняты абазначэнні:

$$\left[\begin{aligned} i_1 &= -l_1 \sin \alpha'_1 G_1 / 2; \\ i_2 &= -[e \sin \psi + (z - l_1 \sin \alpha'_1 / 2)] G_1 - G_2 l_2 \cos \gamma / 2; \\ f_1 &= l_1 \cos \alpha'_1; f_2 = e \cos \psi; h_1 = l_1 \sin \alpha'_1; h_2 = z + e \sin \psi. \end{aligned} \right] \quad (33)$$

На падставе (31), (32) знаходзім раўнадзейную рэакцыю апоры A_1 :

$$R_{A_1} = \sqrt{X_{A_1}^2 + Y_{A_1}^2}.$$

Знойдзем сілы ўзаемадзеяння звенняў h_1, h_2 у шарніры B' . Для гэтага разгледзім раўнавагу звяна h_1 (рысунак 9).



Рысунак 9 – Ілюстрацыя да вызначэння сіл узаемадзеяння стрыжняў h_1, h_2 у шарніры B'

Записуємо для яго ўмовы раўнавагі:

$$\sum X_i = -X_{A_1} + X_{B'} = 0; \sum Y_i = Y_{A_1} + Y_{B'} - G_1 = 0.$$

Адсюль знаходзім:

$$X_{B'} = X_{A_1}; Y_{B'} = G_1 - Y_{A_1}; R_{B'} = \sqrt{X_{B'}^2 + Y_{B'}^2}.$$

Тут $e_1 = [-A' + (z + e \sin \psi) / 2] \sin \alpha'_1 / [e \cos \psi \sin \alpha'_1 - \cos \alpha'_1 (z + e \sin \psi)];$

$$e_2 = [-A' \cos \alpha'_1 + e \sin \alpha'_1 \cos \psi / 2] / [e \cos \psi \sin \alpha'_1 - \cos \alpha'_1 (z + e \sin \psi)];$$

$$c_1 = \left\{ (1 - \mu) \cos \gamma l_1 [(1 - \mu) ((1 - \mu) \cos \gamma + 2 \sin \alpha'_1) + \sin \alpha'_1] - (1 - \mu)^2 (z + e \sin \psi) \cos \gamma \right\} /$$

$$/ 2(1 - \mu) [\sin \gamma (z + e \sin \psi) + e \cos \gamma \cos \psi];$$

$$c_2 = \left\{ (1 - \mu) \sin \gamma l_1 [(1 - \mu) ((1 - \mu) \cos \gamma + 2 \sin \alpha'_1) + \sin \alpha'_1] + (1 - \mu)^2 e \cos \gamma \cos \psi \right\} /$$

$$/ 2(1 - \mu) [\sin \gamma (z + e \sin \psi) + e \cos \gamma \cos \psi];$$

$$A' = e \sin \psi + (z - l_1 \sin \alpha'_1 / 2) + (1 - \mu)^2 l_1 \cos \gamma / 2$$

Вуглы, утвораныя раўнадзейнымі R_{A_1} , $R_{A'_2}$ з воссю A_1x , вылічваюцца па формулах:

$$\beta_1 = \arctg(e_2 / e_1), \quad \beta_2 = \arctg(c_2 / c_1).$$

Адзначым, што ўсюды на рысунках паказаны рэакцыі, прыкладзеныя да аб'ектаў раўнавагі. На апоры яны дзейнічаюць у процілеглых напрамках. На рысунку 10 пункцірам паказаны напрамак рэакцыі $R_{A'_2}$, прыкладзенай да каромысла, з якім яна ўтварае вугал

$$\alpha''_2 = \pi / 2 + \psi - \beta_2.$$



Рысунак 10 – Ілюстрацыя да вызначэння напрамку рэакцыі $R_{A'_2}$

Разгледзім другі вырыянт нагружэння сістэмы сіламі G_1 , G_2 (рысунак 11).

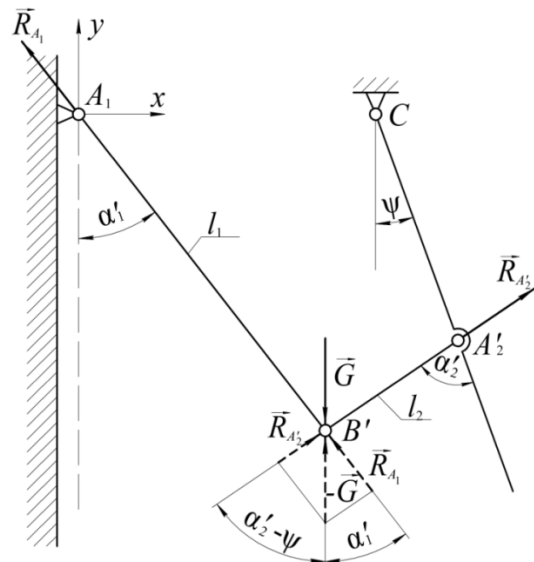
Аб'ектам раўнавагі прымем мадэль у становішчы $A_1B'A'_2$. На яе дзейнічае, як нам ужо вядома, сыходная сістэма сіл. Запісваем для яе ўмовы раўнавагі:

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i &= -R_{A_1} \sin \alpha'_1 + R_{A'_2} \sin (\alpha'_2 - \psi) = 0; \\ \sum Y_i &= R_{A_1} \cos \alpha'_1 + R_{A'_2} \cos (\alpha'_2 - \psi) - G = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (35)$$

Падставім каэфіцыенты (28) у (26), (27), а (33) – у (31), (32); атрымаем:

$$X_{A_1} = e_1 G_1; Y_{A_1} = e_2 G_1; R_{A_1} = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} G_1.$$

$$\left(X_{A'_2} = c_1 G_1; Y_{A'_2} = c_2 G_1; R_{A'_2} = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} G_1 \right). \quad (34)$$



Рысунак 11 – Ілюстрацыя да вызначэння сіл узаемадзеяння звянаў пры адхіленым становішчы каромысла (сілы G_1 , G_2 прыкладзены ў шарнір B')

дзе па-ранейшаму, $G = G_1 + G_2$. Першую роўнасць (35) памнажаем на $\cos (\alpha'_2 - \psi)$, другую на $-\left[\sin (\alpha'_2 - \psi) \right]$; выніковыя роўнасці складваем:

$$-\left[\sin \alpha'_1 \cos (\alpha'_2 - \psi) + \cos \alpha'_1 \sin (\alpha'_2 - \psi) \right] R_{A_1} = -G \sin (\alpha'_2 - \psi).$$

Адсюль: $R_{A_1} = G \sin (\alpha'_2 - \psi) / s'_1,$

дзе $s'_1 = \sin \alpha'_1 \cos (\alpha'_2 - \psi) + \cos \alpha'_1 \sin (\alpha'_2 - \psi)$. Аналагічна памнажаем першую роўнасць (35) на $\cos \alpha'_1$, а другую – на $\sin \alpha'_1$ і выконваем усе дзеянні, што і пры вызначэнні R_{A_1} ; атрымліваем:

$$R_{A'_2} = G \sin \alpha'_1 / s'_2, \quad \text{дзе } s'_2 = s'_1. \quad \text{Канчаткова, рэакцыі сувязі } A_1,$$

A'_2 прадставім у выглядзе:

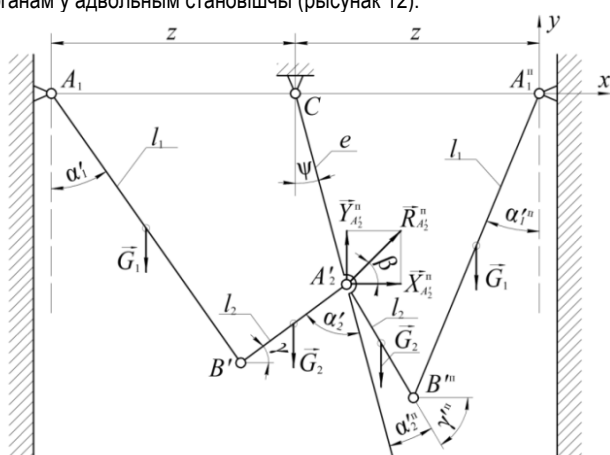
$$R_{A_1} = s_1 G; R_{A'_2} = s_2 G,$$

дзе $s_1 = \sin(\alpha'_2 - \psi) / s'_1$; $s_2 = \sin \alpha'_1 / s'_2$.

Варта зауважыць, што тут, як і ў задачы, праілюстраванай рысункам 7, рэакцыі R_{A_1} , $R_{A'_2}$ можна вызначыць прасцей прыватным спосабам, чым тыпавым. Кратка выкладзем яго сутнасць. Звяртаем увагу, што аб'ект $A_1B'A'_2$ знаходзіцца ў раўнавазе пад дзеяннем плоскай сістэмы трох непаралельных сіл R_{A_1} , $R_{A'_2}$ і G . Паводле адпаведнай гэтай нагрузцы тэарэмы з тэарэтычнай механікі іх лініі дзеяння перасякаюцца ў адным пункце, якім у нашай задачы з'яўляецца пункт B' . Вектары рэакцый абгрунтавана пераносім у гэты пункт. Тут іх графічна складваем так, каб атрымаўся ўраўнаважвальны вектар \vec{G} (рысунак 11).

З атрыманага паралелаграма вызначаем рэакцыі R_{A_1} , $R_{A'_2}$.

Вышэй разгледжана сілавое ўзаемадзеянне звенняў, што ў становішчы раўнавагі знаходзяцца ў левай палове рабочай камеры. Такі самы рабочы механізм, як ужо адзначалася, змешчаны і ў яе правай палове. Для вывучэння поўнага (двухбаковага) уздзеяння на каромысел вызначым і яго сілы ўзаемадзеяння з правым рабочым органам у адвольным становішчы (рысунак 12).



Рысунак 12 – Ілюстрацыя да вызначэння поўнага ўздзеяння на каромысел з левым і правым рабочым органам у адвольным становішчы каромысла

Захаваем усе папярэднія абазначэнні пунктаў і звенняў. Абазначэнні сіл узаемадзеяння ў кінематычнай пары A'_2 дадаткова будзем дапаўняць верхнім індэксам «п» (першая літара слова «правы»). Паслядоўна запісваем умовы раўнавагі звяна l_2 і сукупнасці $A'_2B''A''_1$:

$$\left. \begin{aligned} \sum M_{B''}(\vec{F}_i) &= -X_{A'_2}^{\text{II}} l_2 \sin \gamma^{\text{II}} - Y_{A'_2}^{\text{II}} l_2 \cos \gamma^{\text{II}} + G_2 l_2 \cos \gamma^{\text{II}} / 2 = 0; \\ \sum M_{A''_1}(\vec{F}_i) &= X_{A'_2}^{\text{II}} e \cos \psi - Y_{A'_2}^{\text{II}} (z - e \sin \psi) + \\ &+ G_2 (l_2 \cos \gamma^{\text{II}} / 2 + l_1 \sin \alpha_1^{\text{II}}) + G_1 l_1 \sin \alpha_1^{\text{II}} / 2 = 0 \end{aligned} \right\}$$

дзе $\gamma^{\text{II}} = \arccos t_1^{\text{II}} - \arcsin t_2^{\text{II}}$;

$$\cos \alpha^{\text{II}} = (a_{\text{II}}^2 + l_2^2 - l_1^2) / 2a_{\text{II}} l_2 = t_1^{\text{II}};$$

$$a_{\text{II}}^2 = z^2 + e^2 - 2ze \cos(\pi/2 - \psi); \quad t_2^{\text{II}} = e \cos \psi / a_{\text{II}};$$

$$\sin \alpha_1^{\text{II}} = (x_{A_2}^{\text{II}} - l_2 \cos \gamma^{\text{II}}) / l_1 = t_3^{\text{II}};$$

$$x_{A_2}^{\text{II}} = z - e \sin \psi; \quad \alpha_1^{\text{II}} = \arcsin t_3^{\text{II}}.$$

$$\left. \begin{aligned} -q_1 X_{A'_2}^{\text{II}} - r_1 Y_{A'_2}^{\text{II}} &= g_1^{\text{II}}; \\ q_2 X_{A'_2}^{\text{II}} - r_2 Y_{A'_2}^{\text{II}} &= g_2^{\text{II}} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Знаходзім невядомую кампаненту рэакцыі $X_{A'_2}^{\text{II}}$. Для гэтага першае ўраўненне сістэмы (36) памнажаем на $(-r_2)$, другое – на r_1 і вынікі складаем: $(q_1 r_2 + q_2 r_1) X_{A'_2}^{\text{II}} = g_2^{\text{II}} r_1 - g_1^{\text{II}} r_2$. Адсюль:

$$X_{A'_2}^{\text{II}} = (g_2^{\text{II}} r_1 - g_1^{\text{II}} r_2) / (q_1 r_2 + q_2 r_1). \quad (37)$$

Аналагічна шукаем невядомую $Y_{A'_2}^{\text{II}}$. Першае ўраўненне сістэмы (36) памнажаем на q_2 , другое – на q_1 . Памножаныя ўраўненні складваем: $-(r_1 q_2 + r_2 q_1) Y_{A'_2}^{\text{II}} = g_1^{\text{II}} q_2 + g_2^{\text{II}} q_1$.

Адсюль знаходзім

$$Y_{A'_2}^{\text{II}} = (g_1^{\text{II}} q_2 + g_2^{\text{II}} q_1) / [-(r_1 q_2 + r_2 q_1)], \quad (38)$$

і раўнадзейную

$$R_{A'_2}^{\text{II}} = \sqrt{(X_{A'_2}^{\text{II}})^2 + (Y_{A'_2}^{\text{II}})^2}. \quad (39)$$

Формулы (37), (38), (39) можна прадставіць у выглядзе:

$$X_{A'_2}^{\text{II}} = b_1 G_1; \quad Y_{A'_2}^{\text{II}} = b_2 G_1; \quad R_{A'_2}^{\text{II}} = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} G_1,$$

дзе

$$\begin{aligned} b_1 &= \left[(1-\mu) \left[(1-\mu) \cos \gamma^{\text{II}} / 2 + \sin \alpha_1^{\text{II}} \right] + \sin \alpha_1^{\text{II}} / 2 \right] (1-\mu) l_1 \cos \gamma^{\text{II}} - (1-\mu)^2 \cos \gamma^{\text{II}} / 2 (z - e \sin \psi) / \\ & / (1-\mu) \left[z \sin \gamma^{\text{II}} + e \cos(\psi + \gamma^{\text{II}}) \right]; \\ b_2 &= \left\{ -(1-\mu)^2 \cos \gamma^{\text{II}} / 2 (e \cos \psi) - \left[(1-\mu) \left[(1-\mu) \cos \gamma^{\text{II}} / 2 + \sin \alpha_1^{\text{II}} \right] + \sin \alpha_1^{\text{II}} / 2 \right] (1-\mu) l_1 \sin \gamma^{\text{II}} \right\} / \\ & / (1-\mu) \left[z \sin \gamma^{\text{II}} + e \cos(\psi + \gamma^{\text{II}}) \right]; \end{aligned}$$

$$q_1 = (1 - \mu) l_1 \sin \gamma^{\text{II}}; \quad q_2 = e \cos \psi;$$

$$\eta_1 = (1 - \mu) l_1 \cos \gamma^{\text{II}}; \quad r_2 = z - e \sin \psi. \quad \text{Вугал нахілу}$$

раўнадзейнай $R_{A_2}^{\text{II}}$ вызначаем па формуле: $\beta = \arctg(b_2/b_1)$.

Для вылічэння адначасовага двухбаковага ўздзеяння \bar{R}_{A_2}' на каромысел пры першым варыянце нагружэння скарыстаемца формуламі (34). У выніку атрымаем:

$$\bar{X}_{A_2}' = X_{A_2}' - X_{A_2}^{\text{II}} = (c_1 - b_1) G_1;$$

$$\bar{Y}_{A_2}' = Y_{A_2}' + Y_{A_2}^{\text{II}} = (c_2 + b_2) G_1,$$

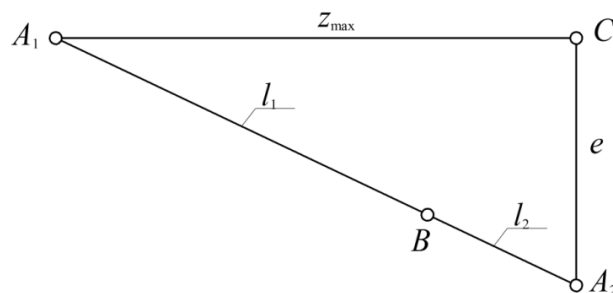
$$\bar{R}_{A_2}' = \sqrt{(c_1 - b_1)^2 + (c_2 + b_2)^2} G_1. \quad \text{Вугал нахілу вектара}$$

$$\bar{R}_{A_2}' \text{ роўны: } \bar{\beta} = \arctg[(c_2 + b_2)/(c_1 - b_1)].$$

Каб атрымаць вынік аналізу, справядлівы не толькі для канкрэтных значэнняў размераў l_1, l_2 , а ў больш агульным выглядзе, прыйдзем у атрыманых вышэй формулах да адносных параметраў. Для гэтага замест абсалютнага параметра z увядзем безразмерную пераменную $\zeta = z/z_{\text{max}}$. Велічыня z_{max} вызначаецца з

трохвугольніка A_1A_2C (рысунак 13), у якім $l_1 + l_2 = 2l_1 - e$;

$$\text{яна роўна } 2l_1 \sqrt{1 - \mu}.$$



Рысунак 13 – Ілюстрацыя да вызначэння велічыні z_{max}

Тады $\zeta = z/2l_1 \sqrt{1 - \mu}$; адсюль $z/l_1 = 2\sqrt{1 - \mu} \zeta$. З улікам суадносін z/l_1 каэфіцыенты пры G_1 у формулах сіл узаемадзеяння звянення прымуць выгляд:

$$p_1 = \sin \alpha_1 \left[2\sqrt{1 - \mu} \zeta - \sin \alpha_1 + (1 - \mu)^2 \sin \alpha_2 \right] / 2(2\sqrt{1 - \mu} \zeta \cos \alpha_1 - \mu \sin \alpha_1);$$

$$p_2 = \left\{ \cos \alpha_1 \left[4\sqrt{1 - \mu} \zeta + (1 - \mu)^2 \sin \alpha_2 \right] - (\mu + \cos \alpha_1) \sin \alpha_1 \right\} / 2(2\sqrt{1 - \mu} \zeta \cos \alpha_1 - \mu \sin \alpha_1);$$

$$d_1 = (1 - \mu) \sin \alpha_2 \left\{ \left[2\sqrt{1 - \mu} \zeta - (1 - \mu) \sin \alpha_2 \right] + (1 - \mu) \left[2\sqrt{1 - \mu} \zeta - (1 - \mu) \sin \alpha_2 \right] \right\} / 2(1 - \mu) (\mu \sin \alpha_2 + 2\sqrt{1 - \mu} \zeta \cos \alpha_2);$$

$$d_2 = \left\{ \begin{array}{l} (1 - \mu) \cos \alpha_2 \times \\ \times \left(\left[2\sqrt{1 - \mu} \zeta - (1 - \mu) \sin \alpha_2 \right] / 2 \right) + \\ + (1 - \mu) \left(2\sqrt{1 - \mu} \zeta - (1 - \mu) \sin \alpha_2 / 2 \right) \\ + \mu (1 - \mu) \sin \alpha_2 (1 - \mu) / 2 \end{array} \right\} / \left[(1 - \mu) (\mu \sin \alpha_2 + 2\sqrt{1 - \mu} \zeta \cos \alpha_2) \right];$$

$$A' = \mu \sin \psi + 2\sqrt{1 - \mu} \zeta - \sin \alpha_1' / 2 + (1 - \mu)^2 \cos \gamma / 2;$$

$$B = 2\sqrt{1 - \mu} \zeta + \mu \sin \psi;$$

$$e_1 = [(-A + B/2) \sin \alpha_1'] / [\mu \sin \alpha_1' \cos \psi - B \cos \alpha_1'];$$

$$e_2 = [-A \cos \alpha_1' + \mu \sin \alpha_1' \cos \psi / 2] / [\mu \sin \alpha_1' \cos \psi - B \cos \alpha_1'];$$

$$c_1 = \left\{ \begin{array}{l} (1 - \mu) \cos \gamma \left[(1 - \mu) \left((1 - \mu) \cos \gamma + 2 \sin \alpha_1' \right) + \sin \alpha_1' \right] - \\ - (1 - \mu)^2 \left(2\sqrt{1 - \mu} \zeta + \mu \sin \psi \right) \cos \gamma \end{array} \right\} / 2(1 - \mu) \left[\sin \gamma \left(2\sqrt{1 - \mu} \zeta + \mu \sin \psi \right) + \mu \cos \gamma \cos \psi \right];$$

$$c_2 = \left\{ \sin \gamma (1 - \mu) \left[(1 - \mu) \left((1 - \mu) \cos \gamma + 2 \sin \alpha_1' \right) + \sin \alpha_1' \right] + (1 - \mu)^2 \mu \cos \gamma \cos \psi \right\} / 2(1 - \mu) \left[\sin \gamma \left(2\sqrt{1 - \mu} \zeta + \mu \sin \psi \right) + \mu \cos \gamma \cos \psi \right];$$

$$b_1 = \left[(1-\mu) \left[(1-\mu) \cos \gamma'^{\Pi} / 2 + \sin \alpha_1^{\Pi} \right] + \sin \alpha_1^{\Pi} / 2 \right] (1-\mu) \cos \gamma'^{\Pi} - (1-\mu)^2 \cos \gamma'^{\Pi} / 2 (2\sqrt{1-\mu}\zeta - \mu \sin \psi) /$$

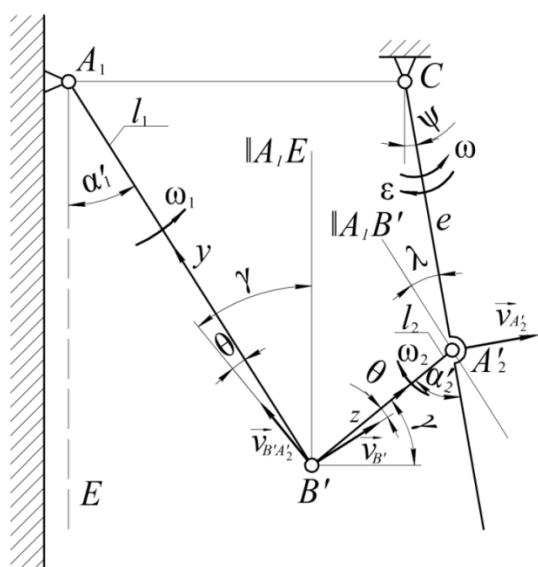
$$/ (1-\mu) \left[2\sqrt{1-\mu}\zeta \sin \gamma'^{\Pi} + \mu \cos (\psi + \gamma'^{\Pi}) \right];$$

$$b_2 = \left\{ -(1-\mu)^2 \cos \gamma'^{\Pi} / 2 (\mu \cos \psi) - \left[(1-\mu) \left[(1-\mu) \cos \gamma'^{\Pi} / 2 + \sin \alpha_1^{\Pi} \right] + \sin \alpha_1^{\Pi} / 2 \right] (1-\mu) \sin \gamma'^{\Pi} \right\} /$$

$$/ (1-\mu) \left[2\sqrt{1-\mu}\zeta \sin \gamma'^{\Pi} + \mu \cos (\psi + \gamma'^{\Pi}) \right].$$

Визначенне кінематичных параметраў руху рабочага органа

Як ужо адзначалася, аналіз сіл узаемадзеяння выкананы тут без уліку сіл інерцыі. Каб знайсці іх велічыню, неабходна выканаць дынамічны разлік мадэлі, якому папярэднічае яе кінематычны аналіз. Няцяжка заўважыць, што механічная сістэма, утвораная са стрыжняў l_1, l_2 і каромысла, уяўляе сабою чатырохзвенны механізм, вядучым звяном у якім з'яўляецца каромысел. Такім чынам, кінематычная схема ланцужнага аграгата прадстаўляецца трыма чатырохзвеннікамі, злучанымі ў адну сістэму з дапамогай каромысла. Рух прываднага механізма даследаван намі ў рабоце [3]. Гэта дазваляе перайсці да кінематычнага аналізу мадэлі рабочага органа камеры. На рысунку 14 кінематычны характарыстыкі ω, ϵ звяна CA_2' лічым зададзенымі. Вышэй знойдзены вуглы $\alpha_1', \alpha_2', \gamma$.



Рысунак 14 – Ілюстрацыя да вызначэння скорасцей пунктаў і звенняў

Пераходзім да вызначэння скорасцей пунктаў і звенняў. Для гэтага выкарыстоўваем тыпавыя формулы з курса тэарэтычнай механікі. Скорасць пункта B' роўна:

$$\vec{v}_{B'} = \vec{v}_{A_2'} + \vec{v}_{B'A_2'} \quad (40)$$

дзе $\vec{v}_{B'A_2'} \perp A_2'B'$.

Праецыруем роўнасць (40) паслядоўна на восі $B'y, B'z$:

$$0 = -v_{A_2'} \sin \lambda + v_{B'A_2'} \cos \theta; \quad v_{B'} \cos \theta = v_{A_2'} \cos (\gamma - \psi) + 0.$$

Адсюль знаходзім:

$$v_{B'A_2'} = v_{A_2'} \sin \lambda / \cos \theta;$$

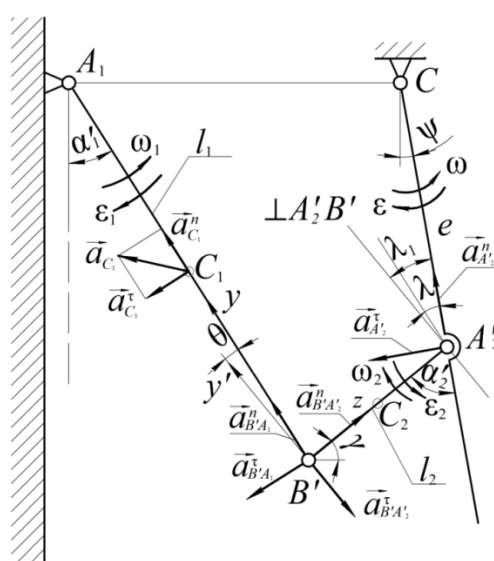
$$v_{B'} = \cos (\gamma - \psi) v_{A_2'} / \cos \theta.$$

Визначаем вуглавую скорасць звенняў l_1, l_2 : $\omega_1 = v_{B'} / l_1$;

$\omega_2 = v_{B'A_2'} / l_2$. Вуглы λ і θ , як відаць на рысунку 14, роўны:

$$\lambda = \alpha_1' - \psi; \quad \theta = \gamma - \alpha_1'.$$

Вылічваем паскарэнні (рысунак 15).



Рысунак 15 – Ілюстрацыя да вызначэння паскарэння пунктаў і звенняў

У якасці полюсаў прымаем пункты A_2' і A_1 . Тады для пункта B' атрымліваем:

$$\left. \begin{aligned} \vec{a}_{B'} &= \vec{a}_{A_2'}^n + \vec{a}_{A_2'}^{\tau} + \vec{a}_{B'A_2'}^n + \vec{a}_{B'A_2'}^{\tau}; \\ \vec{a}_{B'} &= \vec{a}_{B'A_1}^n + \vec{a}_{B'A_1}^{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

дзе $a_{A_2'}^n = \omega_2^2 e$; $a_{A_2'}^{\tau} = \epsilon e$; $a_{B'A_2'}^n = \omega_2^2 l_2$; $a_{B'A_1}^n = \omega_1^2 l_1$.

Выключаем з сістэмы (41) паскарэнне $\vec{a}_{B'}$. Атрымліваем роўнасць, неабходную для вылічэння тангенцыяльных паскарэнняў $a_{B'A_2'}^{\tau}, a_{B'A_1}^{\tau}$:

$$\vec{a}_{A_2'}^n + \vec{a}_{A_2'}^{\tau} + \vec{a}_{B'A_2'}^n + \vec{a}_{B'A_2'}^{\tau} = \vec{a}_{B'A_1}^n + \vec{a}_{B'A_1}^{\tau} \quad (42)$$

Праецыруем (42) на восі $B'y, B'z$:

$$a_{A_2'}^n \cos \lambda + a_{A_2'}^{\tau} \sin \lambda + a_{B'A_2'}^n \sin (\gamma - \alpha_1') - a_{B'A_2'}^{\tau} \cos (\gamma - \alpha_1') = a_{B'A_1}^n + 0;$$

$$a_{A_2'}^n \cos \alpha_2' - a_{A_2'}^{\tau} \sin \alpha_2' + a_{B'A_2'}^n + 0 = a_{B'A_1}^n \sin (\gamma - \alpha_1') - a_{B'A_1}^{\tau} \cos (\gamma - \alpha_1').$$

З атриманых роўнасцей знаходзім:

$$a_{B'A_2}^{\tau} = \left[a_{A_2}^n \cos \lambda + a_{A_2}^{\tau} \sin \lambda + a_{B'A_2}^n \sin(\gamma - \alpha_1) - a_{B'A_1}^n \right] / \cos(\gamma - \alpha_1);$$

$$a_{B'A_1}^{\tau} = \left[a_{A_2}^{\tau} \sin \alpha_2 - a_{A_2}^n \cos \alpha_2 - a_{B'A_2}^n + a_{B'A_1}^n \sin(\gamma - \alpha_1) \right] / \cos(\gamma - \alpha_1).$$

Паскарэнне пункта B' цяпер вызначаецца па другой формуле сістэмы (41). Вылічваем вуглавыя паскарэнні звенняў: $\varepsilon_1 = a_{B'A_1}^{\tau} / l_1$; $\varepsilon_2 = a_{B'A_2}^{\tau} / l_2$. Для наступных дынамічных разлікаў спатрэбіцца паскарэнні цэнтраў мас C_1, C_2 звенняў l_1, l_2 . Паскарэнне $a_{C_1} = 1/2 a_{B'}$. Для вылічэння паскарэння a_{C_2} выкарыстаем формулу

$$\bar{a}_{C_2} = \bar{a}_{A_2}^n + \bar{a}_{A_2}^{\tau} + \bar{a}_{C_2 A_2}^n + \bar{a}_{C_2 A_2}^{\tau}.$$

Праецыруем яе на ўзаемнаартаганальныя восі $B'y', B'z'$:

$$a_{C_2}^{y'} = a_{A_2}^n \cos \lambda_1 + a_{A_2}^{\tau} \sin \lambda_1 + 0 - a_{C_2 A_2}^{\tau};$$

$$a_{C_2}^z = a_{A_2}^n \sin \lambda_1 - a_{A_2}^{\tau} \cos \lambda_1 + a_{C_2 A_2}^n + 0. \text{ Дзе вугал } \lambda_1 = \lambda + \theta.$$

Адсюль:

$$a_{C_2} = \sqrt{\left(a_{C_2}^{y'} \right)^2 + \left(a_{C_2}^z \right)^2}.$$

Вызначэнне дынамічных сіл узаемадзеяння

Для набліжанага дынамічнага аналізу мадэлі стрыжнямі l_1, l_2 прадставім матэрыяльнымі пунктамі масы $m_1 = G_1/g$, $m_2 = G_2/g$, змешчанымі ў іх цэнтрах цяжару C_1, C_2 (g – паскарэнне свабоднага падзення). Складальныя сілы інерцыі (рысунк 16) вылічваем па формулах: $\bar{\Phi}_{C_1}^{\tau} = -m_1 \bar{a}_{C_1}^{\tau}$; $\bar{\Phi}_{C_1}^n = m_1 \bar{a}_{C_1}^n$;

$$\left. \begin{aligned} \sum M_{B'}(\bar{F}_i) &= -X_{A_2}^n l_2 \sin \gamma + Y_{A_2}^n l_2 \cos \gamma - G_2 l_2 \cos \gamma / 2 + \Phi_{C_2}^{y'} l_2 / 2 = 0; \\ M_{A_1}(\bar{F}_i) &= X_{A_2}^n e \cos \psi + Y_{A_2}^n (l_1 \sin \alpha_1' + l_2 \cos \gamma) - G_2 (l_1 \sin \alpha_1' + l_2 \cos \gamma / 2) - \\ &\sum -\Phi_{C_2 x}^{y'} (l_1 \cos \alpha_1' - l_2 \sin \gamma / 2) + \Phi_{C_2 y}^{y'} (l_1 \sin \alpha_1' + l_2 \cos \gamma / 2) - \Phi_{C_2}^z l_1 \sin \eta + \\ &+ \Phi_{C_1}^{\tau} l_1 / 2 - G_1 l_1 \sin \alpha_1' / 2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

дзе $\eta = \alpha_1' + \alpha_2' - \psi$. Перапісваем ураўненні (43) у скарачаным відзе:

$$\left. \begin{aligned} -i_1 X_{A_2}^n + j_1 Y_{A_2}^n &= w_1; \\ i_2 X_{A_2}^n + j_2 Y_{A_2}^n &= w_2 \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

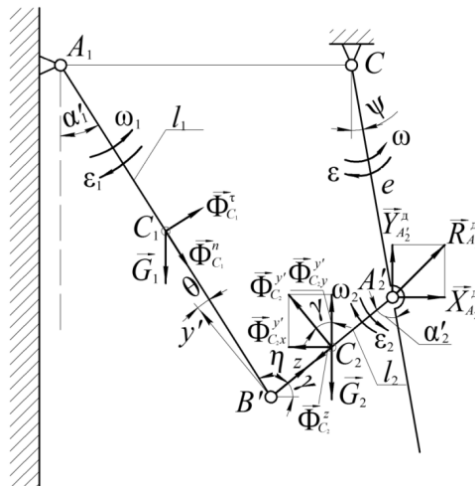
Значэнні велічынь $i_1, i_2, j_1, j_2, w_1, w_2$ знаходзяцца з супастаўлення

$$\left[X_{A_2}^n = (w_2 j_1 - w_1 j_2) / D; Y_{A_2}^n = (w_1 i_2 + w_2 i_1) / D; R_{A_2}^n = \sqrt{\left(X_{A_2}^n \right)^2 + \left(Y_{A_2}^n \right)^2} \right], \quad (45)$$

дзе $D = i_1 j_2 + i_2 j_1$. Формулы (45) можна пераўтварыць і запісаць карацей ў выглядзе:

$$X_{A_2}^n = i G_1; Y_{A_2}^n = j G_1; R_{A_2}^n = \sqrt{i^2 + j^2} G_1.$$

$\bar{\Phi}_{C_2}^{y'} = -m_2 \bar{a}_{C_2}^{y'}$; $\bar{\Phi}_{C_2}^z = -m_2 \bar{a}_{C_2}^z$, дзе $\bar{a}_{C_2}^{y'}$, $\bar{a}_{C_2}^z$ – складальныя паскарэння a_{C_2} па восях $B'y', B'z'$.



Рысунк 16 – Ілюстрацыя да вызначэння кампанент дынамічных сіл узаемадзеяння $X_{A_2}^n, Y_{A_2}^n$ і раўнадзейнай рэакцыі $R_{A_2}^n$ ў кінематычнай пары A_2'

Для вылічэння кампанент дынамічных сіл узаемадзеяння $X_{A_2}^n, Y_{A_2}^n$ выкарыстаем прынцып Даламбера. Запісваем умовы раўнавагі бязважкіх стрыжня $B'A_2'$ і сістэмы $A_1 B'A_2'$ мадэлі левага рабочага органа:

сістэмы (44) з (43). Для вызначэння $X_{A_2}^n$ памнажаем першае ўраўненне сістэмы (44) на j_2 , другое – на $(-j_1)$ і складваем выніковыя ўраўненні; атрымліваем $-(i_1 j_2 + i_2 j_1) X_{A_2}^n = w_1 j_2 - w_2 j_1$. Аналагічна, пасля памнажэння тых жа ураўненняў на i_2, i_1 , пасля складання атрымаем: $(j_1 i_2 + j_2 i_1) Y_{A_2}^n = w_1 i_2 + w_2 i_1$. З апошніх роўнасцей знаходзім:

$$\begin{aligned} \text{Тут } i_1 &= (1-\mu) \sin \gamma; \quad i_2 = \mu \cos \psi; \quad j_1 = (1-\mu) \cos \gamma; \\ j_2 &= \sin \alpha_1' + (1-\mu) \cos \gamma; \quad B = \sin \alpha_1' + (1-\mu) \cos \gamma / 2; \end{aligned}$$

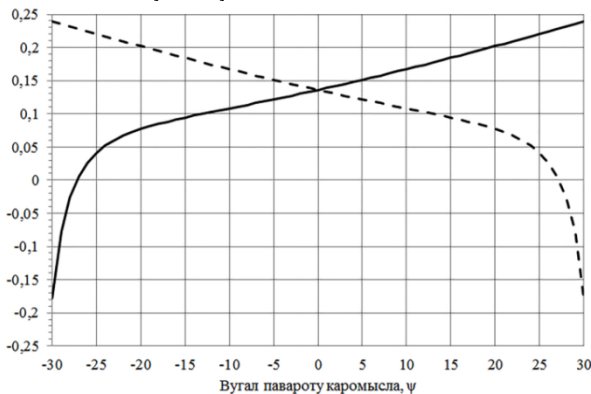
$$i = \left\{ \left\{ \begin{aligned} & (1-\mu)B + \sin \alpha'_1/2 + (1-\mu) \sin \gamma a_{C_2}^{y'} \times \\ & \times \left[\cos \alpha'_1 - (1-\mu) \sin \gamma/2 \right] / g - (1-\mu) \cos \gamma a_{C_2}^{y'} B/g + (1-\mu) \sin \eta a_{C_2}^z / g - a_{C_1}^{\tau} / 2g \end{aligned} \right\} \times \right\} / D;$$

$$j = \left\{ \left[(1-\mu)^2 \left(\cos \gamma - a_{C_2}^{y'} / g \right) / 2 \right] i_2 + \left\{ \begin{aligned} & (1-\mu)B + \sin \alpha'_1/2 + (1-\mu) \sin \gamma \times \\ & \times a_{C_2}^{y'} \left[\cos \alpha'_1 - (1-\mu) \sin \gamma/2 \right] / g - (1-\mu) \cos \gamma a_{C_2}^{y'} \times \\ & \times B/g + (1-\mu) \times \\ & \times \sin \eta a_{C_2}^z / g - a_{C_1}^{\tau} / 2g \end{aligned} \right\} i_1 \right\} / D.$$

Вылічэнне сіл узаемадзеяння звенняў і іх аналіз

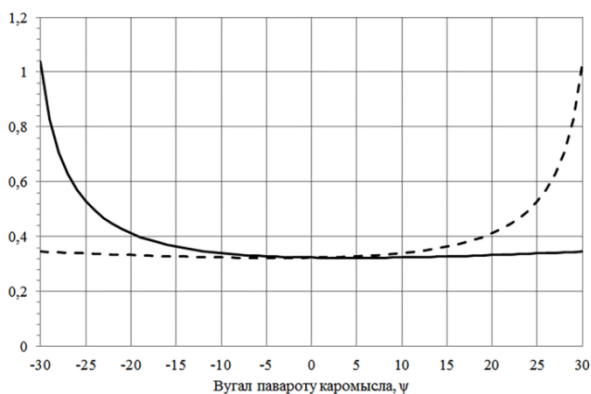
Па атрыманых вышэй формулах з дапамогай праграмы Mathcad знойдзены лікавыя значэнні статычных і дынамічных сіл узаемадзеяння звенняў у рабочай камеры ланцужнага агрэгата. Графікі іх змянення прадстаўлены на рысунках 17–31 для агульнай нарузкі $(2-\mu)G_1$ на звенні. Суцэльнымі лініямі ўсюды паказаны графікі змянення сіл, што прыкладзены да левага рабочага органа, пункцірнымі – да правага. Адносныя статычныя сілы прадстаўлены ў выглядзе функцый вугла ψ павароту каромысла пры пастаянным значэнні адноснай каардынаты $\zeta = 0,5$.

З графікаў на рысунках 17, 18 відаць, што ў межах рэальнага функцыянавання рабочай камеры ($|\psi| = 0^\circ \dots 12^\circ$) кампаненты X_{A_2} , Y_{A_2} сіл узаемадзеяння рабочых органаў з каромыслам змяняюцца амаль па лінейнаму закону.



На восі ардынат паказана велічыня кампаненты X_{A_2}

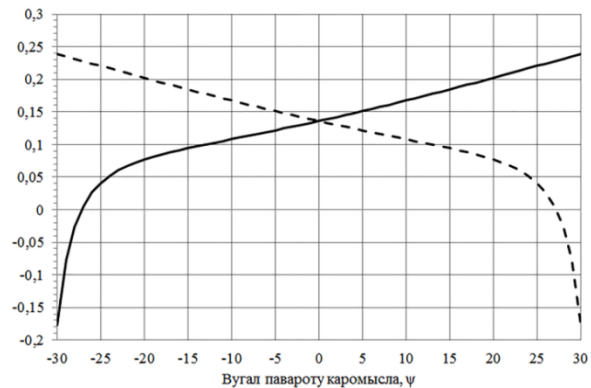
Рысунк 17 – Графік змянення кампаненты X_{A_2} : суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай



На восі ардынат паказана велічыня кампаненты Y_{A_2}

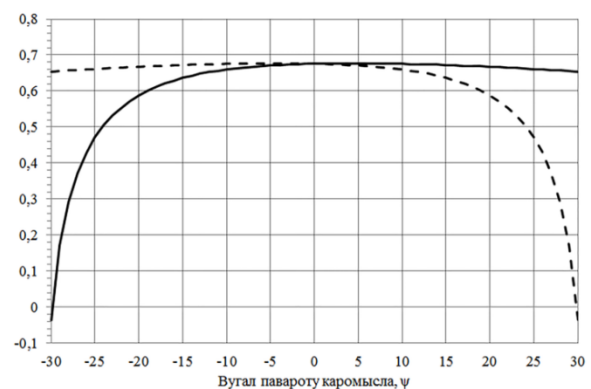
Рысунк 18 – Графік змянення кампаненты Y_{A_2} : суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай

Пры гэтым адносная велічыня кампаненты X_{A_2} прымае значэнні ў межах ад 0,1 да 0,17 (павялічваецца ў 1,7 раза), а Y_{A_2} практычна не змяняецца – застаецца на ўзроўні 0,34. Такая ж заканамернасць уласціва і сілам узаемадзеяння рабочых органаў з апорай A_1 (рысункі 19, 20); тут кампанента X_{A_1} таксама ўзрастае ў 1,7 раза (ад 0,1 да 0,17), а $Y_{A_1} \approx 0,67$.



На восі ардынат паказана велічыня кампаненты X_{A_1}

Рысунк 19 – Графік змянення кампаненты X_{A_1} : суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай



На восі ардынат паказана велічыня кампаненты Y_{A_1}

Рысунк 20 – Графік змянення кампаненты Y_{A_1} : суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай

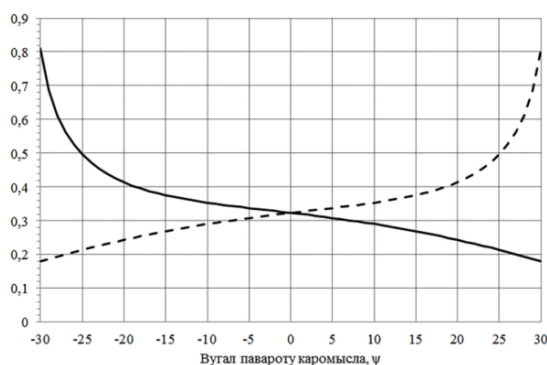
Велічыня кампанентаў X_{A_1} , X_{A_2} залежыць ад геаметрычных змяненняў у структуры рабочых органаў пры павароце каромысла. Лёгка заўважыць, што пры павялічэнне вугла $A_1 B' A'_2$ – назавём яго вуглом расхінення звенняў h_1, h_2 – названыя кампаненты ўзрастаюць.

Для визначення необхідних механічних характеристик рухавіка ланцюжного агрегата сили взаємодіяння робочих органів з каромислам мэтазгодна прадставіць у выглядзе нармальнай $R_{A_2}^n$ і тангенцыяльнай $R_{A_2}^t$ кампанентаў па формулах:

$$R_{A_2}^n = Y_{A_2} \cos \psi - X_{A_2} \sin \psi ;$$

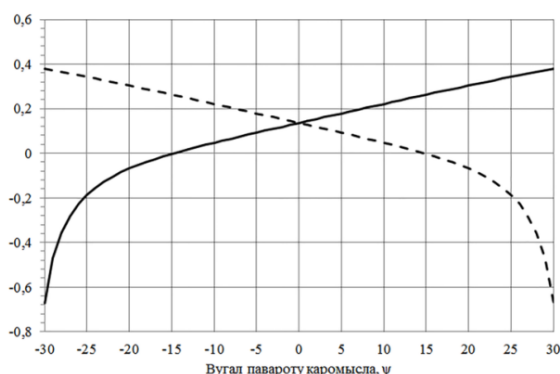
$$R_{A_2}^t = X_{A_2} \cos \psi + Y_{A_2} \sin \psi .$$

Вектар нармальнай складальнай накіраваны да восі С вярчэння каромысла, тангенцыяльнай – перпендыкулярна да яго. Для графікаў змянення гэтых кампанентаў (рысункі 21, 22) таксама характэрна лінейнасць.



На восі ардынат паказана велічыня нармальнай кампаненты $R_{A_2}^n$

Рысунк 21 – Графік змянення нармальнай кампаненты $R_{A_2}^n$ сілы ўзаемадзіяння робочых органаў з каромислам: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай



На восі ардынат паказана велічыня тангенцыяльнай кампаненты $R_{A_2}^t$

Рысунк 22 – Графік змянення тангенцыяльнай кампаненты $R_{A_2}^t$ сілы ўзаемадзіяння робочых органаў з каромислам: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай

У разглядаемых інтэрвалах змянення вугла ψ ($\psi = 0^\circ \dots 12^\circ$) нармальна кампанента для левага рабочага органа змяншаецца ад 0,36 да 0,28, тангенцыяльная – узрастае ад 0,03 да 0,24.

Пры адначасовым нагружэнні левага і правага робочых органаў тангенцыяльныя сілы ўзаемадзіяння часткова ўраўнаважваюцца, што спрыяльна адбываецца на рабоце рухавіка. Аднак пры незапланаваным аднабаковым нагружэнні рабочай камеры магчыма яго перагрузка, якую можна вылічыць на падставе графікаў, змешчаных на рысунку 22. Так, для $\psi = 12^\circ$ пры двухбаковым нагружэнні рабочай камеры тангенцыяльнае ўздзеянне на каромисел ад правага і левага робочых органаў роўна

$$\bar{R}_{A_2}^t = R_{A_2,л}^t - R_{A_2,п}^t = 0,24 - 0,03 = 0,21, \text{ а пры аднабаковым}$$

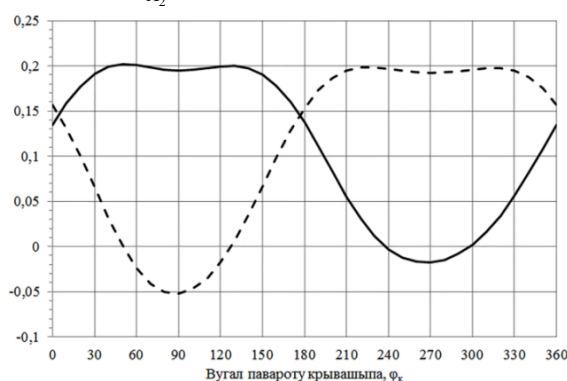
толькі левага – $R_{A_2,л}^t = 0,24$. Коэфіцыент перагрузкі

$f_{\Pi} = 0,24/0,21 = 1,14$. Велічыня f_{Π} пераменная. Пры $|\psi| = 0^\circ \dots 12^\circ$ $f_{\Pi} = 0 \dots 1,14$. У разлік прымаецца яе максімальнае значэнне.

У працесе даследавання статычных сіл былі выкананы разлікі па формулах (21)...(23) для другога варыянта нагружэння. Іх параўнанне з вынікамі, атрыманымі для першага варыянта, дае падставы сцвярджаць, што сілы ўзаемадзіяння ў рабочай камеры залежаць ад размеркавання нагрузкі на яе рабочыя органы. Пры другім спосабе нагружэння яны істотна ўзрастаюць.

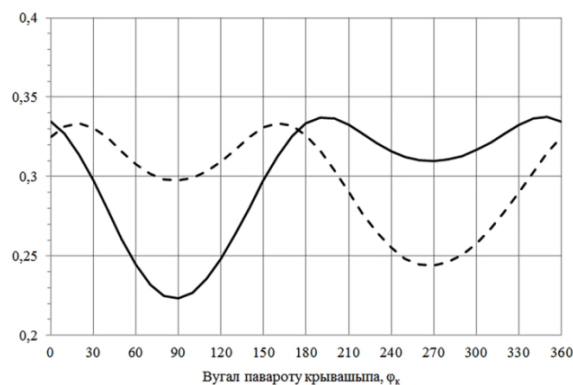
Пераходзячы да аналізу дынамічных сіл ўзаемадзіяння, нагадаем, што ў прывадным механізме літарамі r, l, h абазначаны даўжыні кривашыпа, шатуна і каромысла, а іх геаметрычныя суадносіны: $\rho = r/l, \lambda = h/l$; ω_k – вуглавая скорасць кривашыпа. Разлікі выкананы пры $\rho = 0,1; \lambda = 2/3; \zeta = 0,5; \omega_k = 1$ рад/с. Дынамічныя сілы ўзаемадзіяння прадстаўляюцца ў выглядзе функцый вугла φ_k павароту кривашыпа. Значэнне $\varphi_k = 0$ адпавядае вертыкальнаму становішчу каромысла. Пры зададзеных вышэй параметрах максімальныя (амплітудныя) вуглы адхілення каромысла ўлева і ўправа роўны $8,19^\circ$ і $9,06^\circ$ адпаведна пры φ_k , роўным $269,6^\circ$ і $89,6^\circ$. Як і ў статыцы, тут суцэльнымі лініямі паказаны графікі змянення адносных сіл, што дзейнічаюць на левы рабочы орган, пункцірнымі – на правы. Як відаць на рысунках 23, 24, у межах аднаго цыкла ($\varphi_k = 0^\circ \dots 360^\circ$) гарызантальная кампанента змяняецца ад $X_{A_2}^H = -0,02$ да $X_{A_2}^H = 0,2$, а вертыкальная

прымае значэнні $Y_{A_2}^H = 0,22 \dots 0,34$.



На восі ардынат паказана велічыня кампаненты $X_{A_2}^H$

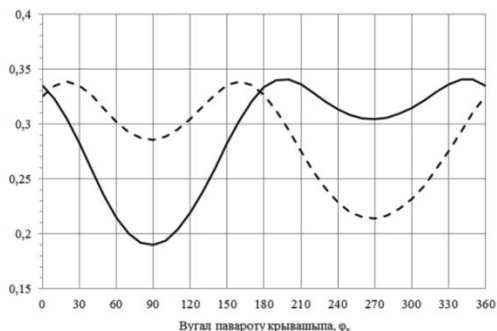
Рысунк 23 – Графік змянення кампаненты $X_{A_2}^H$: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай



На восі ардынат паказана велічыня кампаненты $Y_{A_2}^H$

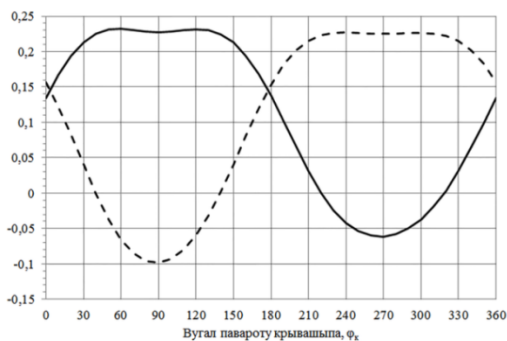
Рысунк 24 – Графік змянення кампаненты $Y_{A_2}^H$: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай

Неістотнае адрозненне графікаў для левага і правага рабочага органа выклікана асіметрыямі руху каромысла. Змяненне нармальнай $R_{A_2}^{Дн}$ і тангенцыяльнай $R_{A_2}^{Дт}$ складальных сілы ўзаемадзеяння ў пункце A_2' паказаны на рысунках 25, 26.



На восі ардынат паказана велічыня нармальнай кампаненты $R_{A_2}^{Дн}$

Рысунк 25 – Графік змянення нармальнай кампаненты $R_{A_2}^{Дн}$ сілы ўзаемадзеяння рабочых органаў з каромыслам: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай



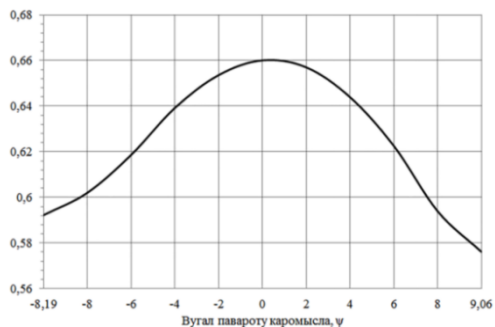
На восі ардынат паказана велічыня тангенцыяльнай кампаненты $R_{A_2}^{Дт}$

Рысунк 26 – Графік змянення тангенцыяльнай кампаненты $R_{A_2}^{Дт}$

сілы ўзаемадзеяння рабочых органаў з каромыслам: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай

На іх заўважаецца адзначаная ў статыцы залежнасць тангенцыяльнай кампаненты $R_{A_2}^{Дт}$ ад велічыні вугла расхінення звенняў h_1, h_2 .

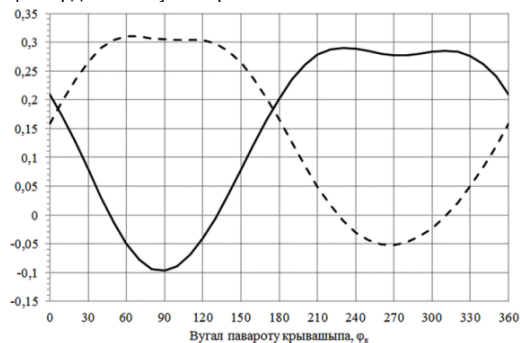
На рысунку 27 прадстаўлены графік змянення раўнадзейнай $\bar{R}_{A_2}^Д$ сіл узаемадзеяння двух рабочых органаў з каромыслам.



На восі ардынат паказана велічыня раўнадзейнай сілы $\bar{R}_{A_2}^Д$

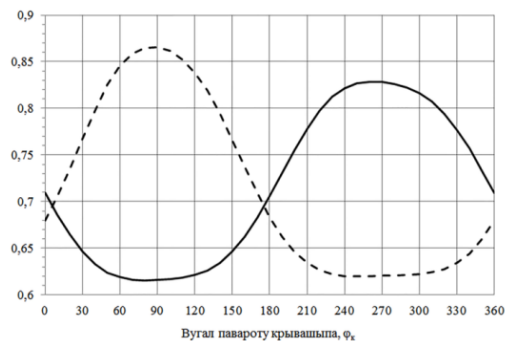
Рысунк 27 – Графік змянення раўнадзейнай $\bar{R}_{A_2}^Д$ сіл узаемадзеяння двух рабочых органаў з каромыслам

Графік на рысунку 27 адпавядае перамяшчэнню каромысла з крайняга левага становішча ў крайняе правае. Калі аналізаваць яго па значэннях ардынат, то можна заўважыць, што велічыня $\bar{R}_{A_2}^Д$ у межах $|\psi| = 0^\circ \dots 8^\circ$ практычна не змяняецца – застаецца на ўзроўні $\bar{R}_{A_2}^Д \approx 0,63$. Графікі змянення кампанент $X_{A_1}^Д, Y_{A_1}^Д$ рэактыўнай сілы $R_{A_1}^Д$ для апоры A_1 паказаны на рысунках 28, 29. І тут мае месца карэляцыя ардынат з вуглом расхінення.



На восі ардынат паказана велічыня кампаненты $X_{A_1}^Д$

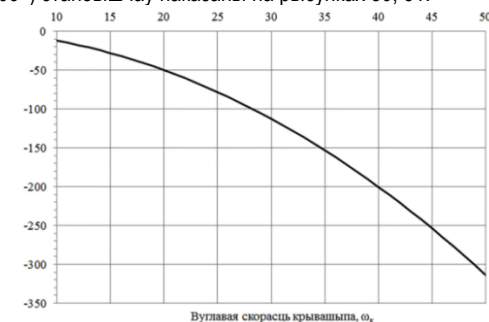
Рысунк 28 – Графік змянення кампаненты $X_{A_1}^Д$: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай



На восі ардынат паказана велічыня кампаненты $Y_{A_1}^Д$

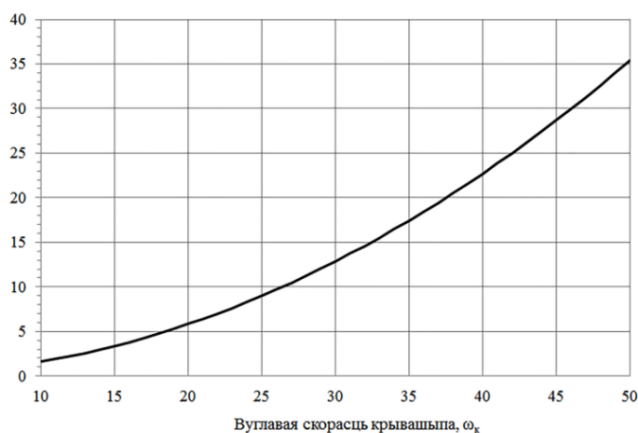
Рысунк 29 – Графік змянення кампаненты $Y_{A_1}^Д$: суцэльная лінія – для левай паловы рабочай камеры, пункцірная – для правай

Дадаткова даследавана залежнасць тангенцыяльнай дынамічнай сілы ўзаемадзеяння левага рабочага органа ў крайніх становішчах каромысла ад велічыні вуглавой скорасці ω_k крывашыпа. Адпаведныя графікі для левага ($\psi = 8,19^\circ$) і правага ($\psi = 9,06^\circ$) становішчаў паказаны на рысунках 30, 31.



На восі ардынат паказана велічыня тангенцыяльнай дынамічнай сілы $R_{A_2}^{Дт}$

Рысунк 30 – Графік змянення тангенцыяльнай дынамічнай сілы $R_{A_2}^{Дт}$ узаемадзеяння левага рабочага органа з каромыслам (крайняе левае становішча каромысла – $\psi = 8,19^\circ$)



Рысунк 31 – Графік змянення тангенціальнай дынамічнай сілы $R_{A_2}^{дт}$ узаемадзеяння левага рабочага органа з каромыслам (крайняе правае становішча каромысла – $\psi = 9,06^\circ$)

Як бачым, у крайнім левым становішчы пры $\omega_k = 10 \dots 50$ рад / с – $R_{A_2}^{дт} = 12,5 \dots 313,4$, у крайнім правым $R_{A_2}^{дт} = 1,6 \dots 35,4$. Параўнанне апошніх лічбаў з ардынатамі графіка, пабудаванага на рысунку 22, пераконвае ў тым, што ў сілавым аналізе рабочай камеры сіламі цяжару можна ігнараваць у параўнанні з сіламі інерцыі.

Магчымыя ўдасканаленні разліковай мадэлі

Як адзначалася на самым пачатку артыкула, двухстрыжнявая схема рабочага органа, якая ў сукупнасці з каромыслам уяўляе плоскі чатырохзвеннік, толькі набліжана мадэліруе рэальны рабочы орган. Мяркуецца, што ў масу m_1, m_2 стрыжняў уваходзіць і маса рэчыва, якое затрымаецца на ланцужным палатне, з улікам дынамічнага эфекту пры бесперапынным напаўненні камеры. Прынятая мадэль без істотнага змянення алгарытма даследаванняў дапускае ўлік масы перапрацоўваемага рэчыва асобна. У гэтым варыянце рэчыва мадэліруецца ў выглядзе некалькіх матэрыяльных пунктаў, замацаваных на стрыжнях l_1, l_2 .

Прынцыповага ўдасканалення мадэлі рабочага органа можна дасягнуць шляхам замены гнуткай сценкі і ланцужнага палатна трыма і большай колькасцю стрыжняў ці мадэліраваць рабочы орган так званай ланцужнай лініяй. Але такія змяненні патрабуюць значнага ўскладнення разліковага алгарытму.

Заклучэнне

У артыкуле апісаны канструкцыя і функцыянаванне рабочай камеры ланцужнага аргата. Уведзена двухстрыжнявая мадэль яе рабочага органа. Выведзены формулы для вылічэння статычных і дынамічных сіл узаемадзеяння звенняў. На іх падставе з дапамогай праграмы Mathcad знойдзены лікавыя значэнні сіл і пабудаваны адпаведныя графікі; выкананы іх аналіз. Вынікі работы могуць быць выкарыстаны для канструявання ланцужных аргатаў і даследавання працэсаў дэзінтэграцыі і класіфікацыі матэрыялаў.

Спіс цытаваных крыніц

1. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. монография / Л. А. Сиваченко [и др.] : под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. – Барановичи : БарГУ, 2020. – 359 с.
2. 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.

3. Распрацоўка алгарытму аналітычнага метаду кінематычнага аналізу чатырохзвеннага механізма ланцужнага аргата / У. А. Патапаў [і інш.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 2. – С. 105–112.
4. Смирнов, В. И. Курс высшей математики / В. И. Смирнов. – М. : Наука, 1974. – Том 1. – 479 с.
5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 832 с.
6. Патапаў, У. А. Методыка ўстанаўлення залежнасцей паміж каардынатамі і вугламі ў сістэме дзвюх акружнасцей, злучаных адзін з адным / У. А. Патапаў, С. І. Русан, Л. А. Сівачэнка // Механика. Исследования и инновации. – 2021. – Вып.14. – С. 174–182.

References

1. Intensifikaciya tekhnologicheskikh processov v apparatah adaptivnogo dejstviya : kolektiv. monografiya / L. A. Sivachenko [i dr.] : pod nauch. red. L. A. Sivachenko ; M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Baranovich. gos. un-t. – Baranovichy : BarGU, 2020. – 359 s.
2. Potapov, V. A. Issledovanie vliyaniya rezhimov raboty celnogo agregata na pokaza-teli 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.
3. Patapaŭ, U. A. Raspracoŭka algarytmu analitychnaga metadu kinematychnaga analizu chatyrohzvennaga mekhanizma lancuzhnaga agregata / U. A. Patapaŭ, S. I. Rusan, L. A. Sivachenka, S. U. Bolataŭ // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – №2. – S. 105–112.
4. Smirnov, V. I. Kurs vysshej matematiki / V. I. Smirnov. – Tom 1. – M.: Nauka, 1974. – 479 s.
5. Korn, G. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1974. – 832 s.
6. Patapaŭ, U. A. Metodyka ūstanaŭleniya zalezhnascej pamizh kaardynatami i vuglami ū sisteme dzvuyuh akruzhnascej, zluchanyh adrezkam / U. A. Patapaŭ, S. I. Rusan, L. A. Sivachenka // Mekhanika. Issledovaniya i innovacii. – 2021. – Vyp.14. – S. 174–182.

Матэрыял паступіў 03.01.2023, адобраны 12.01.2023, прыняты да публікацыі 12.01.2023

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА АБРАЗИВНО-ОТРЕЗНЫХ СТАНКАХ С КАЧАЮЩЕЙСЯ ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКОЙ

Н. А. Старовойтов

К. т. н., доцент кафедры «Технология машиностроения»

УО «Гомельский государственный технический университет», Гомель, Беларусь, e-mail: starnik49@mail.ru

Реферат

Приведены результаты экспериментальных исследований повышения производительности абразивно-отрезных станков с поддержанием постоянной скорости резания и адаптивным управлением мощностью процесса резания заготовок круглого профиля.

Установлено, что поддержание постоянной скорости резания при износе абразивно-отрезного круга и поддержание постоянной мощности резания за счёт изменения подачи в процессе резания круглых заготовок приводит к увеличению производительности станка в среднем 1,38 раза по сравнению с процессом резания с постоянной скоростью подачи.

Ключевые слова: абразивно-отрезной круг, коэффициент шлифования, адаптивное управление, мощность резания.

ADAPTIVE POWER CONTROL OF THE CUTTING PROCESS ON ABRASIVE CUTTING MACHINES WITH A SWINGING SPINDLE HEAD

N. A. Starovoirov

Abstract

The results of experimental studies of increasing the productivity of abrasive cutting machines with maintaining a constant cutting speed and adaptive power control of the cutting process of round profile blanks are presented. It has been found that maintaining a constant cutting speed during wear of the abrasive-cutting wheel and maintaining a constant cutting power by changing the feed during the cutting of round blanks leads to an increase in machine productivity by an average of 1.38 times compared to the process with a constant feed rate.

Keywords: abrasive cutting wheel, grinding coefficient, adaptive control, cutting power.

Введение

В литературе [1,2] указано, что при разрезании заготовок из сталей абразивно-отрезными кругами существует оптимальная подача, при которой износ круга будет минимальный. Также из проведенных исследований авторами установлено, что стоимость круга в стоимости одного реза достигает до 71 % [3]. Снижение износа круга при использовании оптимальной подачи приводит к повышению коэффициента шлифования G , равного отношению площади разрезаемого сечения заготовки S_z к площади изношенной части круга S_u

$$G = \frac{S_z}{S_u} \quad (1)$$

Коэффициент шлифования G зависит от подачи круга, при этом подача считается оптимальной, при которой коэффициент G будет максимальным, а стоимость одного реза будет минимальной. Но это не всегда соответствует максимальной производительности, при которой время реза будет минимальным.

В статье [2] приведен алгоритм поиска оптимальной подачи в автоматизированном режиме, что приводит к повышению эффективности процесса резания за счет снижения стоимости одного реза, что не всегда соответствует максимальной производительности.

Однако на практике в некоторых случаях необходимо использовать режим максимальной производительности, обеспечить минимальное время резания, например, при разрезании горячих заготовок на прокатных станах [4].

Работа в режиме оптимальной эффективности не всегда приводит к эффективному использованию мощности электродвигателя главного привода при разрезании заготовок круглого сечения, в связи с тем, что в этом случае оптимальную подачу используют для максимальной длины дуги контакта круга с заготовкой, в то время как для меньших длин дуги контакта требуются большие по величине подачи [5]. Кроме того, при врезании круга в заготовку и выходе из неё имеются перебеги, которые необходимо проходить, с точки зрения повышения производительности, на максимальной подаче.

В процессе резания длина дуги контакта круга с круглой заготовкой изменяется в начале резания на входе и выходе круга от нуля до максимальной и равна диаметру заготовки плюс длина перебегов. Если поддерживать постоянный объем съема металла, т. е. постоянную мощность, на протяжении всего реза за счет переменной подачи

круга на входе и выходе круга из заготовки, то это может привести к уменьшению основного времени резания и в итоге повышению производительности. Возможно также увеличение коэффициента шлифования G , что требует экспериментальной проверки. Для проверки этого предположения было использовано адаптивное управление мощностью резания за счет применения переменной подачи круга в качестве регулятора для поддержания постоянной мощности.

На схеме рисунка 1 изображена круглая заготовка 1, расположенная на призме 2, при разрезании кругом 3.

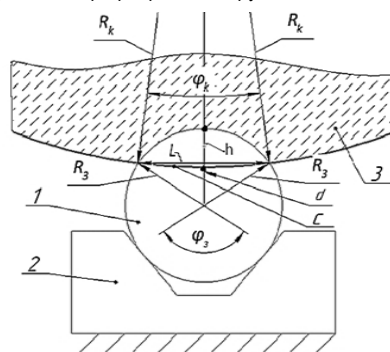


Рисунок 1 – Схема разрезания круглых заготовок абразивно-отрезным кругом

Основными переменными характеристиками процесса резания является длина дуги контакта C круга с заготовкой, подача круга F_k и скорость резания V_k . Произведение длины дуги контакта C на отношение F_k/V_k определяет объем металла, снимаемого в процессе резания в единицу времени, и определяет мощность резания.

Учитывая, что ширина пропила равна высоте круга и V_k является постоянной величиной, для упрощения разработки алгоритма адаптивного управления мощностью резания можно принять площадь сегмента срезаемого металла в единицу времени, равную произведению $F_k \cdot C$, и стремиться её поддерживать на протяжении всего реза постоянной за счет изменения скорости подачи F_k .

Для определения длины дуги контакта C можно вычислить длину хорды L по известной формуле.

$$L = \frac{\sqrt{4R_k^2 d^2 - (d^2 - R_3^2 + R_k^2)^2}}{d}, \text{ м} \quad (2)$$

где R_k и R_3 соответственно радиус круга равный 0,2 м, и радиус заготовки равной 0,03 м;

d – расстояние между центрами круга и заготовки, равное 0,23 м.

Величина d является переменной величиной и зависит от переменной h .

$$d = R_k + R_3 h + l_n \quad (3)$$

где h – глубина пропила, м,

l_n – суммарная постоянная величина перебегов при врезании круга в заготовку и выходе круга из заготовки, равная 0,02 м.

После вычисления L можно определить длину дуги контакта C по формуле

$$C = \frac{R_k \pi \arcsin \frac{L}{2R_k}}{90}, \text{ м} \quad (4)$$

На рисунке 2 приведены график 1 зависимости длины дуги контакта круга C (1) с заготовкой и оптимальной подачи круга F_k (2) при различной глубине пропила круга h с учетом его износа в процессе резания до 0,16 м. и график 2 зависимости оптимальной подачи F_k от диаметра разрезаемой заготовки d [5].

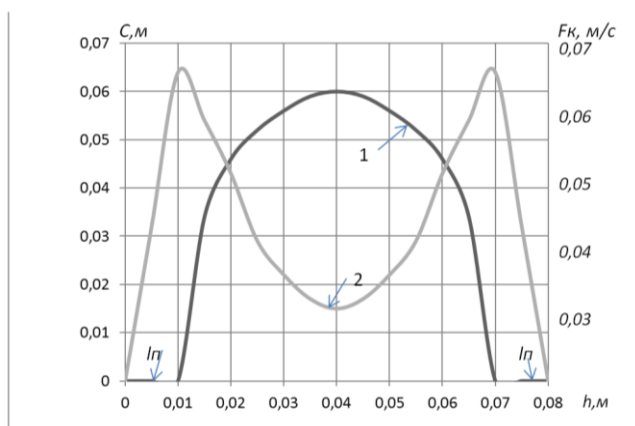


Рисунок 2 – Зависимости длины дуги контакта круга C (1), оптимальной подачи круга F_k (2), от глубины пропила разрезаемой заготовки h

Расчеты показывают, что длина дуги контакта C увеличивается по сравнению с хордой L в пределах 1–1,5 % при износе круга до минимально возможного диаметра 0,16 м и его износ можно не учитывать при программировании подачи F_k .

При разрезании заготовок абразивно-отрезными кругами важно иметь два режима: режим минимальной стоимости одного реза [2] и режим максимальной производительности, где максимально используется полная мощность главного привода на протяжении всего процесса резания. Это актуально при разрезании горячекатаных заготовок на прокатных станах при непрерывном движении заготовки, где время разрезания должно быть минимальным, что обеспечивает максимальную производительности. Решение этой задачи возможно двумя путями. Первый путь – за счет дискретного программирования параболической (сплайновой) интерполяцией кривой подачи F_k (рисунок 2). Необходимо отметить, что использование этого пути весьма трудоемко при практическом его исполнении. Процесс резания весьма специфический, производительность и эффективность его зависит от множества параметров: марки круга, зернистости, связки, скорости резания, охлаждения, марки материала, его твердости и др. Даже при одной и той же марке круга, но другого производителя, результат будет иной.

Поэтому поиск универсального процесса резания круглых заготовок, с помощью которого можно попытаться увеличить производительность, может быть поддержание постоянной мощности резания.

В работе [1] установлено, что с уменьшением длины дуги контакта требуется большая подача круга для достижения более высокого коэффициента шлифования. Отсюда можно сделать вывод, что с уменьшением длины дуги контакта подача может быть больше по сравнению с установленной для максимальной длины дуги контакта. Это может привести к увеличению производительности и некоторому увеличению коэффициента шлифования.

Целью работы является экспериментальное исследование конструктивных решений по модернизации абразивно-отрезного станка мод. 8В242 с учетом приведенных рекомендаций, направленных на повышение производительности процесса резания за счет адаптивного управления мощностью резания при разрезании круглых заготовок.

Постановка задачи, методика исследования

Экспериментальная проверка повышения производительности процесса резания абразивно-отрезных станков при разрезании круглых заготовок за счет адаптивного управления мощностью процесса резания, производилась на абразивно-отрезном станке-стенде мод. 8В242, рисунок 3 [5] с дополнительной его модернизацией.

На станке-стенде для управления электроавтоматикой станка использовалось цифровое программируемое устройство ЛИР581, частотный преобразователь ЭКТ-63/380-У4 для поддержания постоянной скорости резания 80 м/с с передаточным отношением между шкивами шпинделя и электродвигателя равным 1:1. На станине станка установлен фотоимпульсный датчик-энкодэр 11 мод. А58-Ф-5000-5в, на валу которого закреплена шестерня 12. Шестерня датчика 12 находится в зацеплении с шестерней 10, неподвижно закрепленной на оси качения шпиндельной бабки 3. Момент с вала электродвигателя 6 через зубчатый шкив 5 передается на шкив шпинделя 2 через плоскозубчатый ремень 4. На валу ротора электродвигателя 6 для измерения его частоты вращения установлен фотоимпульсный датчик-энкодэр 13 мод. А58-Ф-500-5в. Диаметр заготовки определяет прихват-зубчатая рейка 14, которая находится в зацеплении с шестерней 15, закрепленной на валу энкодэра 16.

Цифровой сигнал с датчика 13 с помощью ЦАП преобразовывался в аналоговое значение, что обеспечивало поддержание начальной постоянной скорости резания, равной 80 м/с

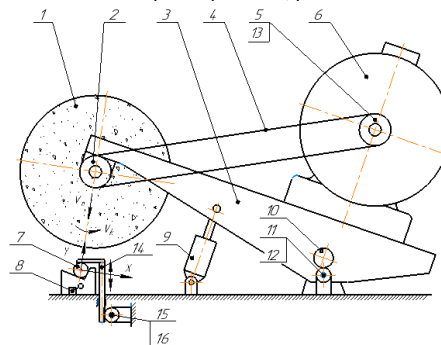


Рисунок 3 – Принципиальная схема конструкции абразивно-отрезного модернизированного станка-стенда мод. 8В242

Подача круга 1 при разрезании заготовки 7 осуществлялась с помощью гидроцилиндра 9 до касания кромкой круга датчика реверса подачи 8. При срабатывании датчика реверса подачи 8 считывался цифровой сигнал с датчика 11 и преобразовывался с помощью цифрового аналогового преобразователя (ЦАП) в аналоговые сигналы задания на увеличение частоты вращения ротора электродвигателя 6, а также на вычисление аналогового значения величины подачи, диаметра круга и текущего значения глубины пропила h кругом заготовки. Во время отвода круга 1 увеличивается его частота вращения пропорционально износу круга. При зажиме заготовки прихватом-рейкой 14 вращался вал 15 энкодэра 16. По цифровому сигналу, считываемому с энкодэра 16, определялся диаметр разрезаемой заготовки.

На рисунке 4 приведена гидравлическая схема адаптивного управления мощностью резания за счет изменения подачи, которая используется в качестве регулятора процесса резания. Давление в гидросистеме поддерживается с помощью редукционного гидроклапана МКР10-100-2(1). Для задания постоянной величины пода-

чи применялся регулятор потока МПГ55-32(5) с ручным управлением. Для задания переменной подачи круга в автоматическом режиме дополнительно встроен электрогидравлический регулятор потока с пропорциональным управлением РП10 (3), управляющий подачей круга в автоматическом режиме от ЛИР581.

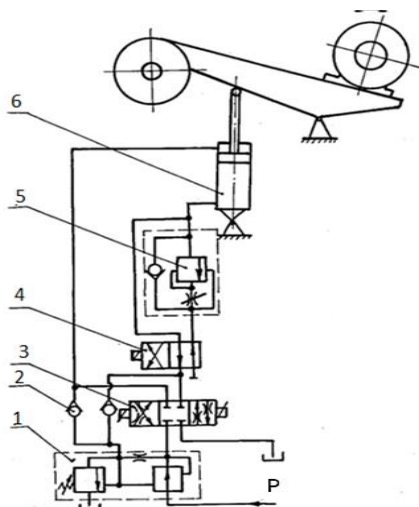


Рисунок 4 – Гидравлическая схема адаптивного управления мощностью резания за счет переменной скорости подачи

Гидрораспределитель Р102(4) позволяет производить переключение с ручного управления скоростью подачи с помощью регулятора потока 5 в автоматическое, с помощью электрогидравлического регулятора потока 3 и обратно.

Для поддержания постоянной мощности резания (рисунок 5) использовался преобразователь мощности Е829НП/17(1), учитывающий параметры тока и напряжения электродвигателя 4А180М2У3 мощностью 30 кВт. Аналоговый сигнал с преобразователя 1 поступает в суммирующее устройство К56ИМ1(2). С помощью выключателя В1 можно задать любую мощность резания в пределах характеристики электродвигателя, увеличивая или уменьшая мощность резания, можно также менять нижний предел подачи круга.

Одновременно с программного устройства ЛИР581 поступает аналоговый сигнал задания U_3 на суммирующее устройство 2 и далее на блок управления электрогидравлическим регулятором потока с пропорциональным управлением РП10 (3), который задает переменную подачу на протяжении всего процесса резания.

В процессе резания с возрастанием длины дуги контакта круга с заготовкой возрастающий отрицательный сигнал от преобразователя мощности 1 вычитается суммирующим устройством с сигнала от ЛИР581 и поступает в блок управления БУ2110(3).

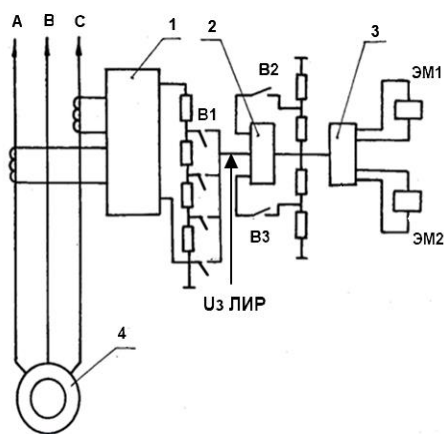


Рисунок 5 – Электрическая схема адаптивного управления мощностью резания за счет переменной скорости подачи

Таким образом уменьшается подача круга при увеличении длины дуги контакта круга с заготовкой. С с помощью контактов реле В2

и В3 включаются электромагниты ЭМ1 и ЭМ2, и осуществляется рабочая подача и обратный ход круга.

На рисунке 6 приведены осциллограммы зависимости времени резания t_p от мощности резания $P(1,3)$ и скорости подачи круга $F_k(2,4)$ при разрезании круглых заготовок из стали 45 диаметром 0,06 м с адаптивным управлением мощностью резания с переменной (2) и с постоянной подачей (4).

Осциллограмма снималась с помощью программы Power Graph Professional с применением сетевых фильтров мод. DL-100EA1 для подавления высокочастотных составляющих тока и напряжения. Оцифровка графиков производилась с помощью программы Graph2Digit. Исследования проводились в лаборатории СКБ ОЦ ОАО «СтанкоГомель».

Разрезались круглые заготовки из стали из стали 45 Гост 1050-88 диаметром от 0,02 м до 0,06 м кругами марки 41-400x4x32 14А 80-Н 41-43BF ГОСТ 21963-2002. со скоростью резания 80 м/с без охлаждения в режиме адаптивного управления с постоянной мощностью с переменной подачей (рисунок 6 (1,2)) и в режиме с переменной мощностью и постоянной подачей (рисунок 6 (3,4)).

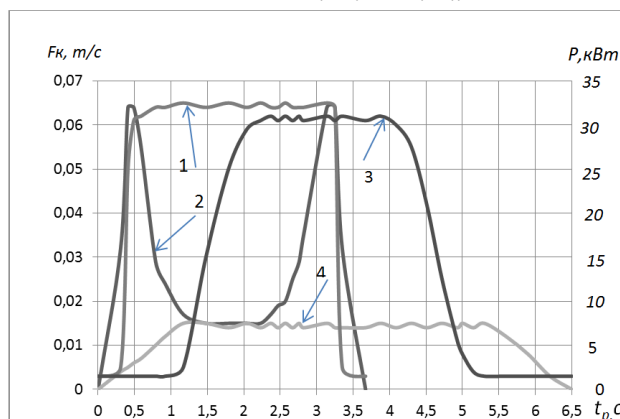


Рисунок 6 – Осциллограммы зависимости времени резания t_p от мощности резания P (1) и переменной скорости подачи F_k (2) при адаптивном процессе резания и мощности резания P (3) с постоянной подачей F_k (4), при разрезании круглой заготовки

В режиме адаптивного управления мощностью подача с программируемого цифрового устройства ЛИР581 задавалась максимальной подачей, равная 0,064 м/с, а на преобразователе мощности (рисунок 5 Е829НП/17(1) задавалась мощность 30 кВт, соответствующая максимальной длине дуги контакта круга с заготовкой.

В режиме резания с постоянной подачей величина подачи задавалась соответствующая максимальной мощности при максимальной длине дуги контакта круга с заготовкой 30 кВт (рисунок 6 (3,4) [6].

При анализе результатов экспериментальных исследований установлено, что при разрезании заготовок диаметром 0,02 м повышение производительности незначительное. Коэффициент увеличения производительности равен $K_{np}=1,05$:

$$K_{np} = \frac{t_{pn}}{t_{pa}}, \quad (5)$$

где t_{pn} – время резания в режиме с постоянной подачей, сек;
 t_{pa} – время резания в режиме адаптивного управления мощностью с переменной подачей, сек.

В данном случае мощность при резании заготовок диаметром 0,02 м мало отличается от мощности холостого хода и управляющий сигнал от преобразователя мощности незначительный. Время резания в адаптивном режиме управления мощностью составляет 1,65 сек, а в режиме с постоянной подачей 1,73 сек, коэффициент производительности K_{np} равен 1,05.

При разрезании заготовок диаметром от 0,02 м до 0,04 м коэффициент производительности K_{np} увеличился до 1,37, при разрезании заготовок диаметром от 0,04 до 0,06 м – до 1,77.

Значительное повышение производительности от 20 % до 48 % при резании круглых заготовок диаметром от 0,03 м до 0,06 м при

адаптивном режиме резания происходило за счет прохождения кругом перебогов на ускоренном ходу с максимальной подачей.

На рисунке 7. приведены графики зависимости времени резания t_{pa} , t_{pn} и коэффициента повышения производительности K_{np} от диаметра разрезаемой заготовки d при адаптивном управлении мощностью процесса резания с переменной подачей и процесса резания с постоянной подачей.

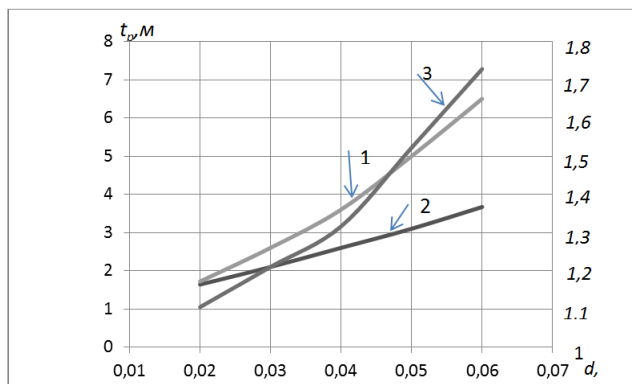


Рисунок 7 – Зависимости времени резания t_{pa} (1) и t_{pn} (2) и коэффициента повышения производительности K_{np} (3) от диаметра разрезаемой заготовки d при адаптивном управлении мощностью процесса резания с переменной подачей и процесса резания с постоянной подачей

Заключение

На основании изложенного можно сделать следующее заключение:

- Предложена конструкция абразивно-отрезного станка, позволяющая с помощью процессорного устройства производить адаптивное управление мощностью резания круглых заготовок за счет изменения подачи круга во время реза с целью достижения максимальной производительности.
- Анализ данных показывает, что при адаптивном управлении мощностью резания за счёт изменения скорости подачи с помощью электрогидравлического распределителя РП-10 с пропорциональным управлением с дросселированием на входе и выходе гидроцилиндра при разрезании круглых заготовок диаметром от 0,02 м до 0,06 м., что коэффициент шлифования возрастает в среднем на 2–3 %.
- Незначительное увеличение коэффициента шлифования можно объяснить возросшими нагрузками на зерно круга при врезании в заготовку, что подтверждается наличием в шламе от абразивно-отрезного круга большого количества целых зерен и также неполным совпадением подачи круга при адаптивном процессе резания (рисунок 6 (2) с оптимальной подачей (рисунок 2 (2), обеспечивающей максимальное повышение коэффициента шлифования.
- На основании результатов экспериментальной проверки эффективности конструктивных решений и рекомендаций, направленных на увеличение производительности, установлено, что применение режима адаптивного управления мощностью резания коэффициента производительности K_{np} при разрезании круглых заготовок диаметром от 0,02 м до 0,04 м возрастает с 1,05 до 1,37, диаметром от 0,04 м. до 0,06 м. – до 1,77.
- Значительное повышение производительности от 20 до 48 % при резании круглых заготовок диаметром от 0,03 м до 0,06 м при адаптивном режиме резания происходит за счет перемещения кругом перебогов на ускоренном ходу с максимальной подачей.
- Данные, полученные путем расчета на РС методом наименьших квадратов по стандартной программе и экспериментальным путем, показывают, что коэффициенты парной корреляции, определяющие линейную зависимость времени резания t_{pa} и t_{pn} от диаметра разрезаемой заготовки d при адаптивном режиме резания, равен $r_a = 0,988$, при режиме резания с постоянной подачей $r_n = 0,983$. Это позволяет сделать вывод о достаточно тесной линейной зависимости обеих этих величин от параметра d .

Список цитированных источников

- Storm, T. Adaptive control in cut-off grinding."Adv. Mach / T. Storm // Tool Des and Res. – 1970. – Vol.A".Oxford e/a. – 455–464.
- Старовойтов, Н. А. //Повышение эффективности использования абразивно-отрезных станков за счет автоматизированного поиска оптимальных режимов резания/ Н. А. Старовойтов, С. В. Рогов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2020. – №4: Машиностроение. – С. 10–12.
- Старовойтов, Н. А. Анализ путей повышения эффективности абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой / Н. А. Старовойтов, С. В. Рогов // Современные проблемы машиноведения : (тезисы докладов XII международной научно-технической конференции). – Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 68–69.
- Геллетсбергер, Х. Горячее отрезание шлифовальным кругом на сталепрокатных заводах. Современный технический уровень, тенденции / Х. Геллетсбергер // Современная техника Австрии: тез. доклад – Москва : Красная Пресня, 1981. – С. 8–12.
- Старовойтов, Н. А. Экспериментальные исследования эффективности поддержания постоянной скорости резания при износе круга на абразивно-отрезных станках с качающейся шпиндельной бабкой / Н. А. Старовойтов // Вестник БГУ – 2019. – № 3 – С. 84–92.
- Володько, Г. Ф. Выбор мощности привода абразивно-отрезных станков / Г.Ф.Володько, Н. Н. Платонов // Станки и инструмент. – 1979. – №2. – С.17–18.

References

- Storm, T. Adaptive control in cut-off grinding."Adv. Mach / T. Storm // Tool Des and Res. – 1970. – Vol.A".Oxford e/a. – 455–464.
- Starovojtov, N. A. //Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya abrazivno-otreznyh stankov za schet avtomatizirovannogo poiska optimal'nyh rezhimov rezaniya/ N. A. Starovojtov, S. V. Rogov// Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2020. – №4: Mashinostroenie. – S. 10–12.
- Starovojtov, N. A. Analiz putej povysheniya effektivnosti abrazivno-otreznyh stankov s kachayushchejsya shpindel'noj bab-koj / N. A. Starovojtov, S. V. Rogov // Sovremennye problemy mashinovedeniya : (tezisy dokladov XII mezh-dunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii). – Gomeľ, GGTU im. P. O. Suhogo, 2018. – S. 68–69.
- Gelletsberger, H. Goryachee otrezanie shlifoval'ny'm krugom na staleprokatnyh zavodah. Sovremennyy tekhnicheskij uroven', tendencii / H. Gelletsberger // Sovremennaya tekhnika Avstrii: tez. doklad – Moskva : Krasnaya Presnya, 1981. – S. 8–12.
- Starovojtov, N. A. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti podderzhanii postoyannoj skorosti rezaniya pri iznose kruga na abrazivno-otreznyh stankah s kachayushchejsya shpindel'noj bab-koj / N. A. Starovojtov // Vestnik BRU – 2019. – № 3 – S. 84–92.
- Volod'ko, G. F. Vybór moshchnosti privoda abrazivno-otreznyh stankov / G.F.Volod'ko, N. N. Platonov // Stanki i instrument. – 1979. – №2. – S.17–18.

Материал поступил 24.08.2022, одобрен 05.11.2022, принят к публикации 11.11.2022

UDC 556.16(476.1)

ENVIRONMENTAL PROBLEMS CAUSED BY THE EXTRACTION OF NON-METALLIC BUILDING MATERIALS FROM RIVERBEDS

**A. A. Volchak¹, S. I. Parfomuk², N. N. Sheshko³, N. N. Shpendik⁴,
D. N. Dashkevich⁵, S. V. Sidak⁶, M. F. Kukharevich⁷, I. N. Rozumets⁸**

¹ Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Department of Environmental Engineering, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: volchak@tut.by

² Ph.D in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: parfom@mail.ru

³ Ph.D in Engineering, Associate Professor, Head of the head of the Research Department, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: optimum@tut.by

⁴ Ph.D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: shpendik@tut.by

⁵ Senior Lecturer of the Department of Environmental Engineering, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: dionis1303@mail.ru

⁶ Assistant of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

⁷ Postgraduate student, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

⁸ Postgraduate student, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: ivan.rozumets@bk.ru

Abstract

Extraction of non-metallic building materials from rivers can lead to negative consequences, such as disruption of the structure of the river bed, change in the balance of sediment intake. It can also lead to the undermining of the fish food supply, destroy spawning grounds, and reduce the ability of the river to self-purification. Data for the section of the Pripyat River at the Lubansky Bridge for the period from 1978 to 2018 were used. To study the impact on the river ecosystem of the planned work on the extraction of non-metallic building materials, an approach was used to determine the ecological runoff when a natural speed regime is formed, which ensures the natural functioning of the ecosystem. Digital models of the bottom relief in 2021 and 2022 showed a positive trend in the formation of sediments in the studied area. The volume of possible material intake was established, which amounted to 33122.5 m³. At the same time, the estimated volume of sediment formation within this site is 11034 m³ per year, then it is possible to carry out work on the intake of non-metallic building materials on the studied section of the river no more than once every three years.

Keywords: non-metallic building materials, mining, the Pripyat River riverbed, ecological runoff.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, ВЫЗВАННЫЕ ДОБЫЧЕЙ НЕРУДНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ РУСЕЛ РЕК

**А. А. Волчек, С. И. Парфомук, Н. Н. Шешко, Н. Н. Шпендик,
Д. Н. Дашкевич, С. В. Сидак, М. Ф. Кухаревич, И. Н. Розумец**

Реферат

Добыча нерудных строительных материалов из рек может привести к негативным последствиям, таким как нарушение структуры русла реки, изменение баланса поступления наносов. Это также может привести к подрыву кормовой базы рыб, уничтожению нерестилищ и снижению способности реки к самоочищению. В работе использованы данные по участку реки Припять у Любанского моста за период с 1978 по 2018 год. Для изучения влияния на речную экосистему планируемых работ по добыче нерудных строительных материалов использован подход по определению экологического стока при формировании естественного скоростного режима, обеспечивающего естественное функционирование экосистемы. Цифровые модели рельефа дна в 2021 и 2022 годах показали положительную тенденцию в формировании отложений на исследуемом участке. Был установлен объем возможного забора материала, который составил 33122,5 м³. В то же время расчетный объем образования наносов в пределах этого участка составляет 11034 м³ в год, поэтому проведение работ по забору нерудных строительных материалов на исследуемом участке реки возможно не чаще одного раза в три года.

Ключевые слова: нерудные строительные материалы, добыча, русло Средней Припяти, экологический сток.

Introduction

Extraction of sand, gravel, pebbles and their mixtures from riverbeds and floodplains, their delivery to consumers is one of the components of the activities of river ports, shipping companies. In addition, the development of non-metallic building materials (NBM) is carried out by numerous construction organizations with powerful mining facilities, which requires coordination of the work of these organizations by environmental authorities and scientific justification of production volumes. The problem is compounded by the fact that, in an effort to reduce the costs of mining NBM, they try to locate their production sites near cities where working resources are concentrated. This approach is accompanied by disruption of water intakes and water outlets, erosion of bridge supports and crossings of oil and gas pipelines, affects the stability of port hydraulic structures, and contributes to the deterioration of navigable conditions in the quarry area. The negative consequences are especially acute on rivers

with low water consumption in the low-water mark. This problem is acute in many regions of the world and is widely studied by specialists [1-6].

A number of works by Russian scientists are devoted to various aspects of assessing the consequences of the extraction of NBM from riverbeds. Thus, in [7], methods for calculating the subsidence of the water level due to large-scale mining of NBM are considered in detail, a comparative analysis of models for calculating changes in hydraulic and hydrochemical parameters in zero-, one-, two- and three-dimensional formulation is given. The authors present the main advantages and disadvantages of a large number of software products (HEC-RAS, MIKE, SMS, Delft3D-Flow, etc.) used in solving problems related to the assessment of the consequences of large-scale mining of petroleum products. In the article [8], a hydrodynamic model of the Vyatka River was developed, which made it possible to assess possible changes for both the high-speed and level regime of a water body due to the extraction of NBM for

various limiting hydrological conditions. The mechanisms of formation and distribution of pollution of the river are investigated. Vyatka and the results of model calculations when washing floodplain water bodies. Based on the combination of the one-dimensional hydrodynamic model HEC-RAS v.4.1 for the primary assessment and the two-dimensional model SMS v.11.1 for the final calculations, the channel deformations were estimated under standard conditions of the hydrological regime of the Kama and Votkinsk reservoirs in [9].

The method of maintaining the stability of the riverbed during the extraction of non-metallic building materials is described in detail, the task is achieved by eliminating the reshaping of the runoff structure and preserving the equally waste planned jets along the width of the riverbed [10]. In [11], an assessment of the state of the riverbed was given and a forecast of channel deformations was made based on the analysis of the dynamics of changes in the main parameters of bends, taking into account the safety of navigation, a conclusion was made about the possibility of extraction of sand and gravel rocks. The article [12] describes in detail the natural and anthropogenic deformations of the Oka riverbed in the Ryzan region. The investigated section of the riverbed is more than 100 km. With the beginning of the extraction of NBM in 1973-2003, the volume of the riverbed increases, flowing differently at different times on different sections of the river.

The researchers note that the extraction of sand and gravel in rivers is the main cause of their degradation, especially when the natural solid sediment runoff in the river is disrupted by hydraulic engineering. With uncontrolled extraction of NBM in many rivers, meandering may decrease, the bank's collapse, and the geometry of the channels may be disrupted. In addition, such activities usually cause denudation and coarsening of the bottom, destruction of spawning grounds, erosion of hydraulic structures and destruction of bridges, as well as a decrease in solid runoff into the delta. Special attention is paid to modeling the extraction of sand and gravel from riverbeds and floodplains [13-14].

Thus, when designing the extraction of NBM from channel quarries, it is extremely necessary to take into account that their extraction makes more significant changes to the hydraulics of the river runoff and channel processes than dredging operations carried out to improve navigable conditions when the soil only moves in the riverbed.

The purpose of this work is the ecological justification of the possible removal of NBM from the riverbed. The Pripjat River in its middle course was chosen as a model river.

Materials and methods

The Pripjat River is the largest navigable right tributary of the Dnieper with a length of 775 km and a catchment area of 114.3 thousand km². In the studied alignment, the width of the river is 50-60 m, the bottom is sandy and sandy-muddy, and the average slope of the river is 0.08 m/km. The food is mixed, with a predominance of snow. The water regime is characterized by a long spring flood: from the first decade of March, at most in mid-April, the recession drags on for 3 - 3.5 months. The summer short-term rainfall is interrupted by rain floods and an almost annual autumn rise in the water level. Spring accounts for 60-65% of the annual runoff, the water rises to 3.5 m, accompanied by extensive spills. The color of the water is determined by the predominance of peat-bog soils in the river basin.

On the Pripjat River, in the area between the Pinsk City and the Lubansky Bridge, it is planned to mine NBM (Fig. 1).

The granulometric composition of the bottom sediments of the Pripjat River was determined by the sieve method by employees of the technological laboratory of the branch "Central Laboratory" of the Republican Unitary Enterprise "Scientific and Production Center for Geology according to soil samples from the riverbed selected by employees of the Applied Ecology sector of the Laboratory of Geodynamics and Paleogeography of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (Table 1).

Table 1 – Granulometric composition of the soil of the Pripjat River on the territory of the Pinsk district

Watercourse	Granulometric composition, %						
Fraction size, mm	0.80	0.63	0.315	0.25	0.10	0.071	riverbed
The Upper Pripjat River	21.4	12.7	40.3	10.3	15.1	0.2	0.0
The Pripjat River	0.4	0.5	16.2	17.0	62.2	2.9	0.8

Due to the fact that regular hydrological observations are conducted by the Hydro meteorological Service of the Republic of Belarus on the Pripjat River at the Lubansky Bridge, in the immediate vicinity of the NBM mining site, the determination of the calculated hydrological characteristics was carried out directly from the observation data, taking into account the requirements set out in [15-16]. In this work, data from hydrometric observations for the period from 1978 to 2018, i.e. 41 years, are used, which is sufficient to obtain objective statistical hydrological characteristics along the Pripjat River in the Lubansky Bridge alignment.



Figure 1 – Location of the investigated area

The missing data in the series of observations were restored using analog rivers using the software package "Hydrolog - 2" [17].

The ecological runoff was determined according to the methodology described in detail in [18-19]. Ecological runoff is the amount of water that must remain in the river to ensure the conditions for the existence of hydrobionts while maintaining its necessary quality. In this case, floodplain ecosystems are preserved, and the river remains an element of the landscape. Thus, the ecological runoff ensures the quantitative and qualitative condition of the water body in the most low-water period of the year. The existing approaches to determining the ecological runoff regulate only the minimum value of the river runoff. At the same time, there is no definition of ecological runoff for various security conditions. The most objective way to determine the ecological runoff, taking into account the intra-annual distribution, is the method of increasing security, therefore it is used in this work.

Riverbed processes in rivers are continuous and constantly changing depending on the hydrological regime, which mainly depends on the hydrodynamic action of flowing water, which has mechanical energy and is able to perform work on the erosion of the channel and floodplain, transfer and accumulation of sediments. When sediments are deposited, the area of the live section of the stream decreases, and, consequently, the runoff velocity and its transporting capacity increase, which stops the sediment deposition process. Depending on the distribution of runoff velocities in some areas, suspended sediments may turn into bottom sediments or vice versa.

Thus, the deformations of the channel, which are the result of a violation of the dynamic equilibrium between the transporting capacity of the stream and its saturation with sediments, tend to create a constant runoff of sediment along the length of the stream. It follows from this that the violation of the constancy of sediment runoff along the length causes erosion in some areas, and accumulation in others, which, ultimately, should lead to the restoration of the disturbed equilibrium of the constancy of sediment runoff along the length of the stream [20-21].

For the studied area, surveys of the bottom relief were carried out in 2021 and 2022 during the spring flood by means of a sonar multipath echo sounder. The measurement database is a file with the values of coordinates in a flat system and the bottom marks for individual measured points. Data processing was carried out using the author's design tools in the ArcGIS environment using a number of models for terrain analysis. As a result of processing the survey data presented by Dneprobudput, digital models of the bottom relief of the riverbed section were obtained. Using the COMSOL Multiphysics software package, we modeled the water runoff in the studied channel of the Pripjat River.

The Computational Fluid Dynamics module was used for numerical modeling, which presents a set of RANS turbulence models (models based on Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) implemented in the corresponding hydrodynamic interfaces [22-25].

In accordance with the current legislation on the protection of fish stocks and their habitats in natural conditions, the planned works should be assessed for damage caused to the watercourse and the amount of compensation payments for the harmful effects on it [26]. Compensation payments for a specific object of the animal world (in this case, fish) are calculated separately for each impact zone, followed by summation of the results.

According to the fisheries classification, the river belongs to the water bodies of the first category, for which the norm of allowable catch of fish from one hectare of fishing grounds is 32.4 kg per year. The total biomass of fish per unit area, taking into account the coefficient of recalculation of the fishing stock into the total biomass equal to 1.49, is determined by the dependence

$$B = S_{PC} \cdot C_{FS} \cdot C_B, \quad (1)$$

where B is the total biomass of fish per unit area, kg / ha; S_{PC} is the standard of permissible catch of fish, kg / ha; C_{FS} is the coefficient of conversion of the standard of permissible catch of fish into the commercial fish stock; C_B is the coefficient of conversion of the commercial fish stock into the total biomass.

Results and discussion

Data on the quantitative characteristics of the runoff of the Pripjat River – the Lubansky Bridge by month and year are presented in Table 2. According to Table 2, 41% of the annual runoff accounts for the spring period, winter runoff accounts for 21% of the annual runoff, the summer-autumn season accounts for 38% of the annual runoff.

Table 2 – The main hydrological characteristics of the runoff of the Pripjat River – the Lubansky Bridge

Parameter	Month												Year
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Q, m³/s	62.6	72.9	108	144	98.2	64.6	52.9	47.1	45.5	51.0	58.5	59.9	71.2
C_v	0.44	0.50	0.50	0.44	0.33	0.37	0.45	0.53	0.56	0.51	0.53	0.48	0.27

The average long-term value of the minimum annual runoff of 95% of the probability of exceeding the Pripjat River at the Lubansky Bridge alignment is 46.7 m³/s. Fig. 2 shows the results of calculating the minimum average monthly runoff of 95% of the probability of excess (security), taking into account the intra-annual distribution of runoff.

The size of the ecological runoff of the Pripjat River at the Lubansky Bridge is accepted as 75% of the minimum monthly runoff of 95% security and is 9.90 m³/s. When using the security transfer method, the ecological runoff of the Pripjat River has a 95% probability of exceeding, according to the hydrological calculations carried out, 39.0 m³/s. The obtained results formed the basis for calculating the runoff rate of water corresponding to the ecological runoff, taking into account the intra-annual distribution of runoff and existing before the start of the planned works in the Pripjat River riverbed (Table 3).

Based on the available data on river runoff and mathematical modeling, the average monthly and average annual values of solid runoff, including the runoff of suspended and entrained sediments, presented in Table 4, are determined.

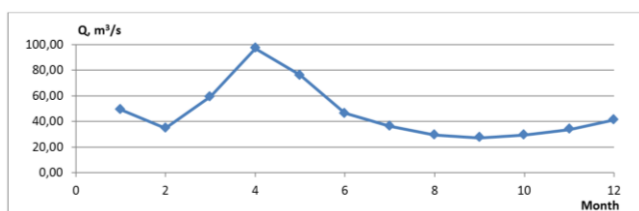


Figure 2 – Minimum average monthly runoff of 95% security, taking into account the intra-annual distribution of the runoff of the Pripjat River – the Lyubansky Bridge

Table 3 – Water runoff rates corresponding to the ecological runoff 95% probability of excess (security) taking into account the intra-annual distribution, m/s

Slot	Ecological runoff (75% of the minimum monthly runoff of 95 % security)	Ecological runoff (security transfer)
1	0.11	0.42
2	0.09	0.36
3	0.10	0.38
4	0.11	0.42
5	0.08	0.31
6	0.08	0.33
7	0.08	0.31
8	0.08	0.32
9	0.09	0.34
10	0.10	0.38
11	0.09	0.35
12	0.09	0.34
Minimum	0.08	0.31

Table 4 – Solid runoff of the Pripjat River – the Lubansky Bridge taking into account intra-annual distribution, m³/month (year)

Months												Year
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<i>Suspended sediment runoff</i>												
3288	2329	3970	6479	5093	3101	2415	1966	1805	1974	2243	2760	37423
<i>Runoff of entrained sediments</i>												
546	490	1449	3165	1915	630	435	215	254	352	321	248	10020
<i>Solid runoff</i>												
3834	2819	5419	9644	7008	3731	2850	2181	2059	2326	2564	3008	47443

The analysis of changes in the channel bottom marks in the studied area showed that the main channel processes are observed in the area below the bridge and the bend area near the left bank (Fig. 3). Thus, it can be assumed that these areas actively form channel-forming processes; therefore it is not rational to involve them in any anthropogenic activities. In quantitative terms, the ratio of sediment volume as of 2021 and 2022 has a positive balance, which is presumably due to an increase in meanders in the direction of the road with improved pavement.

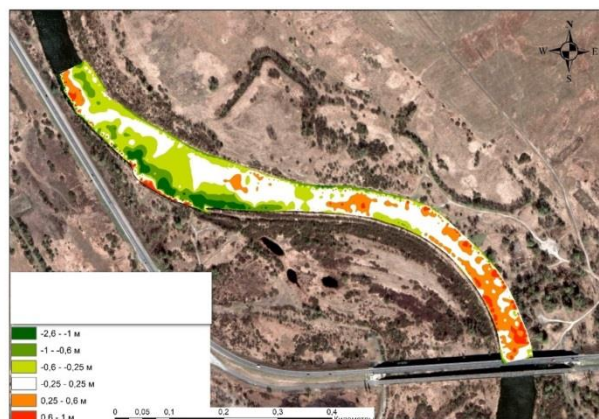


Figure 3 – Changes in the bottom relief for 1 year (from 2021 to 2022)

Taking into account the average long-term value of the runoff in the Pripyat River at the Lubansky Bridge alignment and the cross-sectional area in the places of the planned slots before and after the work on the extraction of NBM, we calculated the water runoff rates for 12 planned slots (Table 5).

Table 5 – Water runoff rates along 12 planned slots before and after the planned work on the extraction of NBM, m/s

Slot	Before the work on the extraction of NBM	After the planned works
1	0.76	0.54
2	0.65	0.46
...
12	0.62	0.47
Minimum	0.56	0.32

Comparing the data in Tables 3 and 5, it can be concluded that the water runoff rates for all 12 planned slots after the planned work on the extraction of NBM will be higher than the minimum water runoff rate corresponding to the ecological runoff of 95% of the probability of excess (security), equal to 0.31 m³/s. Moreover, the latter value was obtained using the security transfer method and is, in a sense, an "upper estimate" of the water velocity of the ecological runoff. If we consider the water runoff velocity corresponding to the ecological runoff equal to 75% of the minimum monthly runoff of 95% security, then the minimum velocity in the slot 5 (0.32 m³/s) is 4 times higher than the lowest rate of ecological runoff equal to 0.08 m³/s.

Based on the preliminary placement of slots in the zones of the greatest bottom sediments and zones with the minimum intensity of channel processes, the approximate volume of possible NBM fences is calculated (Table 6).

Table 6 – Estimated volume of slots

Slot number	Area, m ²	Depth, m			Volume, m ³
		minimum	maximum	average	
1	320	1.83	3.05	2.57	821.22
2	320	2.20	2.82	2.65	847.16
...
52	320.5	1.78	1.81	1.80	575.54
53	320.5	1.80	1.88	1.82	582.51
Total					42424.27

The average speed of water runoff through all planned slots after the planned works may decrease from 0.65 to 0.42 m³/s, which will lead to the formation of bottom sediments with a volume of 11034 m³/year.

The results obtained show that the planned works will not entail a violation of the ecological state of the Pripyat River. At the same time, the water runoff velocity in the river will be higher than with ecological runoff, and conditions for the existence of hydrobionts will be provided in the river while maintaining the necessary water quality.

During development, it is recommended to preserve gaps (10 m) for the formation of local distortions of the velocity field, which will contribute to more intensive sediment deposition. Taking into account the above, the layout of the slots is shown in Fig. 4. With this arrangement of slots, the volume of the recess will be 33122.5 m³.



Figure 4 – Numbers and placement of slots taking into account technological gaps

The amount of damage was estimated using the method of compensation payments. Since, according to the fisheries classification, the river belongs to the water bodies of the first category, for which the norm of allowable catch of fish from 1 ha is 32.4 kg per year.

The average operational capacity of a dredger of the "ZS-28B" type is 450 tons/hour. The permissible time of soil removal is 140 hours of continuous operation of the dredger, that is, harmful effects on the watercourse will be carried out within 6 days.

The width of the zone of severe harmful effects is set at 1000 m, the zone of moderate harmful effects is 500 m. Taking into account the planned engineering and economic activities, the areas of harmful effects are calculated for 4 zones. The total areas of harmful effects are estimated:

- direct destruction zone – 1.65 ha;
- zone of severe harmful effects – 13.78 ha;
- zone of moderate harmful effects – 6.20 ha;
- zone of weak harmful effects – 6.20 ha.

These areas should be considered as areas that will not be able to produce fish products and offspring from it, throughout all the years of the reproductive ability of a part of the population.

In the Pripyat River on the territory of the Pinsk district, on an area of 1 hectare, an average of 1817 fish live in a fish herd. The expected damage to the type of engineering and economic activity planned in 2022 in the studied sections of the riverbed is estimated at 552 pieces of fish per 1 ha of the watercourse area. The coefficient of the status of the territory in the studied areas is equal to 1 for all fish species, except for the fish included in the "Red Book of the Republic of Belarus", for which the coefficient is equal to 3. The Pripyat of the planned works on the extraction of NBM in the territory of the Pinsk district of the Brest region, are estimated at 341 base values.

To increase the stability of the channel to the predicted planned high-altitude deformations, it is recommended to observe the following conditions directly during the development of the slots:

- the length of the slots cannot exceed the length of the existing channel formations created by the river in a multi-year section and during navigation in 2022, therefore, before the start of the planned work, it is necessary to clarify the placement and length of shallow sections of the channel;
- the width of the recess should not violate the stability of the coastal slopes – in the studied areas with a freely meandering type of channel process, it cannot be more than 0.5 of the width of the channel along the water cut of the inter-runoff rate of 50 % security;
- the depth of development is taken from the surface of the bottom of the watercourse and is the average thickness of the removed soil layer;
- the development of soil should begin from the lower section of the development and gradually move upstream against the current, which will allow the suspension formed during the work to be deposited in the developed slot;
- when carrying out the planned works, it is necessary to leave undeveloped bottom sections of the channel about 10 m long between the sequentially located slots for a local artificial basis of erosion;
- the slots should be placed at a distance of at least 5 m from the shore, which will minimize the sharp collapse of the shallow sections of the channel being developed and prevent the collapse of the coastal slopes.

In conditions of increasing anthropogenic impact on the riverbed process of the watercourse, in order to reduce the fall of the water level and the bottom of the riverbed by engineering methods of stabilization and recultivation of the natural regime of the Pripyat River, it is recommended to provide:

- creation of artificial local erosion bases below the planned NBM workings – flooded sheet pile walls, bottom thresholds;
- dumping on coastal slopes and into the bed of coarse-grained material;
- creation of artificial zones for the habitat of ichthyoid fauna, etc.

The timing of the work on the extraction of NBM should exclude periods of spawning migrations and fish spawning.

Conclusion

The determination of the natural hydrological regime of the Pripyat River is based on an assessment of the existing and projected ecological runoff, which ensures the functioning of the watercourse as an ecosystem. Carrying out work on the extraction of NBM causes changes in the channel parameter, which in turn leads to a change in the hydrological regime. Since the normal functioning of the watercourse is possible in the presence of

ecological runoff in it, we performed a comparative assessment of the simulated ecological runoff of the Pripyat River in this area. The results obtained allow us to conclude that the planned work on the extraction of NBM will not entail a violation of the ecological state of the Pripyat River. At the same time, the water runoff velocity in the river will be higher than with ecological runoff, and conditions for the existence of hydrobionts will be provided in the river while maintaining the necessary water quality.

The simulation of the longitudinal runoff showed the redistribution of velocities within the slots and technological gaps. Changes in the velocity plot form sections with a runoff velocity of less than 0.3 m/s within the deepened part of the slot, and increased velocities (more than 0.9 m/s) at the sections of technological breaks. This structure of velocity redistribution increases the intensity of sediment deposition, and at the same time reduces the rate of transformation of the spatial position of the shoreline of the riverbed in relation to anthropogenic objects.

Digital models of the bottom relief in 2021 and 2022 showed a positive trend in the formation of sediments in the study area. Taking into account the current bottom relief and analytically established areas of potential extraction of non-metallic materials, the volume of possible material intake was established, which amounted to 33122.5 m³. Since the estimated volume of sediment formation within this section is 11034 m³/year, it is possible to carry out work on the intake of NBM on this section of the river no more than once every three years with mandatory repeated environmental assessment of hydraulic and hydrological processes.

The total compensation payments for the harmful effects on the ichthyoid fauna of the Pripyat River of the planned work on the extraction of NBM are estimated at 10924.47 rubles.

References

- Mikel Calle, Petteri Alho, Gerardo Benito, Channel dynamics and geomorphic resilience in an ephemeral Mediterranean river affected by gravel mining, *Geomorphology*, Volume 285, 2017, Pages 333-346, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.026>.
- Thomas Dépret, Clément Vermoux, Emmanuèle Gautier, Hervé Piégay, Mariya Doncheva, Brian Plaisant, Sirine Ghamgui, Evan Mesmin, Ségolène Saulnier-Copard, Lucile de Milleville, Julien Caverro, Pablo Hamadouche, Lowland gravel-bed river recovery through former mining reaches, the key role of sand, *Geomorphology*, Volume 373, 2021, 107493, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107493>.
- Ramesh Murlidhar Bhatawdekar, Trilok Nath Singh, Edy Tonnizam Mohamad, Rajesh Jha, Danial Jahed Armagahni, Dayang Zulaika Abang Hasbollah, Chapter 17 - Best river sand mining practices vis-a-vis alternative sand making methods for sustainability, Editor(s): Thendiyath Roshni, Pijush Samui, Dieu Tien Bui, Dookie Kim, Rahman Khatibi, Risk, Reliability and Sustainable Remediation in the Field of Civil and Environmental Engineering, Elsevier, 2022, Pages 285-313, ISBN 9780323856980, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85698-0.00007-1>.
- E. S. Rentier, L. H. Cammeraat, The environmental impacts of river sand mining, *Science of The Total Environment*, Volume 838, Part 1, 2022, 155877, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>.
- B.R.V. Susheel Kumar, Muhammad Faiz Bin Zainuddin, Dato Chengong Hock Soon, Ramesh Murlidhar Bhatawdekar, Chapter 18 - Learning lessons from river sand mining practices in India and Malaysia for sustainability, Editor(s): Thendiyath Roshni, Pijush Samui, Dieu Tien Bui, Dookie Kim, Rahman Khatibi, Risk, Reliability and Sustainable Remediation in the Field of Civil and Environmental Engineering, Elsevier, 2022, Pages 315-331, ISBN 9780323856980, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85698-0.00002-2>.
- Duncan Wishart, Jeff Warburton, Louise Bracken, Gravel extraction and planform change in a wandering gravel-bed river: The River Wear, Northern England, *Geomorphology*, Volume 94, Issues 1-2, 2008, Pages 131-152, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.003>.
- Lepihin, A. P. K probleme ocenki posledstvij krupnomasshtabnoj dobychi nerudnyh stroitel'nyh materialov na poverhnostnye vodnye ob'ekty / A. P. Lepihin, T. P. Lyubimova, S. A. Lepeshkin, A. A. Tiunov, Ya. N. Parshakova, D. I. Perepelica // *Vodnoe hozyajstvo Rossii.* – 2014. – №3. – S. 108–119.
- Lepihin, A. P. Gidrodinamicheskoe modelirovanie reki Vyatki v srednem techenii: postanovka zadachi, rezul'taty raschetov / A. P. Lepihin, T. P. Lyubimova, Yu. S. Lyahin, A. A. Tiunov, A. V. Bogomolov,

- D. I. Perepelica, Ya. N. Parshakova // *Vodnoe hozyajstvo Rossii.* – 2013. – №3. – S. 16–32.
- Perepelica, D.I. Ocenka deformacij rusla reki Kamy i razrabotka rekomendacij po reglamentacii dobychi nerudnyh stroitel'nyh materialov v predelakh nizhnego b'efa Kamskoj GES / D. I. Perepelica, A. P. Lepihin, S. A. Lepeshkin, A. A. Tiunov // *Vodnoe hozyajstvo Rossii.* – 2018. – №6. – S. 39–48.
- Kuz'min A. I., Turkin V. N., Tkachyov P. S. Sposob sohraneniya ustojchivosti rusla pri dobyche nerudnyh stroitel'nyh materialov // *Omskij nauchnyj vestnik.* – 2009. – №. 1 (84). – S. 85–86.
- Sitnov A. N., Shestova M. V., Voronina Yu. E. Prognoz ruslovoy deformacii i osobennosti razrabotki pojmyennyh kar'erov nerudnyh stroitel'nyh materialov v meandriruyushchih ruslah rek s uchetom bezopasnyh uslovij sudohodstva (na primere r. Belaya) // *Nauchnye problemy vodnogo transporta.* – 2020. – №. 65. – S. 179–188.
- Berkovich K. M., Zlotina L. V., Turykin L. A. Prirodno-antropogennyye deformacii rusla Oki v rajone Ryazani // *Geomorfologiya.* – 2009. – №. 2. – S. 26–32.
- Abedin Mohammad-Hosseinpour, José-Luis Molina, Ebrahim Jabbari, Interaction between gravel mining pits and river curvature on maximum scour depth through 2D hydraulic modelling, *Journal of Hydrology*, Volume 604, 2022, 127245, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127245>.
- Wujuan Zhai, Jiyong Ding, Xiaowei An, Zhuofu Wang, An optimization model of sand and gravel mining quantity considering healthy ecosystem in Yangtze River, China, *Journal of Cleaner Production*, Volume 242, 2020, 118385, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118385>.
- Raschetnye gidrologicheskie karakteristiki. Poryadok opredeleniya: TKP 45-3.04-168-2009 (02250). – Mn.: Strojtekhnorm, 2010. – 55 s.
- Volchek, A. A. Gidrologicheskie raschety: uchebnoe posobie / A. A. Volchek. – Moskva: KNORUS, 2021. – 418 s.
- Volchek, A. A. Paket prikladnyh programm dlya opredeleniya raschetnyh karakteristik rechnogo stoka // A. A. Volchek, S. I. Parfomuk / *Vestnik Paleskaga dzhyz'arzhaynaga universiteta. Seriya pryrodnaznych'nyh nauk.* – 2009. – №1. – S. 22–30.
- Volchek, A. A. Ocenka ekologicheskogo stoka reki Yasel'da v svore vodohranilishcha «Selec» / A. A. Volchek, N. N. Sheshko // *Sovremennyye problemy ochistki stochnyh vod i ohrany resursov poverhnostnyh vod v prigranich'e: materialy mezhdunar. iauch.-prakt. konf. (Brest, 24-25 sentyabrya 2015 goda) / gl. red. N.V. Mihal'chuk.* – Brest: Al'ternativa, 2015. – S. 12–22.
- Volchek, A. A. Ocenka vliyaniya rybhoza «Selec» na stok reki Yasel'da / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk, N. N. Sheshko, N. N. Shpendik, D. N. Dashkevich, S. V. Sidak, M. F. Kuharevich // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* – 2022. – № 1 (127): *Geoekologiya.* – S. 83–85.
- Mihnevich, E. I. Levkevich, V. E. Ustojchivost' beregov vodohranilishch pri formirovanii profilya dinamicheskogo ravnovesiya v nesvyaznyh gruntah // *Melioraciya.* – 2016. – №4(78) – S. 18–23.
- Mihnevich, E. I. Propusknaya sposobnost' rusel reguliruemyyh rek i vodootvodnyashchih kanalov / E. I. Mihnevich // *Prirodnaya sreda Poles'ya: osobennosti i perspektivy razvitiya: sb. nauch. tr. Vyp. 1: v 2 t. – T. 2. Vodnye resursy Poles'ya.* – Brest: Al'ternativa, 2008. – S. 38–41.
- Volchek, A. A. Inzhenernaya gidrologiya i regulirovanie stoka. Gidrologicheskie i vodohozyajstvennye raschety. Uchebnoe posobie / A. A. Volchek, An. A. Volchek, V. K. Kursakov. – Gorki: Belorusskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya, 2013. – 315 s.
- Kurushin A. A. Reshenie mul'tifizicheskikh SVCH zadach s pomoshch'yu SAPR COMSOL – M.: «One-Book», 2016. – 376 s.
- Oficial'nyj sayt ComsolMultiphysics. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.comsol.com/>, svobodnyj.
- Oshovskij, V.V. Ispol'zovanie komp'yuternyyh sistem konechno-elementnogo analiza dlya modelirovaniya gidrodinamicheskikh processov / Oshovskij V. V., Ohrimenko D. I., Sysoev A. Yu. // *Naukovi praci DonNTU. Cepiya: Himiya i himichnatekhnologiya*, 2010. – Vip. 15(163). – S. 163–173.
- Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 7 fevralya 2008 g. № 168 «Ob utverzhenii Polozheniya o poryadke opredeleniya razmera kompensacionnyh vyplat i ih osushchestvleniya».

Received 10.01.2023, revised 16.02.2023,
accepted 17.02.2023

THE CLIMATE CHANGE IMPACT ON THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE RIVERS IN BELARUS

A. A. Volchak¹, S. V. Sidak², S. I. Parfomuk³, N. N. Sheshko⁴

¹ Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Environmental Engineering Department, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: volchak@tut.by

² Assistant of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

³ Ph.D in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: parfom@mail.ru

⁴ Ph.D in Engineering, Associate Professor, Head of Research Department, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: optimum@tut.by

Abstract

The article evaluates the changes in the parameters of the annual runoff, the maximum spring flood runoff and the main runoff-forming factors for the period 1988–2018 in relation to the period 1949–1987. The observed over the past decades climatic changes significantly change the situation of the spatio-temporal variability of the maximum runoff. Changes in the annual runoff for most catchments of Belarus are statistically insignificant. The main climatic factors determining the spring flood runoff are precipitation during the winter and spring periods, and the air temperature of the winter period. Taking into account the multi model ensemble of four climate change scenarios, the forecast estimates of the annual and maximum runoff for the period up to 2035 are obtained.

Keywords: river flow rates, precipitation, air temperature, forecast estimates, climate warming, long-term variability.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК БЕЛАРУСИ

А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук, Н.Н. Шешко

Реферат

В статье выполнена оценка изменений характеристик годового стока, максимального стока весеннего половодья и основных стокоформирующих факторов за период 1988–2018 гг. по отношению к периоду 1949–1987 гг. Установлено, что отмечаемые за последние десятилетия климатические изменения существенно меняют картину пространственно-временной изменчивости максимального стока. Изменения же годового стока для большинства водосборов Беларуси носят статистически незначимый характер. Основными климатическими факторами, определяющими сток весеннего половодья, являются осадки за зимний и весенний периоды, температура воздуха зимнего периода. С учетом мультимодельного ансамбля из четырех сценариев изменения климата получены прогнозные оценки годового и максимального стока на период до 2035 г.

Ключевые слова: расходы речного стока, осадки, температура воздуха, прогнозные оценки, потепление климата, многолетняя изменчивость.

Introduction

Rational management of water resources in modern conditions is one of the priority tasks in the field of water resources not only in Belarus, but also throughout the world. Reliable provision of water to the population and sectors of the economy, early warning of natural hazards is a necessary condition for the sustainable development of society. In the process of developing a water resources management strategy, planning and implementing water management measures, solving problems of optimal regulation of river runoff, it is necessary, first of all, to have scientifically based assessments of the changes in hydrological characteristics occurring and expected in the future under the influence of continuous and increasing anthropogenic impact and changing climate. The complexity of solving these issues at the present stage of society's development is largely due to the peculiarities of socio-economic and climatic conditions of the last three decades. In the last 30 years, significant dynamics of climatic indicators has been observed in the territory of Belarus, as well as throughout the world, which causes a response in hydrological processes [1–3]. Since river runoff refers to climatically conditioned renewable water resources, a change in the regime of river runoff affects not only the possibility of its use as a source of water supply, but also the preservation (or violation) of the ecological balance of water bodies.

River runoff is a complex multifactorial process. The works [4, 5] provide a detailed analysis of the influence of each of them. Despite the large amount of factors forming the runoff, in the present conditions it is the climatic factor that comes to the fore. A lot of works have been devoted to the study of the regularities of the river runoff formation in Belarus, the variability of the runoff characteristics in the spatio-temporal aspect [6, 7]. However, these studies do not cover the last years of observations when global climate change occurred. The methods of probability theory and mathematical statistics used in earlier studies to assess the long-term variability of the runoff and the factors forming the runoff are mainly applicable to homogeneous data. The occurring abrupt, stepwise changes in the series of characteristics of the runoff make them heterogeneous, or non-stationary, and require other approaches to analysis. In conditions of non-stationary climate, anthropogenic load on catchments, uneven placement of hydrological stations, as well as their amount decrease, assessment of long-term varia-

bility of runoff, establishment of quantitative links between the characteristics of runoff and the totality of its determining factors, assessment of runoff changes in the future is undoubtedly one of the most pressing problems solved by modern scientific and applied hydrology.

The purpose of the study is to assess the current transformation of the annual runoff, the maximum spring flood runoff of the rivers in Belarus, as well as to obtain forecast estimates of their changes under probable climatic scenarios in the future.

To achieve these goals, we had to solve a number of tasks:

- Assessment of changes in the main runoff characteristics for the period 1949–1987 (base period) in relation to the period 1988–2018 (modern period);
- Analysis of changes in the main climatic factors of the annual and maximum runoff formation;
- Obtaining forecast estimates of changes in river runoff up to 2035.

Materials and methods

The study used the observation materials of the State Institution "Republican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring" of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus for the current hydrological stations for the period of instrumental observations published in the materials of state cadasters. To identify the spatial and temporal variability in river runoff, air temperature and precipitation, time series for the period from 1949 to 2018 were processed ($n = 70$ years). The observations of monthly and annual precipitation amounts, average monthly and average annual atmospheric air temperatures at 50 weather stations, average monthly river runoff rates at 84 hydrological stations evenly located across the territory of Belarus were used as initial hydro meteorological information. The reduction of series with short duration of observation periods for the selected hydro stations for the study was carried out using the computer software complex "Hydrologist-2" [8].

The methodology of the study was based on the systematization and analysis of long-term series of observations of the average annual and maximum spring flood runoff of the rivers in Belarus. The analysis of the long-term variability of the runoff characteristics of the studied rivers was

carried out differentially, since the hydrological regime of medium and especially small rivers is not identical to large rivers. Small rivers are particularly sensitive to the conditions of their formation and serve as an integral indicator of complex natural and anthropogenic processes occurring in their catchments. Conventionally, rivers are classified into the following groups:

- Rivers with a catchment area of more than 30,000 km²;
- Rivers with a catchment area from 10,000 km² to 30,000 km²;
- Rivers with a catchment area from 2,000 km² to 10,000 km²;
- Rivers with a catchment area of up to 2,000 km².

Due to the fact that climate is one of the main factors determining the total amount and intra-annual distribution of runoff, it is advisable to study the entire hydrological cycle in the river basin, including changes in time and space in the amount of precipitation and air temperature.

Results and discussion

Observed climate changes

During the period 1949-2018 the average temperature increase in Belarus was about 0.31 °C/10 years, whereas during the period from 1969 to 2018 it increased to 0.46 °C/10 years.

To identify the peculiarities of air temperature fluctuations in the basins of large rivers in Belarus, differential integral curves for 1949–2018 for 8 weather stations were constructed (Figure 1).

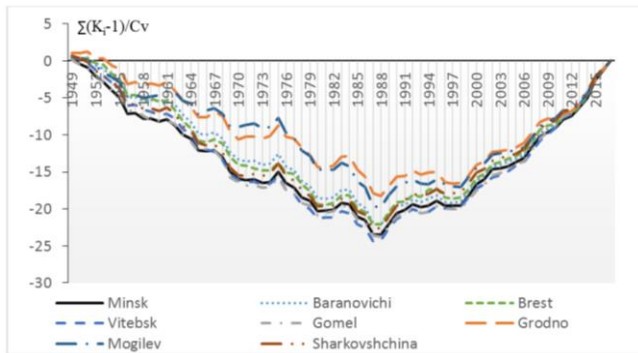


Figure 1 – Differential integral curves of average annual air temperatures at weather stations in Belarus

The ordinates of the differential integral curves are calculated as an increasing sum $\sum(K_i - 1)/c_v$, where $K_i = Q_i/\bar{Q}$ is the modular coefficient, Q_i is the average annual air temperature, i is the number of the calculated term of the sequence, \bar{Q} is the average annual value of air temperature, c_v is the coefficient of variation.

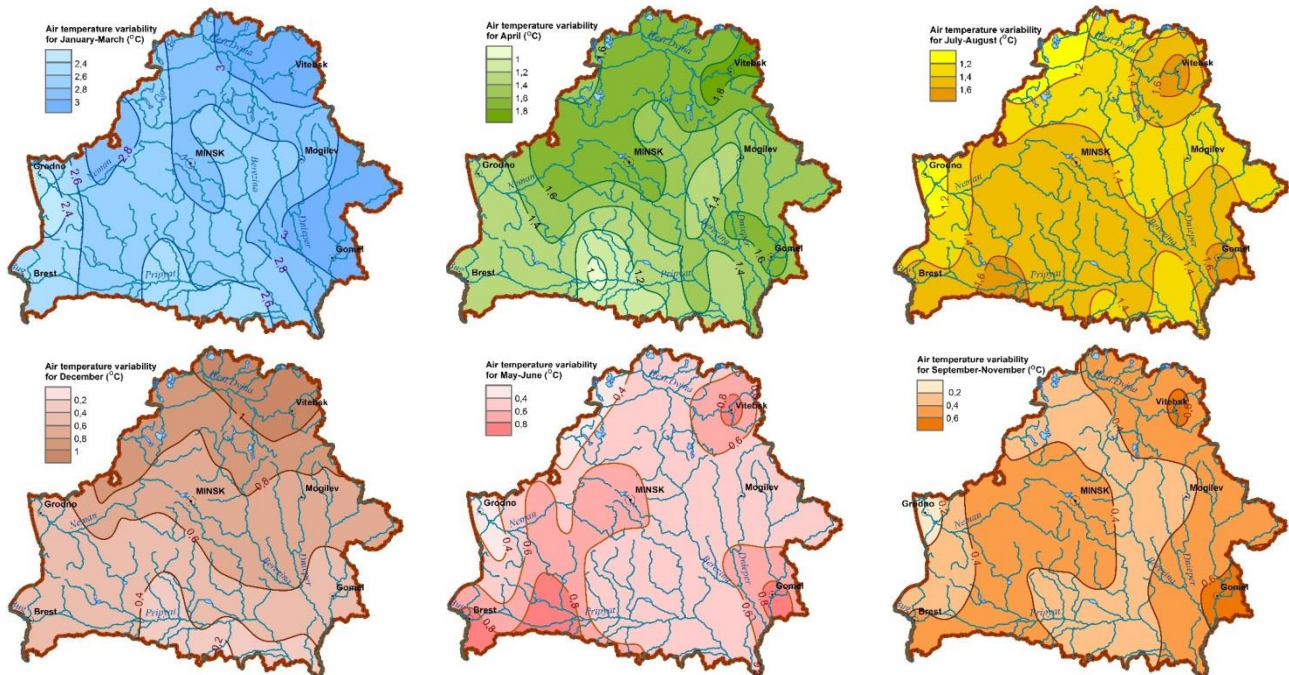


Figure 3 – Variability of air temperatures for the period 1988-2018 in relation to the period 1949-1987, °C

The constructed differential integral curves of the average annual atmospheric air temperature show that the calculated period of 1949-2018 includes periods of temperature decrease and increase, and since 1988 it has been in the positive phase of the upward trend. Figure 1 shows that 1988 corresponds to the beginning of an intensive increase in average annual air temperatures. To assess climate change in accordance with the recommendations of the World Meteorological Organization, the initial series was divided into two periods of 30 years or more: 1) from 1949 to 1987; 2) from 1988 to 2018.

Analysis of air temperature for the period 1988-2018 compared to the period 1949-1987 indicates its growth throughout the territory of Belarus. The increase in the average annual temperature on the territory of Belarus for the second study period was 1.31 °C.

Since the temperature change is uneven both within the year and in space, further study of atmospheric air temperatures was carried out according to the groups shown in Figure 2.

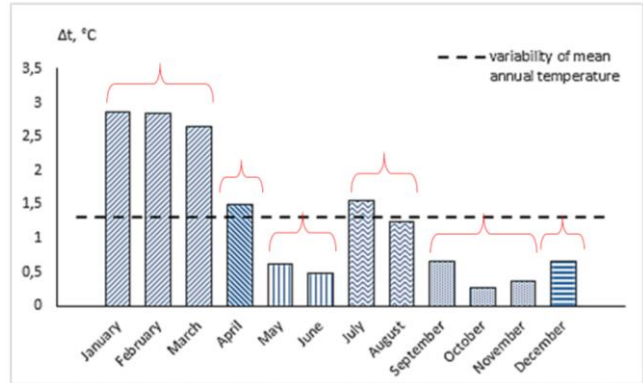


Figure 2 – The change in the average annual and average monthly air temperatures for the period 1988-2018 in relation to the period 1949-1987, °C

The results of spatial generalization of air temperature changes by selected groups are presented in the form of maps prepared in ArcGIS (Figure 3).

Unlike the change in air temperature, there was no significant change in the total amount of precipitation in the annual context (Figure 4). It is worth noting that the change in precipitation, as well as temperature, is characterized by ambiguity by basins and months. The greatest positive dynamics in precipitation changes (ΔP) is observed in February, March, and July. In October an increase in precipitation is observed in the basins of the Berezina, Dnieper, Western Dvina and Sozh rivers. A negative trend in precipitation changes is typical for April and August (except for the Western Dvina River basin).

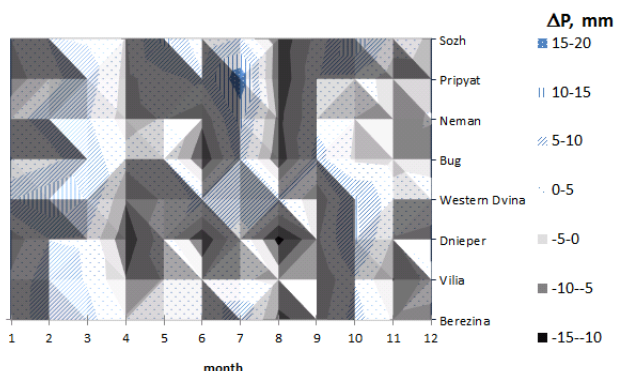


Figure 4 – The change in the amount of precipitation by month for the basins of the rivers in Belarus for the period 1988-2018 in relation to the period 1949-1987

Changes in annual and maximum runoff

Quantitative indicators of runoff variability for the two studied periods are shown in Table 1.

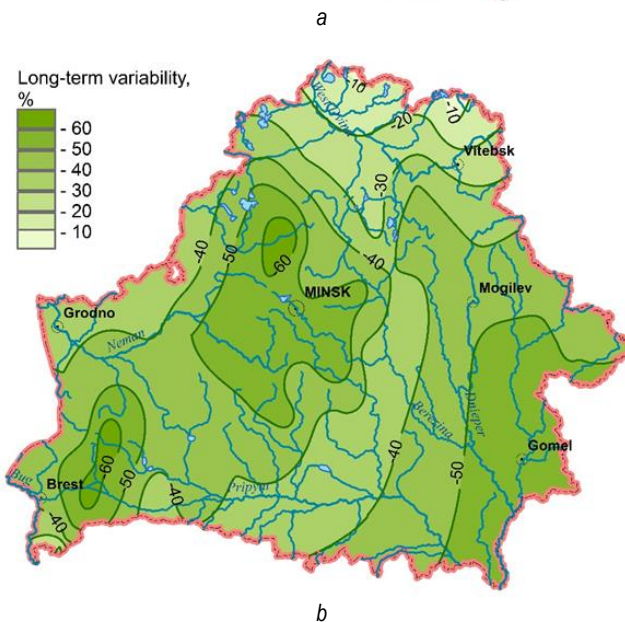
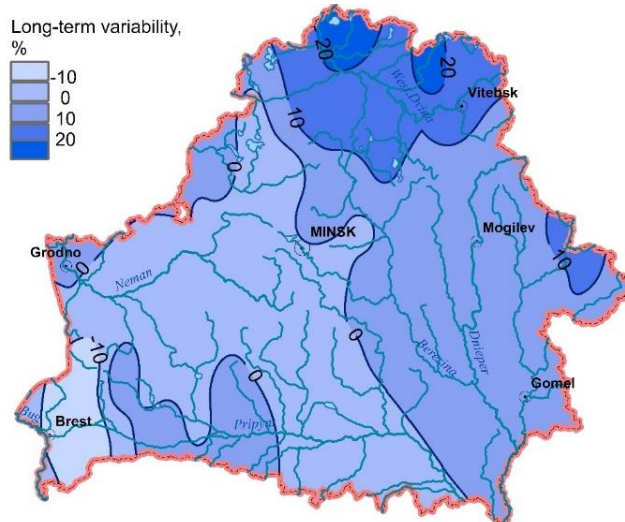
Table 1 – Variability of the studied types of river runoff in Belarus for the modern period in relation to the base period, %

River – Station	Catchment area, km ²	Annual	Maximum spring
<i>rivers with catchment area > 30 000 km²</i>			
Pripyat – Mozyr	101000	11	-33
Dnieper – Rechitsa	58200	6	-42
Western Dvina – Polotsk	41700	12	-19
Sozh – Gomel	38900	8	-49
Neman – Grodno	33600	4	-44
<i>rivers with catchment area > 10 000 km²</i>			
Berezina – Bobruisk	20300	-2	-53
Dnieper – Orsha	18000	12	-31
Sozh – Slavgorod	17700	13	-48
Neman – Belitsa	16700	-8	-53
Vilia – Michalishki	10300	-6	-57
<i>rivers with catchment area > 2 000 km²</i>			
Mukhavets – Brest	6590	-18	-64
Berezina – Borisov	5690	2	-42
Yaselda – Senin	5110	-4	-49
Disna – Sharkovshchina	4720	-2	-38
Neman – Stolbtsy	3070	-8	-59
<i>rivers with catchment area ≤ 2 000 km²</i>			
Vilia – Steshitsy	1230	4	-52
Tsna – Dyatlovichi	1100	1	-4
Yaselda – Bereza	1040	6	-67
Uza – Pribor	760	9	-55
Polota – Yankovo	618	15	-18

The analysis of the runoff changes at the studied gauging stations showed that the highest change in the average annual runoff occurred for large rivers (the average in Belarus is 6%), and the change in the maximum runoff is most pronounced for small and medium-sized rivers (a decrease in runoff by an average of 43%). For large rivers, the decrease in maximum runoff reaches 37%. The results of spatial generalization of changes in the average annual runoff and maximum spring flood runoff are presented in Figure 5. Analysis of the obtained maps allows us to conclude that an increase in annual runoff occurred for the basins of the Western Dvina and Dnieper rivers. The rest of Belarus is mainly characterized by a slight decrease in annual runoff.

The considered climatic changes have a direct impact on the water regime of the rivers in Belarus. To assess the relationship between the values of runoff, air temperatures and precipitation, correlation coefficients within the framework of correlation matrices between these values were determined. The analysis of the relationship closeness of river runoff with meteorological parameters showed that the main climatic factors determining the runoff of the spring flood are precipitation for winter and spring periods and air temperature for January–March and August. The

correlation coefficients of average annual expenditures with the total amount of precipitation for January–September are statistically significant for most runoff series and reach the highest values.

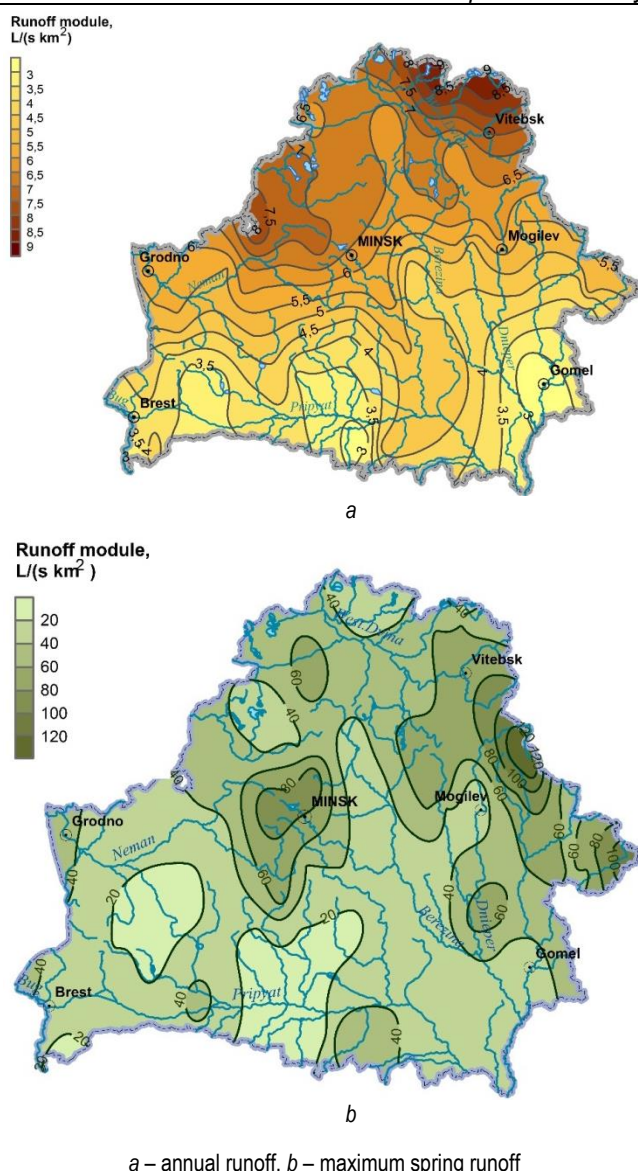


a – annual runoff, b – maximum spring runoff

Figure 5 – Change in runoff (%) for the period 1988-2018 in relation to the period 1949-1987:

Estimates of the possible river runoff changes in Belarus in the XXI century based on climate models

To obtain forecast estimates of changes in the river runoff in Belarus for the period up to 2035, the method of hydrological and climatic calculations proposed by V.S. Mezentsev, based on the joint solution of the equations of water and heat and energy balances, has been adapted [10]. The developed model is used to assess possible changes in river water resources depending on climatic fluctuations and anthropogenic impacts on watershed characteristics. Generalized forecast estimates of runoff changes were obtained taking into account a combination of scenarios A1B and B1 of climate change, as well as refinements using a multi model ensemble of four CMIP5 scenarios proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 2013 in the Fifth Report on Climate Change [11]. Maps of forecast estimates of the river runoff in Belarus for the period up to 2035 are shown in Figure 6.



a – annual runoff, b – maximum spring runoff

Figure 6 – Forecast estimates of changes in the river runoff in Belarus until 2035:

Conclusion

From the results of trends assessments in climate parameters it follows that over the period 1988-2018 an average increase of 1.3 °C in air temperature occurred in the territory of Belarus. At the same time, there was a significant unevenness in the intra-annual distribution of the air temperature increase with a maximum increase in winter (up to 3.2 °C in the basin of the Western Dvina River and up to 2.4 °C in the south-west of Belarus), with a minimum increase in autumn (up to 0.8 °C). In contrast to the change in air temperature, there was no significant change in the total amount of precipitation in the annual context.

As a result of the performed studies on the runoff dynamics, it was found that the maximum spring flood runoff of the rivers in Belarus for the period 1988-2018 decreased by an average of 41% compared to the runoff of the base period 1949-1987, and the average annual runoff increased by an average of 3.5%.

Based on the results of the forecast estimates, the following conclusions can be drawn about the river runoff changes in Belarus until 2035:

- The average value of the annual river runoff in Belarus will change from -10% (in the Pripyat River basin) to 10% (in the Western Dvina River basin);
- The average annual values of the maximum river runoff in Belarus are characterized by a decrease of up to 5% for the basins of the Dnieper and Pripyat Rivers, an increase of 5% in the basins of the Western Dvina and Neman Rivers.

The work was carried out within the framework of task 1.04 of the research project "Assessment of the hydrological and climatic regimes of the territory of Belarus in modern conditions" (subprogram "10.1 Natural resources and their rational use" of the State Research Investigation Program "Natural Resources and the Environment" for 2021-2025).

References

1. Loginov, V.F. Sovremennye izmeneniya klimata Belarusi / V.F. Loginov // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. – 2022. – T. 8, № 1. – S. 51–74.
2. Lysenko, S.A. Prostranstvenno-vremennyye izmeneniya nachal'noj fazy sovremennogo potepleniya klimata / S.A. Lysenko, V.F. Loginov // Dokl. Nac. akad. nauk Belarusi. – 2021. – T. 65, № 5. – S. 618–627.
3. Georgievskij, V. U. Ocenka vliyaniya vozmozhnykh izmenenij klimata na gidrologicheskij rezhim i vodnye resursy rek territorii byvshego SSSR / V.U. Georgievskij // Meteorologiya i gidrologiya. – 1996. – № 11. – S. 89–99.
4. Komlev, A. M. Zakonomernosti formirovaniya i metody raschetov rechnogo stoka / A.M. Komlev. – Perm': Izd-vo PGU, 2002. – 162 s.
5. Volchek, A. A. Zakonomernosti formirovaniya elementov vodnogo balansa rechnyh vodosborov Belarusi v sovremennykh usloviyah: avtoref. dis. dokt. geogr. nauk: 25.00.27 / A.A. Volchek; Institut geografii RAN. – M., 2006. – 38 s.
6. Volchek, A.A. Izmeneniya stoka rek Belarusi v usloviyah sovremenogo potepleniya / A. A.Volchek, O.P. Meshik // Aktual'nye nauchno-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy melioracii zemel': sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu meliorativnogo obrazovaniya v Gorkah, 14–15 marta 2019 g. / pod red. V. I. Zhelyazko. – Gorki : RPC «Pechatnik», 2019. – S. 14–18.
7. Bus'ko, E. G. Osobennosti transformacii stoka rek Belarusi / E. G. Bus'ko, A. A. Volchek // Aktual'nye problemy ekologii : sbornik nauchnykh statej po materialam XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Grodno, 4–6 okt. 2017 g. / Grodn. gos. un-t; red. kol. : V. N. Burd' (otv. red.), G.G. YUhnovich, I.M. Kolesnik, O.M. Tretyakova. – Grodno : YUrSaPrint, 2017. – S. 173–178.
8. Volchek, A. A. Avtomatizaciya gidrologicheskikh raschetov / A. A. Volchek // Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i ohrana okruzhayushchej sredy: Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. po problemam vodohozyajstvennogo, promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva i ekonomiko-social'nykh preobrazovanij v usloviyah rynochnykh otnoshenij / Brest. politekhn. institut. – Biberah– Brest–Nottingham, 1998. – S. 55–59.
9. Kuz'menko, Y. V. Ocenka i prognozirovanie stoka malyh rek v usloviyah antropogennykh vozdeystvij i izmenenij klimata / Y. V. Kuz'menko, F. N. Liseckij, V.I. Pichura // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2012. – Vypusk № 6. – S. 1–9.
10. Mezencev, V. S. Gidrologo-klimaticheskaya gipoteza i primery ee ispol'zovaniya/ V.S. Mezencev // Vodnye resursy, 1995. – Tom 22, №3. – S. 299 – 301.
11. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetom izmeneniya klimata / A. A. Volchek, V. N. Korneev, S. I. Parfomuk, I. A. Bulak // pod obshch. red. A.A. Volchek, V. N. Korneev. — Brest: Izdatel'stvo «Al'ternativa», 2017. – 225 s.

Received 08.01.2023, revised 31.0.2023, accepted 17.02.202

OPTIMAL STRATEGY FOR WATER PROTECTION ACTIVITY IN REGIONS

A. A. Volchak¹, P. V. Shvedovsky², L. V. Obrazcov³, L. G. Sryvkina⁴, A. I. Kisel⁵

¹ Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Environmental Engineering Department, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: volchak@tut.by

² Ph.D in Engineering, Professor, Professor of the Department of Geotechnics and Transport Communications, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: ofig@bstu.by

³ Ph.D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics of Construction and Organization of Building Works, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: leonwladobr1@gmail.com

⁴ Senior Lecturer of the Department of Economics of Construction and Organization of Building Works, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: lgsryvkina@mail.ru

⁵ Ph.D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of World Economy, Marketing, Investments, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: eleniva2006@mail.ru

Abstract

The methodology for constructing mathematical models to select the optimal strategy for water protection activity in the regions and for water consumers is considered. At the same time, the water environment is considered as a whole with all technical, environmental, economic and other problems associated with it.

Particular attention is paid to linking and optimizing investments in water protection measures with maximizing the growth rates of the regional economy in the conditions of a given dynamics of water pollution at the planned growth rates of the economy.

An analysis of mathematical models of the optimal strategy for water protection activities at the level of water consumer warnings is also given.

Keywords: modeling, strategy, region, water environment, water management activities, river basin, water consumers.

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ВОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕГИОНАХ

А. А. Волчек, П. В. Шведовский, Л. В. Образцов, Л. Г. Срывкина, Е. И. Кисель

Реферат

Рассмотрена методология построения математических моделей по выбору оптимальной стратегии водоохранной деятельности в регионах и для водопотребителей. При этом водная среда рассматривается как единое целое со всеми техническими, экологическими, экономическими и другими, связанными с ней, проблемами.

Особое внимание уделено увязке и оптимизации инвестиций на водоохранные мероприятия с максимизацией темпов роста экономики регионов при заданной динамике загрязнений водной среды при планируемых темпах роста экономики.

Приведен также анализ математических моделей оптимальной стратегии водоохранной деятельности и на уровне предупреждений – водопотребителей.

Ключевые слова: моделирование, стратегия, регион, водная среда, водохозяйственная деятельность, речной бассейн, водопотребители.

Introduction

Today, the problem of optimal water use has become more urgent than ever before.

The new economic policy and modern requirements for the greening of industries and technologies require not so much the preservation of water resources in a state close to the current one, but the restoration of their natural potential.

Current changes in the rate of most natural and man-made processes have led to a violation of biological, geochemical, genetic, resource-rare material and many other types of natural equilibrium and to uncertainty of the state of the water environment, strategy and tactics of interaction between the population, production, economy and nature [1, 2, 3].

The exponentially increasing scale of the anthropogenic impact on the water environment, its negative consequences and the need to optimize this impact require an active search for ways to solve these problems.

Substantiation of the structure of water protection activity models

The models of economic development of water regions that are common today usually a priori assume unlimited natural resources or do not take into account possible losses associated with violation of natural processes in the natural environment and the cost of preventing these violations through a set of water protection measures.

To understand the limits of the models being developed, it should be noted that the inclusion of economic characteristics in them affects the quality of information support, since such indicators within the objective functions and constraints of most optimization problems turn out to be deliberately the most inaccurate and uncertain information, even against the background of insufficiency or inadequacy of other data.

The uniqueness of water systems practically eliminates the possibility of an active experiment; therefore, the construction and use of appropriate mathematical models becomes important for predicting and assessing the state of water resources.

Depending on the spatial and temporal scales of anthropogenic impacts, models can be local, regional or global.

The basic version of the model structure for the selection of water protection strategies in the river basin (region) is shown in Fig. 1 [4].

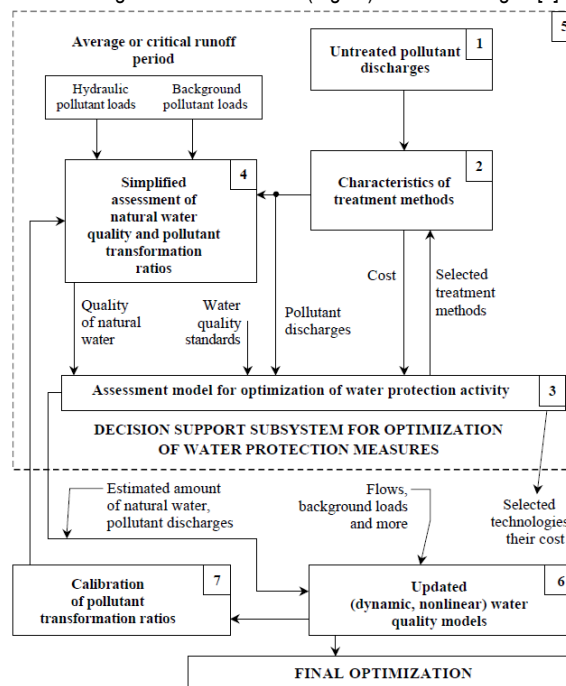


Figure 1 – Basic version of the structure of water protection models

Block 1 combines information on the composition, volumes and modes of pollutant discharges. Possible measures for treatment of these discharges are systematized in block 2. At the same time, for each method of wastewater treatment in the context of the considered pollutants or their groups, production functions are preliminarily compiled that characterize the relationship between the costs of carrying out the appropriate water protection measures and the degree of treatment.

The assessment of the quality of natural water should be based on aggregated equations for the transfer and transformation of pollutants and their transformation ratios, taking into account the total runoff of pollutants and the average anthropogenic load over a critical (usually low-water) period of time. The estimated transformation ratios of pollutants in the river sections are also generated and the quality of natural water is assessed (block 4). Then, knowing the quality of natural water in the sections of the calculated areas, we can compare it with the requirements of the relevant standards using the assessment model for optimization of water protection activity (block 3), which allows us to select the recommended treatment technologies, permissible volumes of pollutant discharges and the required costs for the implementation of measures.

The set of mathematical models presented in blocks 1 - 4 (block 5) forms a system for substantiating decisions on the optimization of water protection activities. The search for optimal solutions at this stage is reduced to the choice of a set of measures that ensure the specified water quality at minimal cost.

However, such decisions can't always be taken as final, since they are obtained on the basis of approximate and incomplete information. Therefore, it is advisable to refine these solutions using models (block 6) that take into account the nonlinearity of dependencies characterizing water quality, dynamic relationships between many parameters, etc. As a rule, it is necessary to operate with time series of river runoff and discharges of pollutants, and the forecast of water quality comes to these models from the results of calculations according to the estimation model of optimization. These models also make it possible to refine the transformation ratios of different substances by sections of the river (block 7). If there are significant discrepancies between them and the estimated values of the coefficients obtained by implementing the simplified models of blocks 4 and 5, it is advisable to return to the assessment model with refined natural water quality indicators, that is, an iterative process of applying assessment models and more detailed models arises.

Decision-making at the water user level can be represented by models in which, under various restrictions in the conditions of the economic mechanism of pollution charges, the objective function is optimized, which includes not only the costs of these measures, but also changing water pollution charges.

Choosing the optimal strategy

When choosing the optimal strategy for water protection activities both in the region and for individual water use, in the retrospective period, the determining factor is the relationship and interdependence of environmental and economic indicators and criteria [5, 6, 7].

There are a number of studies that propose approaches to assess the ecological state of the water environment depending on the factors determining the economic development of the regions and their environmental policy [8, 9].

The most common approach is based on pollution functions, which allow us to analyze various options for the distribution of investment, assess the impact of changes in the structure of the economy and take into account the impact of environmental policy by considering the dynamics of investments and costs associated with the protection of the water environment.

$$E(t) = A(t) \cdot X_1^\mu(t) \cdot X_2^{-\eta}(t), \quad (1)$$

$$E(t) = A(t) \cdot X_1^\mu(t) \cdot X_2^{-\eta}(t) \cdot X_3^\nu(t), \quad (2)$$

where $E(t)$ is the environmental indicator under study (pollutant emissions, pollutant concentration, polluted wastewater discharge, waste generation and other indicators); $X_1(t)$ is a factor that reflects the development of the economy and, as a rule, negatively affects the water environment (investment in manufacturing sector, investment in building construction and other factors); $X_2(t)$ is a factor that reflects water protection activities and has a positive impact on the environment (investment in environmental protection, current costs for environmental protection and

other factors); $X_3(t)$ is a factor that reflects the development of the economy and can affect both positively and negatively on the environment, depending on the environmental and economic policy being implemented (investment in modernization of the economy, in machinery and equipment, the index of structural changes in the economy and other factors); $A(t)$ is neutral environmental progress (decrease in the level of pollution due to other factors, primarily structural changes); μ, η, ν are constant parameters (factor elasticities); t is time.

Since these functions use investment indicators, the main goal is to find the optimal distribution of investment under restrictions on the total level.

At the same time, the optimal distribution of investment should be linked to the maximization of the economic growth rate at a given dynamics of pollution or, conversely, to the minimization of pollution at a given growth rate of the economy [10, 11, 12].

Optimization models of two types can be considered for three-factor environmental investment functions (Z_3) and two-factor pollution functions (Z_3). In the first case, when investment is divided into three components (new buildings construction, modernization of the economy, water environment protection), the problem of optimal distribution of investment in three areas arises. The optimal solution minimizes pollution while ensuring a certain volume of production $Y_0(t)$.

$$E(t) = F(X_1(t), X_2(t), X_3(t), t) \rightarrow \min, \quad (3)$$

subject to

$$Y(t) = G(X_1(t), X_3(t)) \geq Y_0(t),$$

$$U(t) = X_1(t) + X_2(t) + X_3(t),$$

$$X_1(t) \geq 0, X_2(t) \geq 0, X_3(t) \geq 0, \varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0,$$

where $Y(t)$ is a constraint on production volume growth; $U(t)$ is a constraint on the level of investment; G is a function of economic growth depending on the level of investment in the relevant areas.

It should be noted that the directions of investment distribution under study have different effectiveness in terms of minimizing pollution. Investments in new buildings tends to increase pollution. Modernization most often slightly reduces the level of pollution. Water protection activities are most effective and always lead to a reduction in pollution.

In the absence of a constraint on the growth of production volume or its rate, all resources are directed to the most effective area in terms of the criterion that has the maximum modulo negative value of the parameter obtained by formula (water protection activities or modernization). If there is a constraint on the growth of production or its rate, depending on the volume of construction of new buildings and modernization, then the solution is based on the following procedure.

The first case is the impact of modernization on pollution is negative (parameter ν is negative). Then the maximum investment is made in modernization, and if the desired economic growth rate is achieved, then the rest of the investments are directed to the protection of the water environment or the construction of new buildings, depending on the value of the corresponding parameter. If the given rate cannot be achieved by investing only in modernization, then the ratio of investment in the construction of new buildings and modernization is determined to ensure its achievement.

The second case - modernization leads to an increase in pollution (the parameter ν is positive). If, with maximum investment in modernization, the given economic growth rate is achievable, then the remaining resources should be directed to the protection of the water environment and nature as a whole. If the given growth rate of the economy is not achievable, then the ratio of investment in the construction of new buildings and the modernization of the economy is determined, ensuring the achievement of the desired growth rate.

For a two-factor function, the optimal distribution minimizes pollution:

$$E(t) = \sum_i E_i(t) = \sum_i F_i(X_{1,i}(t), X_{2,i}(t), t) \rightarrow \min, \quad (4)$$

subject to

$$X_1(t) = \sum_i X_{1,i}(t), X_2(t) = \sum_i X_{2,i}(t),$$

$$X_{1,i}(t) \geq 0, X_{2,i}(t) \geq 0, X_{1,i}(t) \geq 0, \varepsilon_{1,i} > 0, \varepsilon_{2,i} \leq 0, i = \overline{1, N},$$

where i is a sector, N is the number of sectors.

This model can be built for two-factor and three-factor functions. It is also possible to find an optimal solution in general and under certain constraints [13].

If the region's economy reaches a high enough level, its development can be described by the Kuznets environmental curve, when the volume of pollution decreases with the growth of investment. If both factor elasticities are negative, then constructing Lagrangian on the basis of (1) will result in optimal resource allocation conditions:

$$\frac{\varepsilon_{1i} E_i(t)}{X_{1i}} = \frac{\varepsilon_{1j} E_j(t)}{X_{1j}}, \quad \overline{i, j = 1, N}, \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon_{2i} \cdot E_i(t)}{X_{2i}} = \frac{\varepsilon_{2j} \cdot E_j(t)}{X_{2j}}, \quad \overline{i, j = 1, N},$$

where i, j are sectors, N is the number of sectors according to the degree and nature of water environment pollution.

By substituting in (5) multiplicative functions (1) and balance equations from (4), we can obtain a system of two nonlinear equations with two variables, which can be easily solved by standard methods. If we accept that the sum of the factor elasticities of the sectors is the same (it is possible to introduce such a constraint when calculating the functions), the system is converted into an equation with respect to the ratio of the two factors. As a result, optimal resource allocation is achieved by sequential solving of nonlinear equations. For other types of functions, as well as for more complex criteria, a system of nonlinear equations is obtained [14, 15, 16].

For functions (5), cumulative investments or production volumes are considered, which complicates the transfer of resources (investments spent a few years ago are not transferable). Therefore, we can go to increment functions.

An optimal solution can be found in the general case, when investments can be distributed both by directions and by sectors:

$$E(t) = \sum_i E_i(t) = \sum_i F_i(X_{1,i}(t), X_{2,i}(t), X_{3,i}(t)) \rightarrow \min, \quad (6)$$

subject to

$$X_1(t) = \sum_i X_{1,i}(t), \quad X_2(t) = \sum_i X_{2,i}(t), \quad X_3(t) = \sum_i X_{3,i}(t),$$

$$Y(t) = G(X_1(t), X_3(t)) \geq Y_0(t),$$

$$X_{1,i}(t) \geq 0, X_{2,i}(t) \geq 0, X_{3,i}(t) \geq 0, \varepsilon_{1,i} > 0, \varepsilon_{2,i} \leq 0, \quad i = \overline{1, N}.$$

No less significant is the problem of finding ways to reduce pollutant discharges by water consumers. Therefore, the water protection strategy should be formulated in the form of an optimization problem with a criterion for minimizing total costs, subject to the achievement of a set of required standards for the quality of water resources and taking into account restrictions on the concentration and mass of pollutant discharges. The system of equations has the form [15, 17]:

$$S = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (S_{it} \cdot x_{it}) \rightarrow \min; \quad (7)$$

subject to

$$C_{jr} = C_{jr}^0 + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (m_{ijt} \cdot \theta_{ir} \cdot x_{it}) \leq \bar{C}_{jr}, \quad j \in J, \quad r \in R, \quad (8)$$

$$M_{jr} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (m_{ijt} \cdot x_{it}) \leq \bar{M}_{jr}, \quad M_j = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (m_{ijt} \cdot x_{it}) \leq \bar{M}_j, \quad j \in J, \quad r \in R, \quad (9)$$

where \bar{M}_j, M_j are, respectively, the total masses of pollutant discharges within individual sectors and within the entire basin; \bar{C}_{jr} is the maximum allowable concentration of the i -th component; m_{ijt} is the mass of the minimum possible discharge corresponding to the treatment technology with the maximum cost S_{it} .

It should be noted that, in general, there are no special guarantees for improving the efficiency of water protection activities only through the use of economic mechanisms. Moreover, these mechanisms do not exclude the traditional planning of a strategy for improving the quality of natural waters. Economic mechanisms can be only one of the important components, allowing to increase the profitability of water protection measures.

The simplest way to reflect economic mechanisms in mathematical models is the introduction of penalty payments into the objective function. Then the problem of optimization of water protection activities is formulated as:

$$\hat{S} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (S_{it} \cdot x_{it}) + \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (\Delta c_{jr} \cdot p_{jr}) \rightarrow \min, \quad (10)$$

subject to

$$c_{jr} = c_{jr}^0 + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_i} (m_{ijt} \cdot \theta_{ir} \cdot x_{it}), \Delta c_{jr} = \max(0; c_{jr} - \bar{C}_j), \quad (11)$$

$$j \in J, \quad r \in R; \quad c_{jr} = \Delta c_{jr} \leq \bar{C}_j,$$

where Δc_{jr} is a possible violation of the maximum allowable concentration (value \bar{C}_j) for the j -th pollutant in the r section.

Conclusion

The intensification of economic activity and the corresponding technological complication of the schemes of operation of water management facilities and systems have now reached such a level, that the deterministic description of the causal relationship of all processes proved to be inconsistent. There is always an element of randomness that often leads to undesirable, including catastrophic situations.

Analysis of the presented models shows that the basic version of the internal structure of the mathematical model system for choosing the optimal water protection strategy in the river basin should generally include:

- models of water management mechanisms;
- objective functions of the parties involved in the process;
- production functions of various types of water protection activities, taking into account the relationship of treatment costs with the degree of purification of pollutants.

References

1. Volchak, A. A. Assessment and forecast of the environmental impact of nature management and environmental management / A. A. Volchak, P. V. Shvedovsky. – Ryazan : RSTU, 2015. – 117 p.
2. Kudinov, G. A. Innovative approaches to ensuring sustainable development of economic and environmental systems in the region / G. A. Kudinov // Proceedings of the Institute of Ecology. – Togliatti, 2011. – P. 267-269.
3. Kalinin, M. Y. Emergencies and their consequences: monitoring, assessment, forecast and warning / M. Y. Kalinin, A. A. Volchak, P. V. Shvedovsky. – Minsk : Belsens, 2010. – 275 p.
4. Pryazhinskaya, V. G. Water protection planning concept / V. G. Pryazhinskaya, L. K. Levit-Gurevich // Justification of Water Management Strategy. – Moscow : Nauchnyj mir, 2006. - P. 206-217.
5. Burlibaev, M. Z. Problems of optimizing nature management and environmental management in mathematical models and methods / M. Z. Burlibaev, A. A. Volchak, P. V. Shvedovsky. – Almaty : Kaganat, 2003. – 532 p.
6. Volchak, A. A. To the problems of modeling the dynamics of development and localization of environmental consequences / A. A. Volchak, P. V. Shvedovsky // Vestnik of BrSTU. – 2002. – № 2(14). - P. 45-46.
7. Volchak, A. A. Mathematical models in nature management / A. A. Volchak, P. V. Shvedovsky, L. V. Obratsov. – Minsk : BSU, 2002. – 281 p.
8. Krotov, V. F. Methods and problems of optimal control / V. F. Krotov, V. I. Gurman. - Moscow: Nauka, 1973. – 309 p.
9. Levit-Gurevich, L. K. Main provisions of prospective planning and decision-making systems / L. K. Levit-Gurevich // Justification of the Water Management Strategy. - Moscow: Nauchnyj mir, 2006. - P. 66-77.
10. Ivanchuk, A. V. Actual issues of economic assessment of damage due to pollution of water bodies / A. V. Ivanchuk // Bulletin of Saratov State Socio-Economic Institute. - 2010. - № 5(34). - P. 76-79.
11. Gurman, V. I. Modeling processes in natural and economic systems / V. I. Gurman, - Novosibirsk : Nauka, 1982. – 175 p.
12. Methodology for Determining the Economic Effectiveness of Environmental Protection Measures and Assessing the Economic Damage Caused to the National Economy by Environmental Pollution, 1986.
13. Ivchenko, B. P. Theoretical and information methods of analysis and statistical interpretation of environmental monitoring results / B. P. Ivchenko, L. A. Martyschenko // Collection of reports of the international scientific and technical conference «Ecology and Development of Northwest Russia». - Saint Petersburg, 1998. - P. 39-47.
14. Pryazhinskaya, V. G. Modern methods of managing the quality of river waters of urbanized territories / V. G. Pryazhinskaya // Water Resources. - 1996. – Vol. 23, № 2. - P. 168-176.
15. Pryazhinskaya, V. G. Computer modeling in water management / V. G. Pryazhinskaya, D. M. Yaroshevsky, L. K. Levit-Gurevich. – Moscow : Fizmatlit, 2002. – 493 p.
16. Raiffa, H. Decision Analysis. Introduction to the problem of choice under uncertainty / H. Raiffa. – Moscow : Nauka, 1970. – 402 p.
17. Savichev, O. G. Water Resources Management / O. G. Savichev, O. G. Tokarenko. – Tomsk : Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2014. – 126 p.

Received 10.01.2023, revised 16.02.2023,
accepted 17.02.2023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ В ЛЕКЦИЯХ «ПРЕДЕЛ ЧИСЛОВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ФУНКЦИИ»

Е. Н. Защук¹, А. И. Жук², Л. П. Махнист³

¹ К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры высшей математики

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: shvichkina@tut.by

² К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры высшей математики

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: aizhuk85@mail.ru

³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: lpmakhnist@g.bstu.by

Реферат

Темы, связанные с вычислением пределов числовых последовательностей и функций, студенты в техническом вузе начинают изучать в рамках дисциплин «Математический анализ», «Высшая математика» или «Математика».

Учащиеся сталкиваются, например, с такими трудностями, как объединить свои неформальные представления об ограничениях, чтобы охватить сложность формального определения предела функции и последовательности.

В данной работе авторы, используя методы компьютерной алгебры, предлагают различные способы визуализации пределов, вычислительные примеры, чтобы помочь учащимся понять важные аспекты формального определения предела числовой последовательности и функции.

Ключевые слова: предел, числовая последовательность, функция, системы компьютерной алгебры, визуализация вычислений.

THE USE OF COMPUTER ALGEBRA METHODS IN THE LECTURES "THE LIMIT OF NUMERICAL SEQUENCE AND FUNCTION"

E. N. Zashchuk, A. I. Zhuk, L. P. Makhnist

Abstract

At technical university the topics related to the calculation of the numerical sequences limits and the function limits are got started to study within the disciplines "Mathematical Analysis" or "Mathematics". Students often have difficulties with understanding formally definition of the function limit and the sequence limit. Although, they can have their informal ideas about constraints.

In this article, the authors suggest various ways of visualizing limits as well as computational examples using the computer algebra methods. That might help students to understand important aspects of the formal definition of the limit of a numerical sequence and function.

Keywords: limit, numerical sequence, function, computer algebra systems, visualization of calculations.

Введение

Целью преподавания дисциплины «Математика» в технических вузах является формирование у студентов математической компетенции, необходимой при изучении фундаментальных и специальных инженерно-технических дисциплин. Наиболее известными из традиционных методов обучения являются проведение лекционных, практических и лабораторных занятий. При этом наглядность представления материала на лекциях – одно из необходимых требований для его корректного понимания. Применение в данном случае интерактивной компьютерной графики позволяет обеспечить максимальную наглядность, так как удается взглянуть на проблему с разных сторон.

На сегодняшний день среди систем компьютерной алгебры лидирует Mathematica, которая является постоянно совершенствующейся системой. SKA Mathematica позволяет превратить весь материал, подготовленный для лекции: пояснения, уравнения, примеры, иллюстрации и демонстрации, в динамическую презентацию, которую можно оперативно изменять [1, 2, 3, 4].

Так в работах [5, 6] авторами были рассмотрены методы визуализации тел вращения, построение которых требуется, например, при вычислении объемов, площадей поверхностей. В работе [7] представлена динамическая визуализация трехмерных декартовых, сферических и цилиндрических координат. В работах [8, 9, 10] представлены темы «Ряды Фурье» и «Знакопеременные ряды».

Для более осознанного понимания математических терминов, изучаемых в рамках дисциплин «Математический анализ» или «Математика», предлагается использование программных модулей, которые находятся в свободном доступе на официальном сайте Wolfram Demonstration Projekt [11, 12]. Для использования на лекции модулей не обязательно наличие программного продукта SKA Mathematica на компьютере, достаточно лишь доступа в Интернет, что позволяет использовать их онлайн. Также можно осуществить их

демонстрацию в свободной для скачивания программе Wolfram CDF Player. Однако это очень сильно ограничивает возможности лекторов.

В перечисленных работах [1 – 11] и в данной статье использование SKA Mathematica позволяет авторам доработать и усовершенствовать программные модули с учетом требований программы вуза.

Визуализация пределов числовых последовательностей

На лекциях дисциплин «Математический анализ», «Высшая математика» или «Математика» для студентов технических специальностей по теме «Предел числовой последовательности» даются определения числовых последовательностей, монотонных последовательностей и предела последовательностей. Так, например, определение предела числовой последовательности следующее [13]: число $a \in \mathbb{R}$ называется пределом последовательности $\{a_n\}$, если для $\forall \varepsilon > 0 \ n_\varepsilon \in \mathbb{N}: \forall n > n_\varepsilon \ |a_n - a| < \varepsilon$.

При этом пишут

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a.$$

В качестве демонстрации сформулированного определения, на лекции удобно провести вычисления конкретных числовых последовательностей. Так, используется программный модуль в SKA Mathematica, в котором рассматриваются следующие последовательности:

$$a_{n1} = 3;$$

$$a_{n2} = 3 - 3e^{-0.05n};$$

$$a_{n3} = 3 + 3e^{-0.05n};$$

$$a_{n4} = 3 + \frac{6}{n} \sin n;$$

$$a_{n5} = 3 + 2,1 \sin \frac{n}{4}.$$

Каждая из последовательностей, за исключением периодической a_{n5} , сходится к 3. На рисунке 1 приведен скриншот программного модуля, в котором можно вычислить 90 членов перечисленных числовых последовательностей. Первый ползунок позволяет отобразить n -й член последовательности. Перемещая ползунок параметра ϵ можно изменять границы ϵ -окрестности в определении предела. На рисунке 1 отображены вычисления для возрастающей последовательности a_{n2} , где член последовательности a_{62} отображается зеленой точкой, и для значения $\epsilon = 0,56$ попадает в ϵ -окрестность точки 3. Также на рисунке 1 ниже показано, каким образом члены последовательности a_{n2} «сгущаются» к предельному значению 3. Также, данная демонстрация отображает важный аспект определения предела последовательности, а именно, что, начиная с номера n_ϵ , члены последовательности a_{n2} попадают в ϵ -окрестность точки 3. Перемещая первый ползунок, определяющий значение параметра n , мы можем определить, что, например, для $\epsilon = 0,56$ значение $n_\epsilon = 33$.

Данный программный модуль, также позволяет осуществить визуализацию расходящейся последовательности a_{n5} . Так, на рисунке 2 приведен скриншот членов последовательности a_{n5} для значений $n = 40$ и $\epsilon = 0,74$. Легко убедиться, что члены последовательности с увеличением n не приближаются ни к какой ϵ -окрестности точки 3.

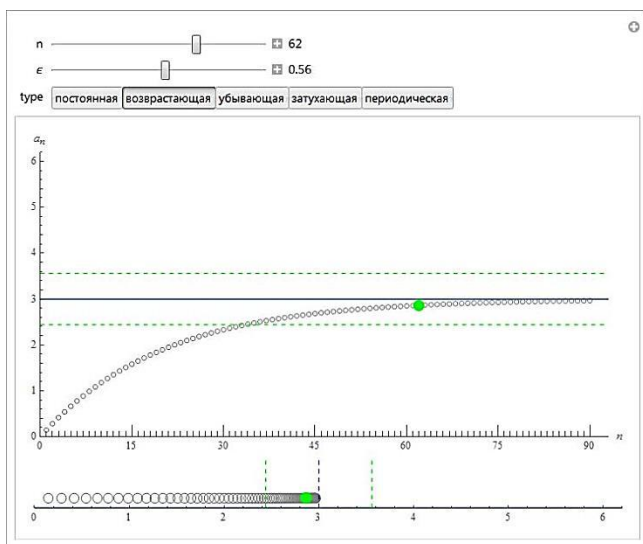


Рисунок 1 – Скриншот программного модуля вычисления значений последовательности a_{n2}

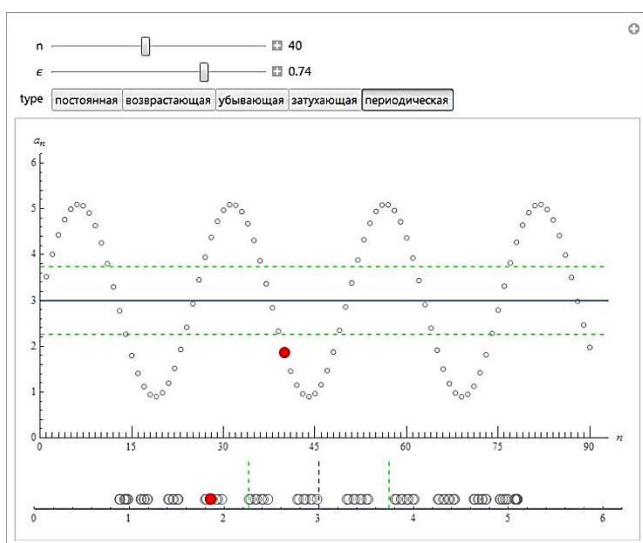


Рисунок 2 – Скриншот программного модуля вычисления значений последовательности a_{n5}

При изучении второго замечательного предела [10] можно рассмотреть вопрос о скорости сходимости различных последовательностей к числу e . Рассмотрим демонстрацию, иллюстрирующую сходимость трех последовательностей к числу e :

$$a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n;$$

$$b_n = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{-n};$$

$$c_k = 1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \dots + \frac{1}{k!}.$$

Первые две последовательности a_n и b_n сходятся гораздо медленнее, чем третья c_k . Так на рисунке 2 приведен скриншот программного модуля, когда $\epsilon = 0,15$. Для значения $n = 32$ члены последовательностей a_n и b_n находятся еще достаточно далеко от предельного значения e . В то время как третья последовательность c_k уже при $k = 7$ принимает значения, почти равные e . Перемещая третий ползунок, легко убедиться, что уже c_3 находится в заданной ϵ -окрестности точки e . В то время как a_n и b_n только при $n = 9$ попадают в ϵ -окрестность точки e .

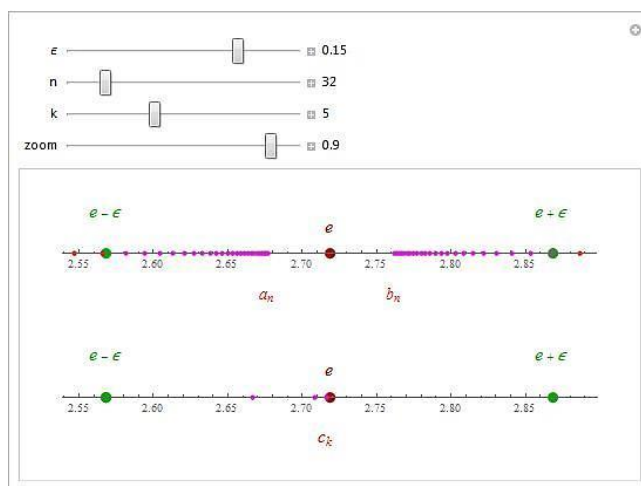


Рисунок 3 – Скриншот программного модуля вычисления скорости сходимости последовательностей a_n, b_n и c_k

Визуализация пределов функций

Описанный подход изучения пределов последовательности так-же актуален и для темы «Предел функции».

Рассмотрим следующий метод для визуализации определения предела функции в точке x_0 на «языке $\epsilon - \delta$ » [13]. Число A называется пределом функции в точке x_0 (или при $x \rightarrow x_0$), если для любого положительного числа ϵ найдется такое положительное число δ , что для всех $x \neq x_0$, удовлетворяющих неравенству $|x - x_0| < \delta$, выполняется неравенство $|f(x) - A| < \epsilon$.

Сформулированное определение продемонстрируем на примере функции

$$f(x) = 3\sqrt[3]{x-1} - 2.$$

На рисунке 4 приведен скриншот, который показывает пример, когда при нахождении предела функции $f(x)$ в точке $x_0 = 5$, мы можем выбрать любые значения ϵ (ползунок слева) из отрезка $[0, 2]$, для которого определяются конкретные значения δ . Так, для значения $\epsilon = 0,86$ определяются значения $\delta_1 = 1,79927$ и $\delta_2 = 2,58197$. Также, перетаскивая курсором точку на графике функции, меняем значение x_0 и получаем в динамике изменение значений δ_1 и δ_2 .

Расположение ползунков подчеркивает важность формулировки определения.

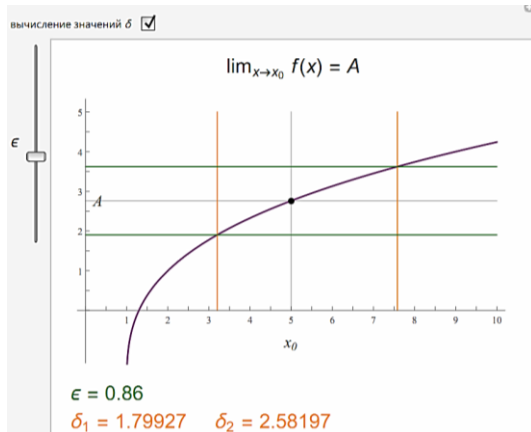


Рисунок 4 – Скриншот программного модуля для определения значений δ для заданных значений ϵ

На рисунке 4 показан пример демонстрации, когда границы δ -окрестности точки x_0 не являются симметричными. Эта демонстрация вычисляет наибольшие значения δ_1 и δ_2 для заданного ϵ , так что $f(x)$ лежит между $A - \epsilon$ и $A + \epsilon$. Значения δ_1 и δ_2 определяются автоматически. Рассмотрим обратную функцию к функции $f(x)$:

$$g(y) = \frac{1}{27}(35 + 12y + 6y^2 + y^3).$$

Далее в программном модуле положим, что

$$\delta_i = \text{Abs}[g(y) / .y \rightarrow f(x_0) + (-1)^i \epsilon] - x_0] / N \quad (i=1,2).$$

Для студентов, также бывает важно акцентировать такие вычислительные аспекты программного модуля.

Аналогичные рассуждения используются при определении пределов функции при $x \rightarrow \infty$ и бесконечно большой функции. Продемонстрируем визуализацию следующего определения [13]. Число A называется пределом функции $f(x)$ при $x \rightarrow \infty$, если для любого положительного числа ϵ существует такое число $M > 0$, что при всех x , удовлетворяющих неравенству $|x| > M$, выполняется неравенство $|f(x) - A| < \epsilon$.

На рисунке 5 построен график функции

$$f_1(x) = 4 \sin(5x) e^{-x/5} + 3,$$

для которого выполняется, что $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 3$. Визуализация модуля, скриншот которого приведен на рисунке 5, проводится аналогично, как показано выше.

Отметим, что на рисунке 5 отображена ситуация, когда нарушено выполнение условий определения существования предела. При выбранных $\epsilon = 0,84$ и $M = 4,73$ отображено, что значения функции $f_1(x)$ не попадают в интервал $(3 - \epsilon, 3 + \epsilon)$. Однако, перемещая точку M правее, например, в положение $M = 8$, убеждаемся, что значения функции $f_1(x)$ попадают в интервал $(3 - \epsilon, 3 + \epsilon)$.

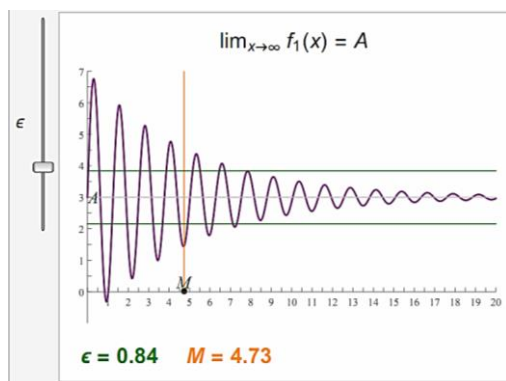


Рисунок 5 – Скриншот программного модуля для определения значений M для заданных значений ϵ . При изучении пределов $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$ после визуализации опре-

деления предела функции, удобно рассмотреть численное исследование таких пределов. Так, на рисунке 6 приведен скриншот вычислений значений функции, включая рациональные функции, отношения степенных функций к экспоненциальной функции, разности логарифмов и композиции функций. Рассматриваются следующие восемь функций, которые включают параметры, чтобы была возможность дать более широкий спектр примеров, на основе которых можно строить предположения о значении пределов $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$:

$$f_1(x) = \frac{ax}{bx+1}; \quad f_2(x) = \frac{ax^2+1000x+1}{bx^3+x+100};$$

$$f_3(x) = x - \sqrt{bx + x^2 + 1};$$

$$f_4(x) = \frac{\sin(x)}{x}; \quad f_5(x) = e^{-x}x^n;$$

$$f_6(x) = \frac{(\ln(x))^n}{x}; \quad f_7(x) = x^{a/x};$$

$$f_8(x) = \log(6x + 1) - \log(bx + 1).$$

Меняя положения ползунка для значений переменной x , мы можем увеличить или уменьшить значения переменной, и уже на этом этапе сделать вывод о значении предела $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$.

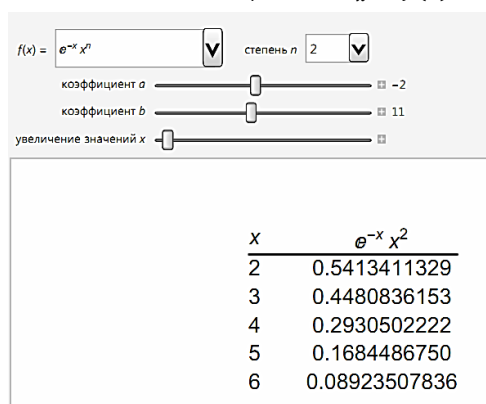


Рисунок 6 – Скриншот программного модуля для численного исследования пределов вида $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$

Заключение

Использование компьютерных математических пакетов в процессе обучения математическим дисциплинам в технических вузах является актуальным и перспективным направлением. В данной работе показаны примеры визуализации определения пределов числовых последовательностей и функций. Продемонстрирована расходящаяся числовая последовательность. Также в статье описан важный аспект скорости сходимости различных последовательностей к одному и тому же числу.

Показаны способы визуализации предела функции в точке и на бесконечности. Приведен программный модуль численного исследования пределов при $x \rightarrow \infty$ для функций различных классов, где, изменяя различные параметры входящих в приведенные функции, можно оценить их влияние на результат вычислений.

Список цитированных источников

1. Chichurin, A. V. Computer simulation of two chemostat models for one nutrient / A. V. Chichurin, H. N. Shvychkina // *Mathematical Biosciences: Intern. J. / Editor-in-Chief: E. O. Voit.* – 2016. – Vol. 278. – P. 30–36.
2. Применение систем компьютерной алгебры при решении модели стохастической гидрологии / Л. П. Махнист [и др.] // *Математические и физические методы исследований: научный и методический аспекты*: сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 22–23 апр. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина; под общ. ред. Н. Н. Сендера. – Брест: БрГУ, 2021. – С. 96–98.
3. Использование систем компьютерной алгебры в задаче гидрологического моделирования / Л. П. Махнист [и др.] // *Вычислительные методы, модели и образовательные технологии*: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 22 окт. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина; под общ. ред. Д. В. Грицука. – Брест: БрГУ, 2021. – С. 54–56.

4. Махнист, Л. П. К решению задачи гидрологии с использованием систем компьютерной алгебры / Л. П. Махнист, Е. Н. Защук, И. И. Гладкий // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 28–29 апр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. И. Басика. – Брест : БрГУ, 2022. – С. 17–18.
5. Защук, Е. Н. Компьютерная визуализация тел вращения на лекциях для студентов технических специальностей / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Математические и физические методы исследований: научный и методический аспекты : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 22–23 апр. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. Н. Н. Сендера. – Брест : БрГУ, 2021. – С. 38–39.
6. Швычкина, Е. Н. Использование SKA Mathematica при математической подготовке студентов в техническом университете / Е. Н. Швычкина // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике 2015 : сб. статей докладов респ. науч.-практ. конф., Брест, 23–24 апр. 2015 г. / Брест, гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. В. Чичурина. – Брест : БрГУ, 2015. – С. 110–113.
7. Защук, Е. Н. Компьютерная визуализация трехмерных систем координат в чтении лекций по дисциплине «Математика» / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 28–29 апр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. И. Басика. – Брест : БрГУ, 2022. – С. 56–57.
8. Швычкина, Е. Н. Использование математического пакета в лекции «Знакочередующиеся ряды» / Е. Н. Швычкина, Е. Н. Рубанова // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 21 окт. 2016 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. О. В. Матысика. – Брест : БрГУ, 2016. – С. 148–149.
9. Защук, Е. Н. Использование математического пакета в лекции «Ряды Фурье» / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов IX респ. науч.-практ. конф., Брест, 22 окт. 2020 г. / Брест, гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. А. Козинского. – Брест : БрГУ, 2020. – С. 66–67.
10. Математика: методические рекомендации и варианты контрольной работы № 2 по разделам «Функции нескольких переменных», «Интегральное исчисление функции одной переменной», «Дифференциальные уравнения», «Ряды» общего курса дисциплины «Математика» для студентов технических специальностей заочной формы обучения / А. И. Жук [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – 44 с.
11. Чичурин, А. В. Применение системы Mathematica при решении дифференциальных уравнений и в задачах математического моделирования : курс лекций для студентов специальности 1-31 03 01 «Математика (по направлениям)» : в 3 ч / А. В. Чичурин, Е. Н. Швычкина. – Брест : Белорус. гос. ун-т, 2016. – Ч. 1. – 62 с.
12. Письменный, Д. Т. Конспект лекций по высшей математике в 2-х частях / Д. Т. Письменный. – М. : Рольф, 2000. Ч. 1. – 288 с.
4. Mahnist, L. P. K resheniyu zadachi gidrologii s ispol'zovaniem sistem komp'yuternoj algebry / L. P. Mahnist, E. N. Zashchuk, I. I. Gladkij // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike : sb. materialov Rесп. nauch.-prakt. konf., Brest, 28–29 apr. 2022 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. I. Basika. Brest : BrGU, 2022. – S. 17–18.
5. Zashchuk, E. N. Komp'yuternaya vizualizatsiya tel vrashcheniya na lekciyah dlya studentov tekhnicheskikh special'nostej / E. N. Zashchuk, A. I. Zhuk // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovaniy: nauchnyj i metodicheskij aspekty : sb. materialov Rесп. nauch.-prakt. konf., Brest, 22–23 apr. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. N. N. Sendera. – Brest : BrGU, 2021. – S. 38–39.
6. SHvychkina, E. N. Ispol'zovanie SKA Mathematica pri matematicheskoj podgotovke studentov v tekhnicheskom universitete / E. N. SHvychkina // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike 2015 : sb. statej dokladov rесп. nauch.-prakt. konf., Brest, 23–24 apr. 2015 g. / Brest, gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. V. CHichurina. – Brest : BrGU, 2015. – S. 110–113.
7. Zashchuk, E. N. Komp'yuternaya vizualizatsiya trekhmernyh sistem koordinat v chtenii lekciy po discipline «Matematika» / E. N. Zashchuk, A. I. Zhuk // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike : sb. materialov Rесп. nauch.-prakt. konf., Brest, 28–29 apr. 2022 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. I. Basika. – Brest : BrGU, 2022. – S. 56–57.
8. SHvychkina, E. N. Ispol'zovanie matematicheskogo paketa v lekcii «Znakochereduyushchiesya ryady» / E. N. SHvychkina, E. N. Rubanova // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 21 okt. 2016 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. O. V. Matsyika. – Brest : BrGU, 2016. – S. 148–149.
9. Zashchuk, E. N. Ispol'zovanie matematicheskogo paketa v lekcii «Ryady Fur'e» / E. N. Zashchuk, A. I. Zhuk // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov IX rесп. nauch.-prakt. konf., Brest, 22 okt. 2020 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. A. Kozinskogo. – Brest : BrGU, 2020. – S. 66–67.
10. Matematika: metodicheskie rekomendacii i varianty kontrol'noj raboty № 2 po razdelam «Funkcii neskol'kih peremennyh», «Integral'noe ischislenie funkcii odnoj peremennoj», «Differencial'nye uravneniya», «Ryady» obshchego kursa discipliny «Matematika» dlya studentov tekhnicheskikh special'nostej zaochnoj formy obucheniya / A. I. Zhuk [i dr.]. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2019. – 44 s.
11. CHichurin, A. V. Primenenie sistemy Mathematica pri reshenii differencial'nyh uravnenij i v zadachah matematicheskogo modelirovaniya : kurs lekciy dlya studentov special'nosti 1-31 03 01 «Matematika (po napravleniyam)» : v 3 ch / A. V. CHichurin, E. N. SHvychkina. – Brest : Belarus. gos. un-t, 2016. – CH. 1. – 62 s.
12. Pis'mennyj, D. T. Konspekt lekciy po vysshej matematike v 2-h chastyah / D. T. Pis'mennyj. – M. : Rolf, 2000. CH. 1. – 288 s.

Материал поступил 14.02.2022, одобрен 28.02.2023, принят к публикации 28.02.2023

References

1. Chichurin, A. V. Computer simulation of two chemostat models for one nutrient / A. V. Chichurin, E. N. Shvychkina // Mathematical Biosciences : Intern. J. / Editor-in-Chief : E. O. Voit. – 2016. – Vol. 278. – P. 30–36.
2. Primenenie sistem komp'yuternoj algebry pri reshenii modeli stohasticheskoj gidrologii / L. P. Mahnist [i dr.] // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovaniy: nauchnyj i metodicheskij aspekty : sb. materialov Rесп. nauch.-prakt. konf., Brest, 22–23 apr. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. N. N. Sendera. Brest : BrGU, 2021. – S. 96–98.
3. Ispol'zovanie sistem komp'yuternoj algebry v zadache gidrologicheskogo modelirovaniya / L. P. Mahnist [i dr.] // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 22 okt. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. D. V. Gricuka. – Brest : BrGU, 2021. – S. 54–56.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В СИСТЕМЕ ВЕДЕНИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА НА МЕЛИОРИРУЕМЫХ ЗЕМЛЯХ

А. Г. Чепик¹, Ю. А. Мажайский², Ю. В. Доронкин³

¹ Д. э. н., проф. ЧОУ ВО «Московский университет имени С. Ю. Витте» (Рязанский филиал), Рязань, Россия, e-mail: a-cherik@mail.ru

² Д. с.-х. н., проф. Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (Межсерский филиал, г. Рязань), Рязань, Россия, e-mail: director@mntc.pro

³ К. с.-х. н., доцент, ГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева», Рязань, Россия, e-mail: yury.doronkin@yandex.ru

Реферат

Современный уровень загрязнения экологических систем требует определения эффективности субъектов хозяйствования: не только экологической, производственно-технологической, социальной, но и экологической эффективности.

Экологическая эффективность определяется сопоставлением результатов хозяйствования с затратами на поддержание, улучшение, коренное изменение экологических систем до уровня, соответствующего установленным нормам и нормативам.

В системе ведения сельского хозяйства на мелиорируемых землях обеспечение экологической безопасности осуществляется заинтересованными сторонами: государством, субъектами хозяйствования, гражданами на макро-, мезо- и микроуровне управления.

Экологическая эффективность определяется с помощью обоснованных критериев и соответствующих им систем показателей на основе нормативно-технического и социального подходов.

Основой для расчетов являются сведения мониторинга о состоянии почвы, воздушного и водного бассейна, данные государственной статистики.

Ключевые слова: экологическая система, уровень загрязнения среды, критерии, показатели экологической эффективности, эффективность нормативно-техническая, социальная.

ECOLOGICAL EFFICIENCY IN THE SYSTEM OF FARMING ON RECLAIMED LANDS

A. G. Chepik, Yu. A. Mazhaysky, Yu. V. Doronkin

Abstract

The current level of pollution of ecological systems requires determining the effectiveness of economic entities: not only environmental, industrial, technological, social, but also environmental efficiency.

Ecological efficiency is determined by comparing the results of management with the costs of maintaining, improving, radically changing ecological systems to a level corresponding to established norms and standards.

In the system of agriculture on reclaimed lands, environmental safety is ensured by stakeholders: the state, business entities, citizens at the macro-, meso- and micro-management levels.

Environmental efficiency is determined using reasonable criteria and corresponding indicator systems based on regulatory, technical and social approaches.

The basis for calculations is monitoring data on the state of the soil, air and water basin, and state statistics data.

Keywords: ecological system, the level of environmental pollution, criteria, indicators of environmental efficiency, regulatory and technical efficiency, social.

Введение

Проблемы сохранения и улучшения экологии последние годы широко обсуждаются в открытой печати и стали предметом пристального внимания многих ученых-экономистов, хозяйственников, органов государственного управления. И это не случайно в связи с тем, что масштабы загрязнения окружающей среды результатами хозяйственной деятельности человека промышленными и бытовыми отходами достигли гигантских размеров. Они намного превысили тот уровень, когда процессы естественного очищения природы могли в целом восстанавливать экологическое равновесие, сохраняя баланс. Сегодня на значительных территориях всех континентов имеет место быть разрушение естественных биоценозов и, как следствие, растут угрозы и риски для здоровья человека. Они проявляются не только посредством загрязнения окружающей среды: почвы, воздуха, воды и т. д., но и через проникновение отравляющих веществ в продукты питания, в предметы быта (рисунок 1).

Как видно из представленного графика, состояние мирового промышленного производства, рост численности населения, загрязнения окружающей среды непропорционально росту численности населения и объемам производства продуктов питания. Это свидетельствует о возникновении критических рисков планетарного масштаба. Подтверждением этому является рисунок 2, характеризующий материальный уровень жизни населения.

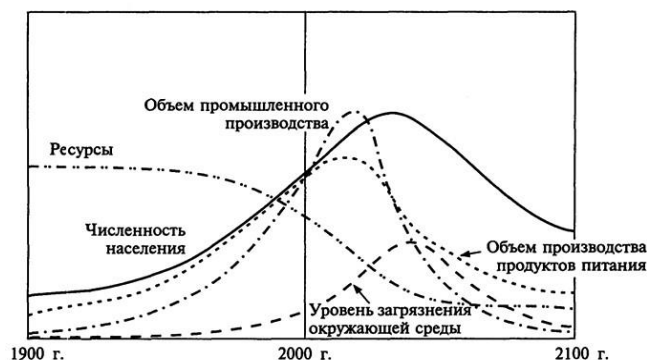


Рисунок 1 – Стандартный сценарий состояния мира (из книги «Пределы роста»)

Прослеживается тенденция существенного сокращения объемов производства материальных благ и услуг в расчете на душу населения. Как следствие этих процессов – сокращение продолжительности жизни населения.

Объектами изучения и первостепенного мониторинга в сфере экологической безопасности являются: земельные и водные ресурсы,

воздушный бассейн (атмосфера), околосемное пространство, а также готовая продукция, аккумулирующая в своем составе опасные для человека вещества.

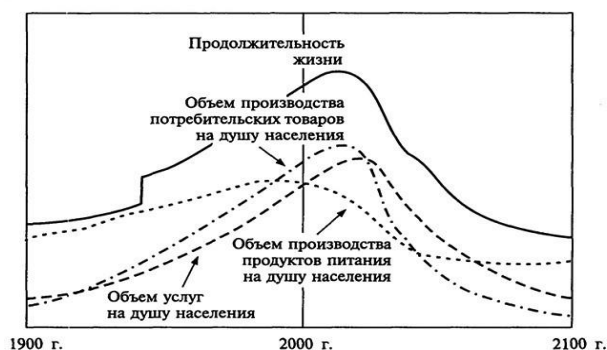


Рисунок 2 – Материальный уровень жизни по стандартному сценарию (из книги «Пределы роста»)

В современных условиях хозяйствования сложилось так, что преобладающая часть сельскохозяйственных земель России нуждается в той или иной мере проведения системы мер по их улучшению: известкованию, гипсованию, различных видов мелиорации. Об этом свидетельствуют данные государственного кадастрового учета земель. Изучая эту проблему, профессором А. М. Югаем была установлена зависимость между качественным состоянием сельскохозяйственных земель и необходимостью их рекультивации. В частности, мелиорации размеры этих площадей весьма существенны и по разным оценкам превышают 90 % всех сельскохозяйственных угодий [11, с. 27].

Нормативно-правовые, историко-логические и экономические основы экологической эффективности в сельском хозяйстве

Нормативно-правовой основой для осуществления системы организационно-экономических мер по улучшению экологии сельскохозяйственных территорий являются:

- Федеральный закон «О развитии сельского хозяйства» от 29.12.2006 №264-ФЗ;
- постановление Правительства Российской Федерации от 08.02.2022 № 133 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы» и ряд других документов.

Основная суть этих документов сводится к необходимости организации мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды и климата. Поиска путей смягчения антропогенного воздействия на окружающую среду. Разработки мер, способствующих ускоренной адаптации экологических систем, населения и отраслей сельской экономики к климатическим изменениям.

Как видим, смена технологических укладов за последние несколько столетий не была по существу непосредственно связана с сохранением и улучшением окружающей среды. И только в новейшей истории экстенсивные методы экологического хозяйствования, в частности на сельских территориях, были признаны недостаточно совершенными и начали заменяться более рациональными подходами к окружающей природе.

Воспроизводственный подход к агропромышленной сфере хозяйствования диктуется целым рядом причин, т. к. с ростом численности населения в возрастающих объемах требуются продовольственные товары и продукция, вырабатываемая из сельскохозяйственного сырья. Однако поле производства неуклонно сокращается, урбанизация усиливается, угрожая тотальным загрязнением земли, воздуха, воды. Да и само сельское хозяйство и связанные с ним отрасли являются источниками загрязнения.

Количественные и качественные параметры развития отрасли непосредственно связаны с системой ведения сельского хозяйства (рисунок 3). Современные системы ведения сельского хозяйства в развитых странах являются, главным образом, интенсивными, что предопределяет увеличивающиеся нагрузки на окружающую среду в части химического, физического, механического, биологического и т. д. воздействия. Здесь концентрируются наибольшие угрозы для

природных экологических систем, число которых имеет тенденцию к массовому сокращению.



Рисунок 3 – Система ведения сельского хозяйства и ее источники загрязнения

В развивающихся странах решение проблем продовольственной безопасности ведет к освоению все новых территорий, трансформации сельскохозяйственных угодий, увеличивая уровень их распаханности.

В сельском хозяйстве России имеет место сочетание интенсивного и экстенсивного подхода. Принимаются меры, направленные на проведение организационно-технологических мероприятий, внедряются специальные инвестиционные проекты, разрабатывается система государственных гарантий и т. д. Все это должно обеспечить существенное улучшение экологии в большинстве проблемных регионов страны, а также до 2050 года накопленный объем чистой эмиссии парниковых газов ожидается сократить до показателей ниже, чем в Европейском союзе [18]. Безусловно, решение поставленных проблем касается более рационального ведения сельского хозяйства на основе повышения его экологической эффективности.

История беспрецедентного увеличения экологических проблем и растущих опасностей и рисков для человека не так уж долгосрочна.

В начале 1970-х годов известными учеными впервые было констатировано, что массовое загрязнение природной среды превышает возможности Земли к экологическому самоочищению. Особенно остро это проявилось в промышленно развитых странах, в густонаселенных агломерациях. В настоящее время продолжают процессы вовлечения в хозяйственный оборот гигантских объемов сырьевых ресурсов, усиливается массовая урбанизация, уже более половины населения проживает в городах. Все чаще стали возникать аномальные явления в природе, потепление климата, перенасыщение атмосферы углекислым газом. Экологические системы стали терять множество видов растений и животных. Сегодня, как никогда ранее, встал вопрос определения экологической эффективности хозяйствования.

Оформление экологии в самостоятельную отрасль знаний произошло в начале XX века и связано с Ч. Адомсом (1913 г.). Позднее в 1930-40-е годы А. Тенсли (1935 г.) ввел понятие «экосистема» [9].

Проблемы экологической безопасности возникли не сразу, а по мере увеличивающейся техногенной нагрузки на окружающую среду. Первые термин «экология» (греч. ойкос – «дом», логос – «наука») был введен в биологическую науку немецким ученым Э. Геккелем в 1866 году. Тогда главным объектом изучения стали экологические системы (экосистемы). Их исследование получило большое многообразие: биосферная экология; сельскохозяйственная экология; промышленная экология; медицинская экология, математическая экология, экономическая экология, юридическая экология и некоторые другие.

В научной литературе различают четыре известных формы природопользования: жизнеобеспечивающая, хозяйственно-экономическая, оздоровительная, культурная. Сложилась так называемые общие и специальные режимы их реализации. По мнению отраслевых ученых экономика, в т. ч. аграрная, главным образом изучает вопросы экономической оценки природных ресурсов и оценки ущерба от загрязнения окружающей среды [9]. Однако в случаях нарушения природных условий сохранения экосистем возникает необходимость эколого-экономической оценки последствий хозяйственной деятельности человека и определения экологической эффективности субъектов хозяйствования. Как и другие известные виды эффективности: производственно-технологическая, экономическая и социальная, экологическая эффективность характеризуется своими критериями и соответствующими им системами показателей.

Доминирующая во многих странах рыночная экономика ориентирована на получение максимума прибыли. Ее рекламная деятельность

и воспитание человека-потребителя противоречит рациональному использованию ресурсов Земли, проведению массовых природоохранных мероприятий.

Эффективность как сопоставление конечных результатов с затратами на их достижение остается единым подходом к ее математическому определению. Применительно к исчислению экологической эффективности имеются свои особенности. Их основная суть сводится к тому, что на человека начинает частично возлагаться функция сохранения и улучшения среды обитания. Человек приходит на помощь природе с тем, чтобы качество среды обитания было безопасным само по себе, т. е. для проживания, но и производимая продукция также была безопасна для потребления человеком. С позиции рыночных отношений затраты, связанные с улучшением экологии, должны компенсироваться лучшими условиями жизни человека и более «чистыми» продуктами, необходимыми для его здоровой жизни. В поддержании экологически чистых условий должны быть заинтересованы все субъекты хозяйствования, государственные органы управления различного уровня, организации различных организационно-правовых форм хозяйствования и непосредственно граждане.

Следовательно, экологическая эффективность рассматривается в двух аспектах:

- **первое**, выявление и преодоление уровня загрязнения конечных продуктов потребления, доведения до нормативного уровня содержания опасных веществ и соединений в хлебе, молоке, мясе и т. д. Для проведения соответствующих мер необходимо с помощью регулярного мониторинга иметь сведения об удельной концентрации отравляющих веществ как в самих продуктах, так и в воде, почве, воздухе. Сравнительно, как мы поступаем с водопроводной водой, пропуская ее через фильтры. Таким образом, преодоление опасностей и рисков возможно либо совершенствованием технологий очистки готовых сырья и продуктов, либо проведением защитных мероприятий для исходной экологической среды (почвы, воды, воздуха и т. д.). Все эти затраты сопоставляются с конечными результатами – стабильными показателями здоровья человека (уровень заболеваемости и количество больничных дней, средняя продолжительность жизни и многие другие). В известной мере затраты на поддержание и улучшение экологии не могут окупаться быстро, а в комплексе с другими факторами требуют специального изучения;
- **второе**, социальный аспект экологической эффективности, т. е. поддержание (или создание) максимально благоприятных для жизни человека экологических условий: природно-климатических, условий комфортабельного проживания с наличием необходимой инфраструктуры, близость экологически чистых природных объектов (лес, река, озеро и т. п.). В этом случае затраты на экологию определяются в расчете на единицу площади 1 кв. метр, 1 га на душу населения. Наступило время, когда экологические ресурсы стали предметом нормирования, планирования и прогнозирования.

Более рациональное ведение сельского хозяйства диктуется целым рядом причин, большинство из которых связаны со специфическими особенностями отрасли:

- земля является не только пространственным базисом, но и предметом и средством труда. От состояния земельных ресурсов непосредственно зависит результативность хозяйственной деятельности;
- сельскохозяйственное производство имеет дело с живыми организмами: растениями и животными. Здесь особенно ярко переплетаются экономические процессы с процессами естественнобиологическими, с достижениями генной инженерии, с использованием и воспроизводством плодородия почвы и многими другими факторами;
- сельские жители, составляющие основу ведения сельского хозяйства, живут в условиях социально-территориальной общности, существенно отличающейся от городской среды. Профессиональные навыки сельского населения приобретаются за длительный период времени, передаются по наследству и существенно определяют воспроизводственные процессы в отрасли. В современных условиях массового оттока сельского населения в города многие территории испытывают дефицит работников, ввиду

сравнительно худших условий жизни на селе, аграрные профессии являются не престижными, что влияет на подготовку и переподготовку кадров. Развивающееся явление урбанизации, трансформации земельных сельскохозяйственных ресурсов повышает техногенную и экономическую нагрузку на землю, что сопровождается повышенным загрязнением сельскохозяйственных угодий;

- сезонность производства в сельском хозяйстве сопровождается не совпадением рабочего периода с периодом производства. Сырье и готовая продукция получают неравномерно, циклично и зависят от многих природных факторов. В этой связи рабочая сила, техника и другие средства производства используются также неравномерно;
- необходимость своевременной переработки сельскохозяйственной продукции и сырья определяет структуру перерабатывающей промышленности, потребности в хранилищах и складском хозяйстве, логистику работы всего агропромышленного комплекса;
- ограниченность поля производства, его сокращение влияет на ускорение поиска альтернативных технологий получения продовольствия и сырья, использования искусственных заменителей, добавок, концентратов и т. д., соответствующих экологическим требованиям и нормам.

Таким образом, изучение воспроизводственных процессов в сельском хозяйстве связано с их анализом в разрезе определенных составляющих социально-экономических систем: производственно-технологической, экономической, социальной и экологической. Впоследствии эти составляющие стали рассматриваться в виде самостоятельных подсистем [1, с. 8–11].

Это объясняется тем, что идеальные и реальные цели субъектов хозяйствования в аграрном производстве весьма разнообразны и сводить их только к экономической результативности в новейшей истории не соответствует потребностям общества.

Экономическая экология как важнейшая составляющая национального организационно-экономического механизма хозяйствования призвана решать целый ряд теоретических и прикладных задач, к числу которых относятся следующие:

- прогнозирование, планирование и оценка возможных отрицательных последствий, возникающих в экологических системах под влиянием деятельности человека;
- поддержание и улучшение качественных показателей, характеризующих приемлемое состояние окружающей среды для полноценной жизни и деятельности человека;
- повышения уровня экологической безопасности окружающей среды за счет проведения системы мер по инженерному, экономическому, правовому, технологическому и иному обслуживанию субъектов хозяйствования;
- организация оптимального взаимодействия природы и общества.

В сельском хозяйстве проблемы возобновления и исчерпания природных ресурсов стоят наиболее остро. В современной России земельный фонд составляет 17,1 млн. км² или 0,9 га пашни на 1 человека, что в 3 раза выше среднемирового уровня. В сельском хозяйстве используется 193,6 млн га, из которых 60,4 % (117,0 млн га) – пашня, 36,8 % кормовые угодья (71,2 млн га), а посевная площадь в 2020 г. составляла 79,9 млн га [11, с. 8]. Однако за последние десятилетия (1991–2022 гг.) более одной трети земель претерпела трансформацию или выбыла из сельскохозяйственного оборота. Значительная часть земельного фонда подвержена отрицательным воздействиям природного и экономического происхождения: ветровая и водная эрозия, потеря плодородия, особенно от снижения содержания гумуса; подтопление и вторичное засоление; химическое и радиационное загрязнение; различные виды деградации, в т. ч. машинная и т. д. Россия теряет ежегодно 1,5 млрд т плодородного слоя почвы, 30 % приходится на деградированные почвы.

Аналогичная, прогрессирующая тенденция прослеживается в деградации водных ресурсов, значительная часть которых используется в сельском хозяйстве. Общий объем водных ресурсов России составляет 28 тыс. км³ или 22 % от объема всех пресных вод мира. Антропогенное загрязнение водных ресурсов связано с увеличивающимся объемом сточных вод промышленности и жилищно-коммунального хозяйства, с поверхностными стоками сельскохозяйственных объектов, с атмосферными загрязнениями и т. д.

Загрязнение воздушного бассейна объектами сельского хозяйства весьма значительны, особенно углеродными отходами (CO₂) промышленного животноводства. Необходимо отменить, что для полного восстановления климата на Земле необходимо довести выбросы углекислого газа до «чистого нуля», что в принципе невозможно [12, с. 52].

Отдельной, но чрезвычайно важной проблемой является воздействие на экосистемы деятельности военно-промышленного комплекса и ядерной инфраструктуры на земле и в космосе. Они, как в мировом, так и внутрироссийском масштабе, имеют тенденции глобального влияния на уровень радиационного загрязнения, ионизации атмосферы, возникновения «озоновых дыр» и многих других опасных последствий.

Методические подходы к определению экологической эффективности

В соответствии с методическими рекомендациями Всероссийского НИИ экономики сельского хозяйства (ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ) для определения экологической эффективности предусмотрены показатели экологической оценки, которые объединены в следующие группы:

1. Уровень содержания опасных и вредных веществ в выбросах в атмосферу, почву и водоемы, а также в стоках животноводческих комплексов и ферм.
2. Размеры процессов и явлений, обуславливающих эрозию почвы и разрушение почвенной структуры.
3. Объемы и структура природовосстановительных работ [1, с. 33].

Совершенно очевидно, что применительно к каждой группе показателей должны быть сформулированы временные критерии. Это позволяет изучать тенденции изменения экологической среды во времени и в ее качественном состоянии, что служит информацией для принятия и реализации управленческих решений.

Одним из главных критериев экологической эффективности является уровень сохранности окружающей среды (экосистем),

гарантирующий полноценное воспроизводство их параметров преимущественно за счет природных факторов. Такой подход позволяет на длительный период сохранять и поддерживать полноценную жизнеспособность природных ландшафтов, на которых осуществляется та или иная деятельность человека (таблица 1).

Управляющая роль экологической эффективности над другими ее видами не случайна. Она предопределяется растущими масштабами загрязнения окружающей среды. Так неуклонно возрастающий дефицит питьевой воды привел к массовому выпуску бутелированной воды, к очистке водных источников. Сегодня не менее актуально встает вопрос о производстве чистого воздуха в виде специальных баллонов, замкнутых помещений, где будет возможно проводить релаксацию человека.

В современных условиях прослеживается становление двойственного подхода к определению экологической эффективности. А именно: нормативно-технический и социальный. Они взаимно дополняют друг друга, но и имеют существенные различия.

Критериями и показателями нормативно-технического подхода являются стандарты, технические условия, нормы и нормативы, регулирующие предельные дозы концентрации (ПДК) вредных для человека и отравляющих веществ в различных средах – в воде, в почве, воздушном бассейне и т. д.

Социальный подход к экологической эффективности определяется критериями и показателями, характеризующими влияние на человека изменяющихся условий его пребывания и жизнедеятельности в условиях регулируемой экологической системы. К их числу следует отнести: продолжительность жизни; снижение уровня заболеваемости; улучшение показателей здоровья человека; доступ к материальным, духовным и интеллектуальным благам экологически чистых ландшафтов.

В последние десятилетия разработаны и совершенствуются критерии и системы показателей, позволяющие осуществлять количественную и качественную оценку экологической эффективности.

Таблица 1 – Критерии и система показателей экологической эффективности сельскохозяйственного производства

Критерии	Основные показатели	Информационное обеспечение
– Уровень сохранности окружающей среды	1. Земельные ресурсы – земельный кадастр – удельные инвестиции на поддержание и улучшение плодородия почв (тыс. руб. на 1 га)	Нормативно-правовые акты Федерального и регионального уровня
– повышение экологичности производства	– защита от загрязнения гербицидами, пестицидами, радиоактивным излучением и др.	Система стандартизации Российской Федерации Действующие нормы и нормативы
– уровень выхода сырья и сельскохозяйственной продукции при поддержании экологического равновесия	– мелиорация (осушительная, оросительная, химическая) – культуртехнические работы	Официальные результаты мониторинга состояния окружающей среды
– экологическая технологичность производства	2. Водные ресурсы – удельные инвестиции на охрану и рациональное использование поверхностных и подземных вод (руб. на 1м3) – соблюдение требований к качеству воды в водотоках и водисточниках (нормы и нормативы)	Методическая и учебно-справочная литература
– увеличение продолжительности жизни населения	– баланс водообеспечения сельскохозяйственного предприятия и его объектов хозяйствования – удельные затраты на охрану, очистку, поддержание экологичности производства (руб. на 1га, 1м3 и т. д.)	Официальные издания Федеральной службы государственной статистики
– снижение уровня заболеваемости работников	3. Воздушный бассейн – уровень загрязнения атмосферы токсичными газами, предельные дозы концентрации (ПДК) газов, шума, электромагнитных колебаний, радиации, теплового загрязнения, химических и физических загрязнителей (нормы и нормативы)	Официальные издания территориальных органов государственной статистик
– повышение выхода валовой (товарной) продукции в результате проведения мероприятий по улучшению экологии	– удельные затраты на охрану и восстановительную деятельность (на 1 га, 1 м3 и т. д.)	Результаты наблюдений и контрольных измерений экологических постов организации
– окупаемость затрат, связанных с улучшением экологической среды хозяйствования, дополнительным выходом товарной продукции	4. Растительный и животный мир – удельные затраты на сохранение, развитие и улучшение территории и их биологического состояния (на 1 га тыс. руб.) – использование насаждений для специальных агротехнологических и инженерных целей – сохранение и обеспечение полноценного воспроизводства растений и животных в естественных условиях и в условиях интенсивного использования – охрана и использование природно-заповедного фонда (тыс. руб. на 1 га, на 1 среднегодового работника тыс. руб. в год и т. д.)	

Рассмотрим две наиболее распространенные группы показателей:

- *первая группа* – нормы и нормативы, регулирующие предельные дозы концентрации (ПДК) опасных и вредных для человека и окружающей среды веществ, содержащихся в различных средах (в почве, воде, воздухе, в сырье для производства, в готовой продукции и т. д.) (13,14,16);

- *вторая группа* – это показатели удельных расходов материально-денежных средств, информационных и интеллектуальных издержек, которые необходимо осуществить для поддержания, улучшения, полного восстановления экологических систем нарушенных в результате действия тех или иных факторов, спровоцированных деятельностью человека. Индикаторами результативности такой деятельности могут служить устойчиво сохраняющаяся фауна и флора в изучаемых экосистемах. Например, наличие и продуктивно развивающееся пчеловодство в зонах интенсивного земледелия и т. д.

Использование обоснованных критериев и систем показателей экологической эффективности позволяет использовать достижения научно-технического прогресса с учетом сохранения и улучшения окружающей среды.

Повышение экологической эффективности в многоукладной экономике страны является комплексной проблемой, которую целесообразно решать на макро-, мезо-, и микроуровне хозяйствования, используя единые подходы и принципы.

На макроуровне, это связано с разработкой научной парадигмы и государственной экологической политики, с формированием и пополнением государственной нормативно-правовой базы, которая является основой для регулирования отношений в сфере экологии, приведение ее в соответствие с документами международного экологического права. Приоритетом государства является система стандартизации, гарантирующая единые требования при подготовке и реализации управленческих решений. На макроуровне разрабатываются экологические разделы национальных проектов, целевых комплексных программ, программ регионального развития, обосновываются основные направления сохранения, восстановления, улучшения экологических систем, задействованных в планах стратегического развития национальных территорий. С помощью целевых критериев и систем показателей даются рекомендации по определению экологической эффективности в различных сферах хозяйствования и на их объектах, в т. ч. масштабы проводимых работ, обеспеченность их ресурсами, ожидаемые сроки выполнения, возможная окупаемость инвестиций. Осуществляется научное и институциональное обеспечение экологических проектов, образовательная деятельность.

На мезоуровне: в кластерах, отраслях хозяйствования, в крупных объединениях на уровне страны, отдельных регионов и т. д. находят применение укрупненные показатели экологической эффективности, которые детализируются и дополняются на микроуровне.

На микроуровне проводятся основные работы по мониторингу окружающей среды, создаются базы данных из числа взятых проб на ПДК, других параметров. Организуются первичные трудовые коллективы в виде лабораторий, экологических патрулей, постов.

Заключение

Таким образом, необходимость и целесообразность определения экологической эффективности в системе ведения сельского хозяйства является обязательным условием хозяйствования, в т. ч. и на мелиорируемых землях. С помощью критериев и систем показателей можно оценить влияние экологической эффективности на конкурентоспособность субъектов хозяйствования.

Повышение экологической эффективности в значительной мере связано с проведением предупредительных мероприятий природоохранного порядка. Работа с персоналом организаций, с населением сельских территорий и т. д. позволяет формировать общие тенденции бережного отношения к природе. Безусловно, государственные органы надзора за соблюдением экологических норм и нормативов имеют решающее значение в выполнении основных принципов рационального хозяйствования. Вместе с тем проблема экологического благополучия общества должна решаться не только через систему государственной власти. Необходимо, чтобы в организациях неукоснительно соблюдались экологические требования. Это касается

всего комплекса отношений, предметом которых является нивелирование отрицательных воздействий на природу, исключение физического, химического, биологического, урбанизационного и других видов загрязнения окружающей среды.

Все основные виды экологического воздействия являются динамическими. Они зависят от времени и пространства, от прямых и обратных связей внутри экологических систем, которые могут усиливать или ослаблять конечный эффект, иными словами иметь положительное или отрицательное влияние с позиции выбранного критерия и соответствующей ему системы показателей.

В известной мере данные этих обоснований могут быть использованы в прогнозировании качественных показателей экономической и социальной эффективности сельскохозяйственного производства, находящегося в пределах определенных территорий и в рамках установленных параметров их экологических систем.

В настоящее время особенно важно своевременно диагностировать динамику отрицательного воздействия аграрного производства на окружающую среду и находить наиболее оптимальные способы ее преодоления.

Список цитированных источников

1. Ушачев, И. Г. Эффективность сельскохозяйственного производства : методические рекомендации / И. Г. Ушачев. – М., 2005. – 156 с.
2. Справочник по экологической экспертизе проектов / Под ред. М. А. Пустовойта. – Киев : «Радянська Україна», 1986. – 192 с.
3. Эколого-экономическая эффективность использования сельскохозяйственных земель / Н. Ф. Хицков, акад. РАСХН, Г. Н. Чочут, к. э. н. ВГАУ им. К. Д. Глинки // Вестник ОрелГАУ. – 2007. – № 2.
4. Оценка экологической эффективности_docs.cntd.ru>document>1200142.
5. Экологический менеджмент. Оценка экологической эффективности [Электронный ресурс] : национальный стандарт Российской Федерации утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 декабря 2016 г. N 1941-ст. – Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost>.
6. О стандартизации в Российской Федерации [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 29.06.2015 г. №162 – ФЗ. – Режим доступа: <https://rg.ru/2015/07/03/standart-dok.html>.

References

1. Ushachev, I. G. Effektivnost' sel'skohozyajstvennogo proizvodstva : metodicheskie rekomendacii / I. G. Ushachev. – M., 2005. – 156 s.
2. Spravochnik po ekologicheskoj ekspertize proektov / Pod red. M. A. Pustovojta. – Kiev : «Radyans'ka Ukraina», 1986. – 192 s.
3. Ekologo-ekonomicheskaya effektivnost' ispol'zovaniya sel'skohozyajstvennyh zemel' / N. F. Hickov, akad. RASKHN, G. N. Chochut, k. e. n. VGAU im. K. D. Glinki // Vestnik OreIGAУ. – 2007. – № 2.
4. Ocenka ekologicheskoj effektivnosti_docs.cntd.ru>document>1200142.
5. Ekologicheskij menedzhment. Ocenka ekologicheskoj effektivnosti [Elektronnyj resurs] : nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii utv. i vveden v dejstvie prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 5 dekabrya 2016 g. N 1941-st. – Rezhim dostupa: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost>.
6. O standartizacii v Rossijskoj Federacii [Elektronnyj resurs] : Federal'nij zakon ot 29.06.2015 g. №162 – FZ. – Rezhim dostupa: <https://rg.ru/2015/07/03/standart-dok.html>.

Материал поступил 24.01.2023, одобрен 01.02.2023, принят к публикации 01.02.2023

УДК 338.242.4

ИННОВАЦИОННЫЕ ФОРМЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОДДЕРЖКИ МАЛОГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА В СТРАНАХ ЕВРАЗИЙСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОЮЗА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Ж. Г. Голодова¹, П. А. Смирнов², М. С. Лазырин³

¹ Д. э. н., профессор, профессор кафедры национальной экономики
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия, e-mail: golodova_zhg@pfur.ru

² К. э. н., старший преподаватель кафедры национальной экономики
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия, e-mail: smirnov_pa@pfur.ru

³ Ассистент кафедры экономико-математического моделирования
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия, e-mail: lazyrin_ms@pfur.ru

Реферат

Малое предпринимательство в последние десятилетия зарекомендовало себя важным самостоятельным сегментом экономики. По данным ООН к малому и среднему бизнесу относится до 90 % всех компаний мира, обеспечивая 70 % рабочих мест и создавая около 50 % ВВП. Однако в странах Евразийского экономического союза (ЕАЭС) несмотря на принятие государственных программ развития и расширение форм и инструментов государственной поддержки, его вклад в экономику не только не возрастает, но и периодически снижается. Такая ситуация свидетельствует, с одной стороны, о нестабильности экономической ситуации, несовершенстве нормативно-правовой базы и высоком административном давлении, а с другой, – о низкой результативности мер государственной поддержки, не всегда соответствующих потребностям малых предприятий, и необходимости их реформирования с учетом возможностей цифровизации экономики. В статье обосновывается необходимость новых форм поддержки малых предприятий и предложена методика оценки результативности реализуемых мер. На основе обширного статистического материала раскрыты тенденции и проблемы развития малого предпринимательства в странах ЕАЭС в современных условиях, проведена оценка результативности мер его поддержки и описаны новые инновационные формы поддержки.

Ключевые слова: малое предпринимательство, государственная поддержка, результативность мер поддержки предпринимательства, Евразийский экономический союз (ЕАЭС), цифровизация экономики, экосистема предпринимательства.

INNOVATIVE FORMS OF STATE SUPPORT FOR SMALL BUSINESSES IN THE COUNTRIES OF THE EURASIAN ECONOMIC UNION IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION

Z. G. Golodova, P. A. Smirnov, M. S. Lazyrin

Abstract

Small business in recent decades has established itself as an important independent segment of the economy. According to the UN, up to 90% of all companies in the world belong to small and medium-sized businesses, providing 70% of jobs and creating about 50% of GDP. However, in the countries of the Eurasian Economic Union (EAEU), despite the adoption of state development programs and the expansion of forms and instruments of state support, its contribution to the economy not only does not increase, but also periodically decreases. This situation indicates, on the one hand, the instability of the economic situation, the imperfection of the regulatory framework and high administrative pressure, and on the other hand, the low effectiveness of state support measures that do not always meet the needs of small enterprises, and the need to reformat them, taking into account the possibilities of digitalization of the economy. The article substantiates the need for new forms of support for small businesses and proposes a methodology for assessing the effectiveness of the measures being implemented. On the basis of extensive statistical material, the trends and problems of small business development in the EAEU countries in modern conditions are revealed, the effectiveness of measures to support it is assessed, and new innovative forms of support are described.

Keywords: small business, state support, effectiveness of measures to support entrepreneurship, Eurasian Economic Union (EAEU), digitalization of the economy, entrepreneurship ecosystem.

Введение

Анализ существующих научных исследований свидетельствует об отсутствии ориентированной на результат системы организации государственной поддержки малого предпринимательства и единой методики оценки ее результативности. В то же время для существенного повышения активности малого предпринимательства, играющего существенную роль в экономике развитых стран и пока незначительную в странах ЕАЭС, необходима разработка эффективной модели взаимодействия государства и субъектов малого предпринимательства, своевременное реформирование объявленных мер поддержки, их адаптация к меняющимся условиям предпринимательской среды. Поэтому выявление проблем несовершенства государственной поддержки, внедрение ее новых форм в условиях цифровизации экономики представляется актуальной для всех стран ЕАЭС.

Новые аргументы целесообразности государственной поддержки малого предпринимательства (МП)

С момента формирования теории предпринимательства не прерываются дискуссии о преимуществах и недостатках малого пред-

принимательства по сравнению с крупным и о целесообразности/нецелесообразности его государственной поддержки. В частности, делается акцент на том, что МП должно развиваться только в тех сферах и на тех территориях, в которых оно имеет несомненные преимущества перед крупным бизнесом, что делает обязательной государственную экономическую поддержку вообще. Традиционными аргументами оппонентов-сторонников повсеместного стимулирования развития МП является необходимость повышения занятости населения, возможность функционирования в непривлекательных для крупного бизнеса регионах и сферах экономики; гибкость при осуществлении операционной деятельности, инновационный характер деятельности, соблюдение антимонопольного законодательства [1–3]. Кроме того, в качестве новых аргументов необходимости государственной поддержки МП в последние десятилетия выделяют:

- желание ослабить роль профсоюзов за счет децентрализации производства [4];
- развитие системы получения и передачи знаний в процессе обучения, при выполнении служебных обязанностей и т. д.,

приводящее к смене парадигмы от «предпринимателя с рождением» к «предпринимателю формирующемуся» [5–6];

- усиление конкуренции приводит к непредставлению рынком необходимых консультационных услуг субъектам МП [7];
- рост числа этнических меньшинств, темпы роста количества которых опережают темпы роста МП в целом в странах и которые, как правило, функционируют в менее благоприятных районах страны, т. е. развитие «предпринимательства по необходимости» на территориях с наименее платежеспособной клиентской базой [8–9];
- реализация политики повышения занятости женщин, молодежи и лиц с ограниченными возможностями [10].

В странах ЕАЭС, в которых с середины 1990-х годов принимаются специальные нормативно-правовые акты, государственные программы, национальные проекты развития МСП, регулярно расширяются меры и инструменты государственной поддержки. Однако, несмотря на рост количества субъектов МСП и численности занятых в них, вклад данного сегмента в экономики этих стран не только не возростает, но и сокращается (рисунок 1).

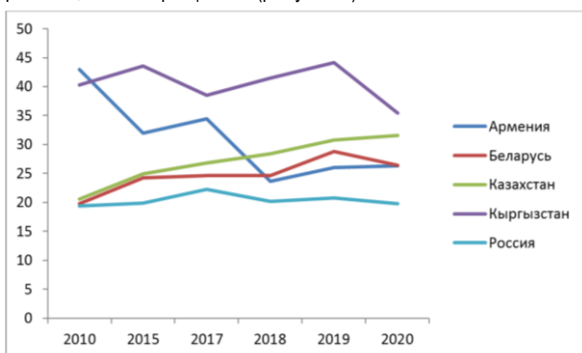


Рисунок 1 – Динамика доли МСП в ВВП стран ЕАЭС в 2010-2020 гг. (%)

Примечание – источник: Составлено по [11]

В то же время во всех анализируемых странах, несмотря на ежедневно обозначаемую необходимость стимулирования развития субъектов МП, имеются схожие проблемы:

1. Отмечается нестабильность законодательства, регулирующего предпринимательскую деятельность, административные барьеры – требования по минимальному размеру уставного капитала, уплате государственной пошлины за регистрацию, приобретению юридического адреса, изготовлению печати и др. Следует отметить, что затраты на открытие бизнеса не являются слишком обременительными (таблица 2). Кроме того, в некоторых странах (Республика Беларусь, Россия) ИП или ООО может осуществлять деятельность без печати, в отдельных случаях ее наличие является обязательным – при заполнении в бумажном виде трудовых книжек, оформлении бланков строгой отчетности, участии в государственных закупках. Наличие печати также свидетельствует о «солидности» субъекта малого предпринимательства, подтверждает полномочия его представителя, а также желательность при подписании договоров с контрагентами и открытии банковского счета.

Таблица 2 – Стоимость открытия бизнеса в странах ЕАЭС в 2021 году

Вид налога	РА	РБ	КР	РК	РФ
Минимальный уставный капитал ООО (ТОО)	не установлен	не установлен	1 сом ≈ 0,01 долл.	не установлен	10 тыс руб. ≈ 134,6 долл.
Стоимость регистрации бизнеса	1 долл.	100 бел.руб. ≈ 39,2 долл.	85-110 сомов ≈ 1,0-1,3 долл.	≈ 1 долл.	от 2,3 тыс руб. ≈ 30,9 долл.
Государственная пошлина за регистрацию бизнеса	не взимается	14,5 бел.руб. ≈ 5,7 долл.	80-90 сомов ≈ 1,1 долл.	не взимается	4 тыс руб. ≈ 53,8 долл.
Налоги с бездействующих компаний, ИП	не взимаются	взимаются	взимаются	взимаются	взимаются

Примечание – источник: Составлено по [12-15].

Большой сложностью отличается регистрация субъектов МП в отдельных видах деятельности (осуществление строительных работ, производство пищевой продукции и др.) вследствие затягивания сроков получения лицензий, многочисленных разрешений и согласований, необходимости сертификации товаров и услуг. Введение в странах ЕАЭС требования маркировки отдельных видов продукции и применения контрольно-кассовой техники привели к увеличению затрат МП. Органы местного самоуправления зачастую не соблюдают действующее законодательство, отказываясь предоставлять субъектам МП места или маршруты для осуществления нестационарной торговли (в Казахстане в 2021 году было выявлено, что акиматами девяти городов места для торговли не предоставлялись, а за торговлю в «неположенных» местах предпринимателей штрафовали) [16]. В Кыргызстане существовало более 500 видов лицензий и разрешений, выдаваемых субъектам малого предпринимательства [17]. В отдельных странах имеют место случаи вымогательства со стороны налоговых служб и других органов государственной власти (исполнительный директор Международного делового совета Кыргызстана А. Сыдыков в 2022 году признал, что «налоговики требуют взятки с предпринимателей каждый месяц») [18].

2. Ограниченность и сложность привлечения необходимых финансовых ресурсов, в результате чего основным источником для большинства субъектов МП являются сбережения и имущество учредителей и собственников, помощь друзей родственников и собственников (доля кредитов субъектам МСП в ВВП составила в 2020 году в Беларуси всего 20,1 %, Казахстане – 3,5 %, России – 7,2 %). Имеет место невыполнение многих решений, зафиксированных в нормативных актах. Так, в России в марте 2018 года в послании Президента Российской Федерации Федеральному собранию было указано о необходимости кредитования субъектов МП, осуществляющих производственную деятельность, по ставке 6,5 %, однако к началу 2020 года эта мера так и не была внедрена [19].
3. Высокое налоговое бремя (по оценкам MIA Research более 50 % белорусских респондентов признали этот фактор самым значимым) [20].
4. Несвершенство системы госзакупок у субъектов МСП (например, российский закон об увеличении госзакупок с 15 до 25 % был заморожен).
5. Отсутствие надлежащих условий для конкуренции (во всех странах действуют искусственные барьеры допуска к отдельным видам деятельности субъектов МП).
6. Нестабильность экономики (замедление темпов роста или спад экономик, девальвация национальных валют, увеличение темпов инфляции, снижение покупательной способности населения и др.).
7. Неразвитость инфраструктуры поддержки предпринимательства.

На фоне сохранения данных проблем проявляются следующие негативные тенденции развития МП [11]:

- замедление темпов прироста количества субъектов МСП – темп прироста в среднем за период 2006–2010, 2011–2015 и 2016–2020 годы составил соответственно в Белоруссии в 21,5; 4,2 и 0,8 %; в Казахстане 5,9; 6,4 и – 9,7 %; в Кыргызстане 8,4; 3,2 и 4,3 %; в России с 8,4 до 6,3 и 1,5 % (в Армении в 2011–2015 и 2016–2020 годы 7,2 и 1,8 %);
- увеличение доли ИП в количественной структуре субъектов МСП и увеличение доли ИП в структуре занятости субъектов МСП в Беларуси с 8,1 до 18,5 %; Казахстане с 27,0 до 39,0 %; Кыргызстане с 72,5 до 97,1 %; России с 17,6 до 22,8 %;
- усиление неравномерности распределения субъектов по территории большинства стран: в столичном регионе в Армении доля субъектов МСП возросла с 42,0 до 51,5%, Белоруссии – с 54,2 до 58,5%; Казахстане – с 34,9 до 35,2%; в Кыргызстане – с 40,0 до 62,5%, в России – с 8,8 до 9,2%;
- невысокий удельный вес сектора МСП в промышленном производстве (по объему выпуска), который составил в Армении 20,6%; Белоруссии 20,2%; Казахстане 25,1%; Кыргызстане 17,8%.

Выше перечисленные проблемы обуславливают, с одной стороны, необходимость оценки и повышения результативности мер государственной поддержки МП, а с другой – необходимость реформирования мер.

Внедрение инновационных инструментов поддержки субъектов малого предпринимательства

Следует признать, что меры и способы поддержки малого предпринимательства в странах ЕАЭС схожи – имущественная, информационная, финансовая, инфраструктурная и др. Вместе с тем, разнообразие инструментов и центров государственной поддержки МП создает сложности для субъектов при выборе соответствующей инстанции получения необходимой информации и помощи. Довольно точно о данной проблеме высказался в декабре 2020 года на парламентских слушаниях, посвященных вопросам поддержки и развития МСП, председатель сената парламента РК М. Ашимбаев, отметивший, что предприниматели, особенно субъекты микро- и малого бизнеса, зачастую не знают, какие меры господдержки существуют. Многие из них жалуются, что не могут разобраться и получить нужные консультации, поэтому необходимо создание единого координационного центра и информационного портала, где предприниматели могли бы получить помощь по принципу «единого окна» [21]. Для устранения этого в странах ЕАЭС внедрена одна из самых распространенных мер – система «одного окна», цель которой заключается в комплексной системе поддержки субъектов. Т. е. данная система является агрегатором всех направлений услуг необходимых для создания благоприятной среды организации и ведения бизнеса.

Так, в Армении Фондом «Бизнес Армения» система «единого окна» функционирует с 2019 года, предоставляя предпринимателям услуги по продвижению экспорта и привлечению иностранных инвестиций. Среди услуг платформы обслуживание звонков, предоставление и разработка необходимой информации и др. [22]. Службы «единого окна» в Беларуси, созданные в 2005–2006 годы в городских, районных исполнительных комитетах, администрациях районов в городах позволяют осуществлять прием заявлений и выдачу административных решений, а с 2019 года адаптированы и под потребности предпринимательских структур [23]. В Казахстане Национальной палатой предпринимателей «Атамекен» в 2018 году создан портал (atameken.net), являющийся «единым окном» для бизнеса, посредством которого можно подать заявку на получение государственных услуг и получить сервисную поддержку бизнеса [24]. В России в рамках нацпроекта «Малое и среднее предпринимательство и поддержка индивидуальной предпринимательской инициативы» создаются Центры «Мой бизнес», в которых действующие и будущие предприниматели могут по принципу «одного окна» получить все необходимые государственные и муниципальные услуги для начала и ведения предпринимательской деятельности – поставить на государственный кадастровый учет недвижимое имущество и зарегистрировать права на него; получить сведения из Единого государственного реестра недвижимости; получить выписки из Единого реестра федерального имущества; запросить информацию по исполнению судебных решений в отношении физического и юридического лица; зарегистрировать и снять с регистрационного учета страхователей; получить лицензию на отдельные виды деятельности, а также разрешение на капитальное строительство объекта и его ввод в эксплуатацию; присвоить адрес объекту недвижимости; получить необходимые услуги, связанные с предоставлением на торгах или без торгов земельных участков, находящихся в государственной или муниципальной собственности; получить разрешение на осуществление перевозок; арендовать у муниципалитета недвижимость; направить в уполномоченные контролирующие органы уведомление о начале выполнения работ или оказания услуг. Кроме того, посредством «одного окна» с помощью представителей региональных гарантийных фондов, микрофинансовых организаций и других институтов оказывается помощь в оформлении заявок на получение кредита и других видов поддержки; предоставлении услуги по выдаче цифровой электронной подписи, по приобретению контрольно-кассовой техники, открытию расчетного счета, подбору помещений для бизнеса, поиску имущества в рамках лизинга и проч. [25].

В условиях цифровизации экономики государство получило возможность оперативно трансформировать механизм предоставления помощи субъектам МП. Прежде всего, речь идет об использовании «коробочного» продукта, в рамках которого в режиме «одного окна» можно подать заявку и документы для получения льготного кредита,

т. е. включить не только одну услугу, как это было ранее, но и дополнительные услуги по запросу субъекта МП. Несомненно, такое решение существенно упростило выход МП на внешние рынки, однако, как показала практика его использования, набор предлагаемых услуг не содержит возможности для планирующих экспортные поставки субъектов, в т. ч. в части подготовки презентации и рекламы производимой продукции, компенсации транспортных расходов и т.д. [26].

Интересен опыт России, в которой с 2022 года функционирует Цифровая платформа МСП (платформа поддержки предпринимателей), включающая такие разделы, как региональные меры поддержки, банковские сервисы, бизнес-обучение и статистика. В рамках платформы функционируют сервисы:

1. Доступ к закупкам государственных компаний (более 600 компаний, среди которых «Росатом», «Почта России», «Сбер», «ВТБ», «РЖД», «Аэрофлот», «Газпром», «РусГидро», «НПО Энергомаш» и др.) юридических лиц, ИП, самозанятых и физических лиц.

В данном разделе представлены: витрина закупок малого объема (до 500 тыс. руб.); гид по госзакупкам, с помощью которого можно проконсультироваться в части регистрации в ЕИС, поиска подходящих закупок, получения электронной подписи, подготовки заявки на участие, заключения договоров и обеспечения их исполнения, возможности участия в программе «выращивания» поставщика и др.; бизнес-обучение, в рамках которого предоставляется возможность просмотреть обучающие видеоролики; получить консультацию топ-менеджеров, представителей органов власти и известных предпринимателей, выбрать наставника; принять участие в онлайн-мероприятии в сфере закупок; программа «выращивания» поставщиков, включающая совокупность мер поддержки (финансовой, правовой, информационной) для участия в закупках под потребности заказчиков.

2. Проверка контрагента. Данный сервер позволяет бесплатно и на основе актуальных официальных данных проверить любое количество компаний на предмет таких характеристик как наличие налоговых правонарушений, категория субъекта в реестре, финансовое состояние, дисквалификация и др., а также получение выписок из государственного реестра и проверки по указанным адресам местонахождения.

3. Запуск рекламы с «Яндекс Бизнесом» посредством личного кабинета (реклама в рамках бюджета настраивается автоматически, но средства направляются только на те площадки, на которых имеется больше клиентов).

4. Центр поддержки инвестиционного кредитования. На данном сервере представлена информация об условиях кредитования – процентная ставка (2,5 % для среднего бизнеса и 4 % для микро- и малого бизнеса), срок (до 10 лет), сумма кредита (от 50 млн руб.), отраслевая принадлежность заемщиков (обрабатывающие производства, переработка сельскохозяйственной продукции, логистика, туристический бизнес), целевое назначение кредита – строительство, реконструкция, модернизация и приобретение объектов капитального строительства; приобретение и модернизация основных средств; выполнение инженерных изысканий, подготовка проектной документации для строительства. Заемщики также могут получить консультацию по программе льготного кредитования, поддержку при направлении проектов в банк.

5. Получение кредита. Для заемщиков предусмотрена возможность направления одной заявки (одного пакета документов) всем банкам (Банк «Дом РФ», «Совкомбанк», «Открытие», «МСП Банк», «Банк Кузнецкий», «ПСБ» и др.), рассматриваемой в течение не более 5 дней. Заявка оформляется автоматически и подписывается электронной подписью.

6. Конструктор документов. Клиентам предлагаются более 100 стандартных актуальных шаблонов документов в области регистрации предпринимательской деятельности, бухгалтерского учета, налогообложения, гражданско-правовых сделок, трудовых отношений, защиты прав и законных интересов, страховых взносов и т. д.

7. Государственные меры поддержки бизнеса. В разрезе 85 субъектов Российской Федерации представлена информация о 350 федеральных и региональных государственных мерах, в т. ч. таких новых мерах, как право досрочного выкупа взятого в лизинг имущества, программа субсидирования найма, предоставление микрозаймов

- «Старт», получение сертификата страны происхождения товаров, безвозвратное финансирование в моногородах, финансирование социального участия социальных предприятий в выставочно-ярмарочных мероприятиях на территории Российской Федерации, подготовка бизнес-проектов и технико-экономических обоснований кластерных проектов предприятий, прием заявлений на вступление в кластер, правовые услуги для резидентов кластера и т. д.
8. Расчет рейтинга бизнеса.
 9. Выбор организационно-правовой формы. С помощью раздела можно зарегистрировать субъекта предпринимательской деятельности, форму организации которого поможет выбрать консультант. Кроме того, субъекту МСП окажут содействие в выборе форм налогообложения, получении оригиналов документов, а также помощь в выборе кодов деятельности по ОКВЭД и др.
 10. Статистика для бизнеса. В данном разделе представлены макроэкономические данные по Российской Федерации, сведения о МСП – числе действующих и ликвидированных субъектов, структуре занятых, средней заработной плате, оборотах и др. В разрезе 85 субъектов РФ раскрыты данные о величине выручки предпринимателей, среднем чеке, числе ИНН.
 11. Законодательный дайджест. В разделе размещены все актуальные изменения федерального и регионального законодательства с подробными пояснениями, которыми можно воспользоваться в формате онлайн 24/7, а также реальные кейсы с примерами с разбором аналогичных ситуаций.
 12. Производственная кооперация и сбыт.

О работе по созданию аналогичных экосистем для субъектов предпринимательской деятельности объявлено и в других странах ЕАЭС, а в некоторых уже реализованы первые шаги в этом направлении. В частности, в Казахстане мобильным приложением iBusiness совместно с мировым лидером индустрии цифровых платежей компаний Visa внедрен суперрап для автоматизации малого и среднего бизнеса, в рамках которого возможно самостоятельное создание интернет-магазина, сочетание онлайн-кассы, системы товаручета, аналитики, CRM и различные способы оплаты. При этом iBusiness доступно для бесплатной загрузки в Google Play и App Store [14; 24].

В условиях функционирования общего рынка товаров и услуг для активизации внешнеэкономической деятельности представляется целесообразным создание на базе Цифровой платформы товаров ЕАЭС электронной торговой площадки для субъектов МП, через которую субъекты МП могли бы предлагать свою продукцию потребителям в других странах. Функционирование такой площадки, с нашей точки зрения, позволит обеспечить взаимную выгоду для субъектов МП всех стран ЕАЭС за счет диверсификации экономик, повысить конкурентоспособность производимой ими продукции, расширить товарные рынки, снизить риски во внешнеэкономической деятельности и др. В рамках функциональных модулей такой площадки можно выделить: бизнес-консультации – консультации по вопросам продвижения продукции, особенностям интернет-торговли, оформлению сопроводительных документов, особенностях оформления электронных документов, сертификации продукции и др.; бизнес-сервисы – поиск иностранных покупателей (база потенциальных покупателей, экспортные ниши), выставок-ярмарок для продвижения продукции, разработки логистики реализации, проведение онлайн-переговоров; электронные витрины и каталог товаров; базу поставщиков и др. Содействие в организации формирования и обновления информации на данной площадке мог бы оказывать Департамент развития предпринимательской деятельности ЕЭК ЕАЭС, а также профильные ведомства стран ЕАЭС.

Заключение

Анализ существующей практики поддержки субъектов МП свидетельствует о сохранении сложностей и проблем реализации предлагаемых мер поддержки, тогда как для существенного повышения активности малого предпринимательства необходима разработка эффективной модели взаимодействия государства и субъектов МП. Поэтому функционирование служб «единого/одного окна», а также экосистемы МСП в условиях цифровизации экономики позволяют облегчить решение многих вопросов, связанных с осуществлением предпринимательской деятельности, от начала регистрации бизнеса и внедрения инноваций до выхода на новые рынки товаров и услуг.

Список цитированных источников

1. Goss D. Small Business, New Technology and Innovation. – London: Routledge, 2015. – 192 p.
2. Patton, D., Bradley F. The Changing Role of Support Agencies and the Development of a More Durable Small Firm Sector, paper presented at Small Business and Enterprise Development Conference, Leeds University, 1995. – 5–6 April.
3. The strategic management styles of small businesses. Small Firms: Contributions to Economic Regeneration. Small Firms' Contributions to Economic Regeneration. Employer Survey: Opportunities for Growth / P. Joyce, C. Seaman, A. Woods– London: London Central Training and Enterprise Council – 1996. – P. 49–58.
4. Bluestone, B. The Deindustrialization of America / B. Bluestone, B. Harrison– NY: Basic Books. Bound J., 1982. – P. 323.
5. McClelland, D.C. The Achieving Society / D. C. McClelland.– NY: Halsted Press, 1961. – 552 p.
6. Cooper, A. C. The role of incubator organizations in funding of growth oriented firms / A. C. Cooper // Journal of Business Venturing. – 1985. – №1 (1). – P. 75-86.
7. DTI, 1992a. Review of DTI business support services; internal review document. – [Electronic resouers]. – Mode access: <https://www.gov.uk/government/organisations/department-of-trade-and-industry>.
8. Ethnic minority business policy in the era of the Small Business Service / D. Smallbone, M. Ram // Environment and Planning C-Government and Policy. – 2002. – № 20 (2). – P. 235–249.
9. Clark, K. Ethnic minority Ethnic minorities in the labour market Dynamics and diversity / K. Clark, S. Drinkwater– Bristol: University of Manchester, 2007. – 75 p.
10. Scott, J. M. Discouraged advisees? The influence of gender, ethnicity, and education in the use of advice and finance by UK SMEs / D. Irwin, J. M., Scott, // Environment and Planning C-Government and Policy. – 2009. – № 27 (2). – P. 230- 245.
11. Статистика ЕАЭС. — [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/integr_i_makroec/dep_stat/union_stat/Pages/default.aspx.
12. Административные процедуры и их влияние на бизнес. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neg.by/novosti/otkrytj/administrativnye-protsedury-i-ikh-vliyanie-na-biznes/>.
13. Бизнес и налоги в Кыргызстане – как открыть малый бизнес, какой подоходный налог, транспортный, НДС и другие. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vne-berega.ru/articles/biznes-za-graniczej/biznes-i-nalogi-v-kyrgyzstane-kak-otkryt-malyj-biznes-kakoj-podokhodnyj-nalog-transportnyj-nds-i-drugie.html>.
14. Информационно-аналитический справочник для предпринимателей Казахстана. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://atameken.kz/uploads/content/files/Информационно-аналитический%20справочник%20для%20предпринимателей%20Казахстана.pdf>.
15. Памятка для предпринимателя: как правильно организовать пищевой бизнес. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zakon.kz/4918707-pamyatka-dlya-predprinimatelya-kak-organizirovat-pishchevoj-biznes/>.
16. Какие изменения произошли в налоговом законодательстве в 2018 году. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zakon.kz/4897093-kakie-izmeneniya-proizoshli-v-nalogo-vo-m.html>.
17. Минэкономики сокращает административные барьеры. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://knews.kg/2016/07/13/minekonomiki-sokrasshaet-administrativnye-barery-dlya-razvitiya-biznesa/>.
18. Счетная палата предлагает внедрить критерии эффективности субсидий по нацпроекту МСП. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/nacionalnye-proekty/7506097>.
19. О государственной программе «Малое и среднее предпринимательство» на 2021-2025 годы». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rce.by/news/news07-1020.phr>.
20. Создать единый центр поддержки бизнеса по принципу «одного окна» предлагают парламентарии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uchet.kz/news/sozdat-edinyj-tsentr-podderzki-biznesa-po-printsipu-odnogo-okna-predlagayut-parlamentarii/>.

21. В Армении запустили службу «единого окна» для предпринимателей. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://news.am/rus/news/492337.html>.
22. Реализация принципа единого окна при оказании информационных услуг населению и субъектам хозяйствования. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://uiip.bas-net.by/structure/l_kg/testing_voting_systems.php.
23. «Единое окно» для бизнеса внедряют в Казахстане. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nalogikz.kz/docs/edinoe-okno-dlya-biznesa-vnedryayut-v-kazahstane.html>.
24. Центры «Мой бизнес»: на каких услугах предприниматели могут сэкономить время? – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/maloe-i-srednee-predprinimatelstvo/7103546>.
25. Возможности веб-портала единого государственного регистра юридических лиц и индивидуальных предпринимателей. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minjust.gov.by/upload/iblock/299/Kisel-M.-Vozmozhnosti-veb-portala-EGR-yuridicheskikh-lits-i-individualnykh-predprinimateley.pdf>.
26. Kakie izmeneniya proizoshli v nalogovom zakonodatel'stve v 2018 godu. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zakon.kz/4897093-kakie-izmeneniya-proizoshli-v-nalogovom.html>.
27. Minekonomiki sokrashchaet administrativnye bar'ery. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://knews.kg/2016/07/13/minekonomiki-sokrashchaet-administrativnye-barery-dlya-razvitiya-biznesa/>.
28. Schetnaya palata predlagaet vnedrit' kriterii effektivnosti subsidij po nastroektu MSP. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/nacionalnye-proekty/7506097>.
29. O gosudarstvennoj programme «Maloe i srednee predprinimatel'stvo» na 2021-2025 gody». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rce.by/news/news07-1020.php>.
30. Sozdat' edinyj centr podderzhki biznesa po principu «odnogo okna» predlagayut parlamentarii. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uchet.kz/news/sozdat-edinyy-tsentr-podderzhki-biznesa-po-printsipu-odnogo-okna-predlagayut-parlamentarii/>.
31. V Armenii zapustili sluzhbu «edinogo okna» dlya predprinimatelej. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://news.am/rus/news/492337.html>.

References

1. Goss D. Small Business, New Technology and Innovation. – London: Routledge, 2015. – 192 p.
2. Patton, D., Bradley F. The Changing Role of Support Agencies and the Development of a More Durable Small Firm Sector, paper presented at Small Business and Enterprise Development Conference, Leeds University, 1995. – 5–6 April.
3. The strategic management styles of small businesses. Small Firms: Contributions to Economic Regeneration. Small Firms' Contributions to Economic Regeneration. Employer Survey: Opportunities for Growth / P. Joyce, C. Seaman, A. Woods – London: London Central Training and Enterprise Council – 1996. – P. 49–58.
4. Bluestone, B. The Deindustrialization of America / B. Bluestone, B. Harrison – NY: Basic Books. Bound J., 1982. – P. 323.
5. McClelland, D.C. The Achieving Society / D. C. McClelland, – NY: Halsted Press, 1961. – 552 p.
6. Cooper, A. C. The role of incubator organizations in funding of growth oriented firms / A. C. Cooper // Journal of Business Venturing. – 1985. – №1 (1). – P. 75–86.
7. DTI, 1992a. Review of DTI business support services; internal review document. – [Electronic resouers]. – Mode access: <https://www.gov.uk/government/organisations/department-of-trade-and-industry>.
8. Ethnic minority business policy in the era of the Small Business Service / D. Smallbone, M. Ram // Environment and Planning C-Government and Policy. – 2002. – № 20 (2). – P. 235–249.
9. Clark, K. Ethnic minority Ethnic minorities in the labour market Dynamics and diversity / K. Clark, S. Drinkwater – Bristol: University of Manchester, 2007. – 75 p.
10. Scott, J. M. Discouraged advisees? The influence of gender, ethnicity, and education in the use of advice and finance by UK SMEs / D. Irwin, J. M. Scott // Environment and Planning C-Government and Policy. – 2009. – № 27 (2). – P. 230–245.
11. Statistika EAES. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/integr_i_makroec/dep_stat/union_stat/Pages/default.aspx.
12. Administrativnye procedury i ih vliyanie na biznes. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neg.by/novosti/otkrytj/administrativnye-protsedury-i-ikh-vliyanie-na-biznes/>.
13. Biznes i nalogi v Kyrgyzstane – kak otkryt' malyj biznes, kakoj podohodnyj nalog, transportnyj, NDS i drugie. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vne-berega.ru/articles/biznes-zagraniczej/biznes-i-nalogi-v-kyrgyzstane-kak-otkryt-malyj-biznes-kakoj-podokhodnyj-nalog-transportnyj-nds-i-drugie.html>.
14. Informacionno-analiticheskij spravochnik dlya predprinimatelej Kazahstana. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://atameken.kz/uploads/content/files/Informacionno-analiticheskij%20spravochnik%20dlya%20predprinimatelej%20Kazahstana.pdf>.
15. Pamyatka dlya predprinimateley: kak pravil'no organizovat' pishchevoj biznes. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zakon.kz/4918707-pamyatka-dlya-predprinimateley-kak.html>.
22. Realizaciya principa edinogo okna pri okazanii informacionnyh uslug naseleniyu i sub"ektam hozyajstvovaniya. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://uiip.bas-net.by/structure/l_kg/testing_voting_systems.php.
23. «Edinoe okno» dlya biznesa vnedryayut v Kazahstane. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nalogikz.kz/docs/edinoe-okno-dlya-biznesa-vnedryayut-v-kazahstane.html>.
24. Centry «Moj biznes»: na kakih uslugah predprinimateli mogut sekonomit' vremena? – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/maloe-i-srednee-predprinimatelstvo/7103546>.
25. Vozmozhnosti veb-portala edinogo gosudarstvennogo registra yuridicheskikh lic i individual'nykh predprinimatelej. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minjust.gov.by/upload/iblock/299/Kisel-M.-Vozmozhnosti-veb-portala-EGR-yuridicheskikh-lits-i-individualnykh-predprinimateley.pdf>

Материал поступил 09.02.2023, одобрен 05.03.2023, принят к публикации 06.03.2023

*Магистр MBA, соискатель кафедры экономики и управления УО «Белорусский государственный экономический университет»
первый заместитель директора ОАО «Завод Спецавтоматика», Минск, Беларусь, e-mail: sspa77@mail.ru*

Аннотация

Рассматриваются проблемы организации деятельности предприятий сектора электронной индустрии. Делается акцент на обеспечение их конкурентоспособности в условиях антивирусных мероприятий в ковидный период, а также в условиях воздействия экономических санкций. Анализируется деятельность предприятий, работающих на рынке производства оборудования, обеспечивающего пожарную безопасность физических и юридических лиц. Приводятся данные о распределении долей рынка в различных сегментах между основными производителями и поставщиками противопожарного оборудования в Республике Беларусь. Предлагается стратегия функционирования белорусских предприятий в условиях возрастания конкуренции со стороны зарубежных производителей оборудования обеспечивающего пожарную безопасность.

Ключевые слова: коронавирус, безопасность, электронные компоненты, конкуренция, антикризисные меры, стратегия, производители.

ORGANIZATION OF ACTIVITIES AND INCREASING THE COMPETITIVENESS OF ENTERPRISES IN THE CONTEXT OF A PANDEMIC AND SANCTIONS

S. A. Hurynovich

Abstract

The problems of organizing the activities of enterprises in the electronic industry sector are considered. Emphasis is placed on ensuring their competitiveness in the context of anti-virus measures during the covid period, as well as under the impact of economic sanctions. The activity of enterprises operating in the market for the production of equipment that ensures fire safety of individuals and legal entities is analyzed. Data are given on the distribution of market shares in various segments between the main manufacturers and suppliers of fire fighting equipment in the Republic of Belarus. A strategy for the functioning of Belarusian enterprises in the face of increasing competition from foreign manufacturers of fire safety equipment is proposed.

Keywords: coronavirus, security, electronic components, competition, anti-crisis measures, strategy, manufacturers.

Введение

В связи с пандемией коронавируса во всем мире возникли трудности управления всеми сферами бизнеса. Сфера промышленности и реального производства оказалась особенно уязвимой в сложившейся ситуации. Главная причина состоит в том, что основная часть сотрудников в секторе занята непосредственно на производстве и работу невозможно выполнять удаленно. Кроме того, учитывая специфику отрасли, не всегда в принципе возможно обеспечить социальное дистанцирование на рабочих местах на производственных предприятиях, складах, в логистике и т. д. В секторе электроники компании-производители начали сокращать производственные операции и отложили выпуск новой продукции из-за разорванных цепочек поставок, поскольку на долю Китая, эпицентра эпидемии, приходится около 85 % от общей стоимости производимых компонентов, используемых в электронных устройствах. При производстве пожарных извещателей и оповещателей также используются чипы и различные электронные компоненты, производимые в Китае, соответственно и в этой области возникли существенные проблемы с выпуском продукции.

Также санкции иностранных государств, таких как страны Евросоюза и США, оказали существенное отрицательное воздействие на поставку электронных компонентов в нашу страну. Нарушены практически все имеющиеся логистические цепочки поставок, и возникла необходимость срочного поиска иных альтернативных путей приобретения электронной и прочей продукции, используемой в различных производственных процессах в Республике Беларусь.

Пожарная безопасность в Республике Беларусь

Область пожарной безопасности является одним из самых ответственных направлений, так как призвана обеспечивать безопасность физических и юридических лиц, а также сохранность их имущества. В связи с этим к данному направлению деятельности в нашей стране, а также во всем мире, предъявляются повышенные требования. В Республике Беларусь данное направление подлежит обязательному лицензированию, а продукция, которая выпускается для установки на всех объектах, подлежит обязательной сертификации, которой предшествует целый ряд испытаний в различных направлениях.

В связи с такими повышенными требованиями в нашей стране существует небольшое количество организаций, производящих противопожарную продукцию.

К основным видам противопожарной продукции относят следующее: приборы приемно-контрольные, извещатели пожарные дымовые (аналоговые или адресные), автономные, тепловые, оповещатели пожарные световые и звуковые. В зависимости от норм объекты оснащаются дымовыми аналоговыми или адресными пожарными извещателями, тепловыми и автономными пожарными извещателями.

В настоящий момент рынок Республики Беларусь в части выпуска адресных пожарных извещателей поделен между двумя организациями ООО «Ровалент» и ООО «Болид» в соотношении 15 к 85. Это объясняется тем, что данный тип продукции имеет высокую стоимость и его производство очень материалоёмко. Кроме того, для разработки данного продукта необходимы большие финансовые вложения.

Если же рассматривать рынок Республики Беларусь в части его оснащения тепловыми, аналоговыми пожарными и автономными извещателями, то следует заметить, что объем данного сегмента противопожарного оборудования составляет около 50 % от общего количества противопожарной продукции.

Производителями данного продукта у нас в стране одновременно являются ОАО «Завод Спецавтоматика», ООО «Технозащита», ЗАО «Фармтехсервис» и РГО «БДПО». Кроме того, дымовые извещатели к нам в страну ввозит российская группа компаний «Рубеж».

Рассмотрим кратко каждое предприятие, их продукт и долю каждого предприятия на рынке продукции в Республике Беларусь.

ОАО «Завод Спецавтоматика» основан в 1974 г. и уже более 40 лет является ведущим предприятием нашей страны по разработке, производству и техническому обслуживанию технических средств автоматической пожарной и охранной сигнализации. Выпускает дымовые аналоговые, автономные и тепловые пожарные извещатели [1].

ООО «Технозащита». Фирма основана в 2003 году и специализируется на разработке и массовом производстве средств пожарной автоматики, а также систем пожарной сигнализации и оповещения о пожаре. Выпускает автономные пожарные извещатели [3].

ЗАО «Фармтехсервис» было основано 1995 году как предприятие, занимающееся разработкой и производством технических средств противопожарной и охранной автоматики. Выпускает дымовые пожарные извещатели [2].

Группа компаний «Рубеж» является российской компанией, которая поставляет на рынок Республики Беларусь дымовые пожарные извещатели.

РГОО «БДПО» образовано в 1956 году. Выпускает автономные пожарные извещатели, а также как ОАО «Завод Спецавтоматика», занимается монтажными работами и проводит техническое обслуживание уже смонтированных систем [4].

Проведена экспертная оценка предприятий-конкурентов Республики Беларусь. По каждому из составляющих направлений деятельности на рынке дана оценка по пятибалльной шкале и полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение предприятий-конкурентов по изготовлению противопожарного оборудования

Показатель	ОАО «Завод Спецавтоматика»	ООО «Технозащита»	ОДО «Фарм-техсервис»	РГОО «БДПО»
Качество обслуживания	4	3	4	4
Ассортимент продукции и услуг	5	5	3	5
Близость к потребителю	4	4	2	5
Качество продукции	5	4	4	4
Уровень цен	4	4	4	4
Итого	22	20	17	22

Примечание – Источник: разработка на основе экспертных оценок

Как видно из данных таблицы 1, ОАО «Завод Спецавтоматика» по своим показателям идет наравне с таким крупным предприятием, как РГОО «БДПО», который имеет очень развитую сеть по всей республике.

Далее рассмотрим долю рынка по продажам каждого предприятия по выпускаемому виду продукции. Начнем с дымового пожарного извещателя (рисунок 1).



Рисунок 1 – Доли рынка по продажам дымового пожарного извещателя

Как видно из рисунка 1, большую долю рынка в реализации данного продукта занимает группа компаний «Рубеж». Оставшуюся часть делят поровну между собой ОАО «Завод Спецавтоматика» и ЗАО «Фармтехсервис».

Рынок реализации автономного пожарного извещателя нам представлен следующим образом (рисунок 2).

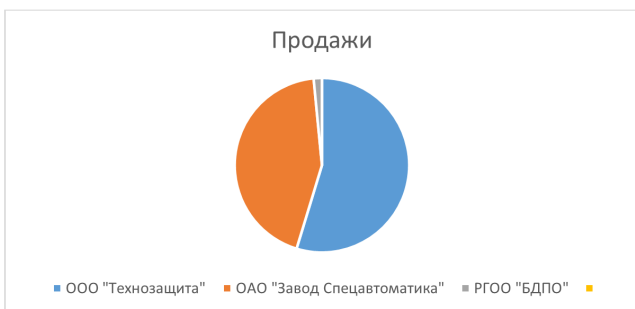


Рисунок 2 – Доли рынка по продажам автономного пожарного извещателя

Как видно из рисунка 2, лидирующую роль в реализации автономных пожарных извещателей занимает ООО «Технозащита». ОАО «Завод Спецавтоматика» также занимает большой сегмент рынка, а вот РГОО «БДПО» на этом рынке имеет незначительные позиции.

И последним мы рассмотрим рынок реализации тепловых пожарных извещателей, который представлен на рисунке 3.

Из рисунка 3 мы видим, что при реализации теплового пожарного извещателя лидирующую роль занимает ОАО «Завод Спецавтоматика».



Рисунок 3 – Доли рынка по продажам теплового пожарного извещателя

До недавнего времени рынок реализации пожарных извещателей на территории Республики Беларусь был представлен только белорусскими компаниями. Однако после вступления в действие технического регламента Евразийского экономического союза «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения» (ТР ЕАЭС 043/2017), который вступил в действие в 2020 году, появилась такой сильный игрок, как группа компаний «Рубеж», которая стремительно завоевывает рынок нашей страны [5]. Основным фактором такого «захвата» рынка является относительно недорогая стоимость продаваемой продукции. Данная организация является крупнейшей в своем сегменте на территории Российской Федерации, имеет большие производственные мощности и количество выпускаемой ею продукцией в несколько раз превышает количество, выпускаемое всеми белорусскими производителями. Это и повлияло на стремительный вход данной компании на белорусский рынок. Однако стоит отметить тот фактор, что белорусские производители выпускают более качественный товар, выполненный из более качественной пластмассы, и используют более дорогие электронные компоненты.

Следует сказать, что в ковидных условиях большинство субъектов хозяйствования, приобретающих противопожарную продукцию, оказались ограниченными в финансовом плане и в этот период предпочитают покупать более дешевую продукцию, которая соответствует минимальным техническим требованиям. Именно в этот период вхождение группы компаний «Рубеж» на наш рынок оказалось наиболее успешным.

Как же быть белорусским производителям в данных условиях и какие необходимо предпринять меры для уменьшения себестоимости продукции и удержания своей позиции на рынке в сложных условиях пандемии.

В сложившейся ситуации может произойти так, что в случае вытеснения предприятия с рынка или существенного уменьшения объема продаж предприятие окажется в кризисной ситуации. Станет невыгодно производить продукцию, так как при уменьшении ее производства себестоимость единицы будет только возрастать. В данном случае организация будет вынуждена свернуть свое производство и прекратить деятельность. Во избежание наступления таких последствий организация уже на данном этапе обязана разработать и ввести в действие пакет антикризисных мер, стабилизирующий ее деятельность и не позволяющий ее уходу с занимаемой ниши на рынке. В более долгой перспективе необходимо разработать такие мероприятия, которые позволят вытеснить с рынка конкурентов или существенно уменьшить их долю.

Некоторые направления предпринимаемых мер, которые переросли в антикризисную стратегию, рассмотрим на примере деятельности ОАО «Завод Спецавтоматика».

В своей деятельности предприятие использует элементы диверсификации как важную составляющую концепции, о чем можно судить из показанных выше рисунков. Видно, что предприятие присутствует в той или иной доле реализации продукции во всех рассматриваемых сегментах на рынке:

- 30 % дымовой извещатель;
- 40 % автономный извещатель;
- 70 % тепловой извещатель.

Использование диверсификации неоднократно показывало свое практическое подтверждение как в части изменения объема продаж в определенном сегменте рынка, так и в части реагирования на изменения законодательства в области пожарной безопасности, когда возникала необходимость массового производства одного из видов продукции. За счет этого деятельность предприятия всегда была прибыльной и подвергалась своевременной корректировке для недопущения развития кризисной ситуации.

Около пяти лет назад ОАО «Завод Спецавтоматика» занимало лидирующую роль по продажам всех извещателей на территории

Республики Беларусь. Но именно в тот период организационно-конкуренты и расширили сферу своего влияния на данном рынке. Это было связано с приобретением организациями нового оборудования и сокращением сотрудников, что снизило издержки и уменьшило себестоимость продукции. В связи с этим руководством завода был сделан анализ сложившейся ситуации и начали предприниматься определенные компенсирующие антикризисные меры.

В состав всех извещателей, производимых предприятием, входят импортные компоненты, начиная с пластмассы и заканчивая электронными комплектующими. Ранее все это приобреталось в Республике Беларусь у крупных оптовых компаний. В имеющихся условиях это оказалось неприемлемым, так как существенно увеличивало себестоимость продукции и делало ее неконкурентоспособной. В этой связи была разработана и применена на практике стратегия издержек в части контроля и изменения прямых и косвенных расходов при производстве продукции. Уменьшены расходы, связанные с приобретением сырья, материалов, товаров и иных материально-производственных запасов. Кроме того, применена такая составляющая стратегии, как внедрение эффективного и недорогостоящего оборудования и современных технологий.

На практике это выглядело следующим образом.

Был заключен ряд контрактов с российскими поставщиками на приобретение электронных компонентов, что снизило их закупочную цену. Также частично был обновлен парк технологического и пресового оборудования, что позволило существенно уменьшить затраты на производство продукции и увеличить ее выпуск.

Все эти меры позволили остановить падение продаж и зафиксировать свою долю в общем объеме рынка.

Все это способствует дальнейшей работоспособности предприятия, однако необходимо было предпринимать и дальнейшие действия для увеличения своей доли на рынке.

Как было сказано ранее, группа компаний «Рубеж» смогла войти на рынок только благодаря своей стоимости на продукцию из-за ее более низкого качества, которое, однако, соответствует техническим параметрам, а также возможности большого производства. Остальные рассматриваемые организации-производители имеют примерно одинаковое качество.

В таких условиях ОАО «Завод Спецавтоматика» необходимо разработать стратегию развития, то есть определить совокупность способов и действий, направленных на достижение поставленных целей и воплощение задач. Это план, рассчитанный на продолжительный период времени, без детализации этапов, приемов и тактических действий.

Данная стратегия должна была при имеющейся стоимости продукции ее существенно снизить и сделать более конкурентоспособной и соответственно продаваемой. Для уменьшения себестоимости продукции было принято решение о налаживании деловых отношений с китайскими партнерами по поставке электронных компонентов.

Китай находится в центре многих мировых производственно-сбытовых сетей в качестве одного из основных производителей продуктов с высокой добавленной стоимостью и их компонентов, крупного потребителя мировых сырьевых и промышленных товаров, а также крупного рынка потребительских товаров. Карантинные меры в 2020–2021 годах привели к падению промышленного производства в стране на 13,5 %, уменьшению импорта на 4 % в долларовом эквиваленте, а экспорта – на 17 % по сравнению с предыдущим годом. В сложившихся условиях у большинства организаций-производителей электронных компонентов возникли сложности с производством, что существенно отразилось на отпускной цене. Произошел резкий скачок цен. Это незамедлительно отразилось на конечной стоимости товара. Некоторые производители в Беларуси имели запас комплектующих и за счет этого удержались на рынке.

У ОАО «Завод Спецавтоматика» также имелся небольшой запас, однако он израсходовался, и комплектующие также пришлось покупать уже по более новым высоким ценам.

В ходе работы с поставщиками из Китая было получено понимание такого факта, что при одновременном заказе и оплате крупной партии (китайские поставщики без предоплаты не работают) можно существенно снизить стоимость электронных компонентов. Рассматривался вопрос о приобретении годового объема комплектующих.

Был, конечно, риск, что продукция может не попасть в Республику Беларусь, а денежные средства не дойти до своего адресата. Кроме того, существенные опасения вызывал и тот факт, что в Китае, как и во всем мире, присутствуют недобросовестные продавцы, которые могут поставить продукт ненадлежащего качества, который вернуть будет невозможно. При приобретении большой партии это могло привести к катастрофе, остановке деятельности предприятия и как следствие – к банкротству. На начальном этапе это останавливало руководство. Однако,

была проделана большая работа по поиску добросовестных поставщиков и принято решение о покупке большой партии комплектующих.

Для реализации данного плана были необходимы большие денежные средства (речь идет о нескольких сотнях тысяч долларов). Наблюдательный совет предприятия решил частично использовать свои оборотные средства, а также был получен кредит в банке с возможностью его поэтапного погашения. Как залог для банка были оформлены основные средства в виде производственных помещений и ликвидного дорогостоящего оборудования.

Также была детально разработана логистическая цепочка доставки, которая осуществлялась морским транспортом вместо железнодорожного. Это, конечно, существенно увеличило время доставки, однако значительно снизило стоимость логистики.

Совокупность таких действий в рамках реализации составляющих стратегии развития предприятия привела к тому, что на данный момент в пользовании ОАО «Завод Спецавтоматика» имеется годовой запас электронных компонентов по цене намного ниже, чем у конкурентов, что существенно повлияет на передел рынка реализации пожарных извещателей в Республике Беларусь.

Кроме того, принята дополнительная мера по снижению себестоимости продукции – это внесение изменений в процесс литья пластмассы. Предприятием приобретены новые литейные машины с электронным программированием, а вместо девяти человек-операторов средней квалификации – в данный момент работают четыре человека более высокой квалификации в две смены. Это позволило получать литье более высокого качества без брака и его переработки, а также снизило издержки по выплате заработной платы сотрудникам.

Также в рамках реализации стратегии развития в настоящий момент разрабатываются новые автономные и дымовые пожарные извещатели, которые по техническим параметрам превосходят продукцию конкурентов.

Заключение

Несмотря на сложности в изготовлении и приобретении электронных компонентов, вызванные ковид и его последствиями, а также экономическими санкциями, производственная деятельность предприятий Республики Беларусь имеет все предпосылки для успешного продолжения. В возникших условиях и в зависимости от принимаемых руководством антикризисных решений у более сильных и грамотных игроков в области пожарной безопасности есть все шансы вытеснить более слабых и захватить их долю рынка.

На рынке Беларуси появились зарубежные, прежде всего, российские производители противопожарного оборудования с более низкими ценами, чем белорусские аналоги. Их преимущество обусловлено значительно большими объемами производства и, как следствие, более низкой себестоимостью изделий. Поэтому для успешной конкуренции с новыми игроками на отечественном рынке противопожарного оборудования белорусским предприятиям, работающим в этой сфере, необходимо искать новые организационные формы сотрудничества, например, создание профильного концерна или как минимум профессиональных ассоциаций.

Список цитированных источников

1. Официальный сайт ОАО «Завод Спецавтоматика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://specavtomatika.by>. – Дата доступа: 25.10.2022.
2. Официальный сайт ЗАО «Фармтехсервис» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://farm.by>. – Дата доступа: 01.11.2022.
3. Официальный сайт ООО «Технозащита» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tz.by>. – Дата доступа: 02.11.2022.
4. Официальный сайт РГОО «БДПО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bdpo.by>. – Дата доступа: 05.11.2022.
5. Официальный сайт группы компаний «Рубеж» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rubezh.ru>. – Дата доступа: 12.11.2022.

References

1. Oficial'nyj sajt ОАО «Zavod Specavtomatika» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://specavtomatika.by>. – Data dostupa: 25.10.2022.
2. Oficial'nyj sajt ЗАО «Farmtekhservis» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://farm.by>. – Data dostupa: 01.11.2022.
3. Oficial'nyj sajt ООО «Tekhnoszashchita» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://tz.by>. – Data dostupa: 02.11.2022.
4. Oficial'nyj sajt RGOO «BDPO» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://bdpo.by>. – Data dostupa: 05.11.2022.
5. Oficial'nyj sajt gruppy kompanij «Rubezh» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://rubezh.ru>. – Data dostupa: 12.11.2022.

12.11.2022, 10.02.2023,
19.02.2023

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЛЕСХОЗА НА ОСНОВЕ СБАЛАНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В. П. Демидовец

К. э. н., доцент, заместитель декана по учебной и научной работе инженерно-экономического факультета, доцент кафедры менеджмента, технологий бизнеса и устойчивого развития УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: demvik2010@yahoo.com

Реферат

В современных условиях актуальным инструментом управления является система стратегического планирования, позволяющая обеспечить устойчивое развитие учреждений лесного хозяйства и повышение их доходности за счет оптимизации использования лесосырьевых ресурсов. Неистощительное лесное хозяйство, многоцелевое лесопользование, дальнейшая коммерциализация деятельности лесохозяйственных учреждений и диверсификация источников их финансирования предполагает разработку новых подходов при планировании и оценке стратегии устойчивого развития учреждения лесного хозяйства (лесхоза).

В статье предлагается решение проблемы оценки лесного менеджмента посредством применения сбалансированной системы показателей (ССП), адаптированной к условиям работы лесхозов Беларуси. В рамках исследований разработана система индикаторов, позволяющих осуществить комплексную оценку стратегии лесхоза с учетом экономических, экологических и социальных интересов общества, собственника лесных ресурсов (государства) и сотрудников организации при соблюдении принципов «зеленой» экономики.

Ключевые слова: неистощительное лесное хозяйство, многоцелевое лесопользование, коммерциализация, лесхоз, стратегия, оценка, сбалансированная система показателей.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ASSESSING THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT FOR FORESTRY ON THE BASIS BALANCED SCORECARD

V. P. Dzmidavets

Abstract

In modern conditions, a relevant management tool is a strategic planning system that allows to ensure the sustainable development and profitability of forestry enterprises by optimizing the use of forest resources. Sustainable forestry, multi-purpose forest management, further commercialization of the activities of forestry enterprises and diversification of their funding sources require the development of new approaches in planning and evaluating the sustainable development strategy of a forestry enterprise (leshoz).

The article proposes a solution to the problem of assessing forest management through the use of a balanced scorecard (BSC) adapted to the working conditions of the forestry enterprises in Belarus. As part of the research, a system of indicators has been developed that allows for a comprehensive assessment of the strategy of the forestry enterprise, taking into account the economic, environmental and social interests of society, the owner of forest resources (the state) and employees of the organization, while observing the principles of the "green" economy.

Keywords: sustainable forestry, multi-purpose forest management, commercialization, forestry, strategy, assessment, balanced scorecard.

Введение

В современных условиях нарастающих внешних вызовов наиболее актуальным и востребованным инструментом в практике управления выступает система стратегического планирования, которая позволяет обеспечить устойчивое развитие лесного хозяйства и повышение его доходности за счет рационального использования древесных и недревесных ресурсов леса при соблюдении принципов «зеленой» экономики.

Лес – это не только наше богатство, лесной капитал, но и природная среда, создающая необходимые условия для комфортного проживания и развития человека, устойчивого развития регионов и страны в целом. Лесное хозяйство как отрасль играет очень важную роль в решении проблем устойчивого развития, так как обеспечивает воспроизводство лесных ресурсов, а соответственно и природной среды. Специфика работы лесохозяйственных учреждений (лесхозов) существенно отличается от экономики обычного предприятия. В структуре лесхозов выделяется бюджетная и коммерческая виды деятельности, которые требуют комплексной оценки. Соблюдение принципа устойчивого (неистощительного) природопользования ограничивает размеры заготовки древесины, а соответственно и собственные средства лесхоза, что вынуждает государство частично датировать деятельность данных организаций. Частичное решение проблемы самофинансирования лесхозов возможно за счет дальнейшей коммерциализации лесного хозяйства, многоцелевого лесопользования и диверсификации источников финансирования лесохозяйственных издержек. Однако сохранение дополнительного бюджетного финансирования лесного хозяйства является целесообразным с учетом целей устойчивого развития,

так как создает гарантии безопасности для общества в области сохранения и приумножения природного капитала [1]. Поэтому планирование и оценку стратегий развития лесхозов необходимо осуществлять с учетом комплексного ведения лесного хозяйства, выполняемых ими экономических, экологических и социальных функций. Для проведения комплексной оценки деятельности лесохозяйственных учреждений может быть использована модель сбалансированной системы показателей (ССП), адаптированная к условиям ведения лесного хозяйства Беларуси.

Основные результаты исследований

В основе эффективного управления организацией лежит процесс разработки долгосрочной стратегии развития, ее адаптация к специфике деятельности предприятия, отраслевой среды. В настоящее время многие отечественные организации, в том числе и в лесном секторе, испытывают определенные сложности в обеспечении устойчивого развития бизнеса на рентабельной основе. Главным образом это определяется усилением конкуренции на внутреннем и внешнем рынках сбыта, а также существующими внешними вызовами и угрозами. В данных условиях экспортоориентированность для большинства предприятий и организаций Беларуси является приоритетной задачей не только в целях повышения объема реализации продукции и роста доходности, но и накопления стратегического опыта.

В настоящее время применение инструментов стратегического менеджмента обеспечивает возможность поиска альтернативных направлений развития и предоставляет предприятиям дополнительные конкурентные преимущества, заключающиеся в более быстрой

адаптации лесного бизнеса к требованиям рынка. Реализация основных принципов организации лесного хозяйства (неистощительное и многоцелевое пользование лесом, коммерциализация лесхозов, развитие лесопромышленного предпринимательства и др.) требует применения инновационных технологий лесного менеджмента. Наиболее востребованным инструментом управления сегодня является система стратегического планирования, которая также должна быть адаптирована к особенностям экономики лесного хозяйства и лесной промышленности. Использование при этом модели сбалансированной системы показателей и автоматизация процесса позволят вывести отрасль на новый уровень с точки зрения качества планирования и реализации стратегии устойчивого развития предприятий и организаций лесного сектора экономики.

В современном понимании сущность стратегического управления сводится к разработке и реализации долгосрочной стратегии развития организации, которая охватывает все подсистемы менеджмента (производство, управление, финансы, маркетинг, персонал, НИОКР и др.) и направлена на комплексное и рациональное использование ресурсов, обеспечивая получение максимального эффекта исходя из имеющегося потенциала организации и возможностей рынка. В организационном плане стратегия представляет собой формулирование руководством долгосрочных намерений (миссии), целей организации, а также выбор наиболее перспективных направлений развития, обеспечивающих укрепление конкурентных позиций и распределение стратегических ресурсов в соответствии с ее целями и требованиями рынка, собственника. Следовательно стратегия – это план действий менеджеров по обеспечению устойчивого развития организации (предприятия).

М. Портер выделяет три основные конкурентные стратегии, ориентированные на защиту организации от влияния внешних угроз [2]:

- стратегия лидерства на основе издержек, заключающаяся в создании ресурсосберегающего производства и предложение стандартной продукции по более низким ценам (применяется на рынках с невысокой покупательской способностью населения);
- стратегия дифференциации – предполагает выпуск продукции высокого качества и в широком ассортименте с уникальными или улучшенными характеристиками и свойствами (используется на рынках с высокой покупательной способностью);
- стратегия фокусирования – ориентирована на производство специализированной продукции под требования целевой группы покупателей (реализуют небольшие компании).

В лесном комплексе конкурентные стратегии формируют в основном коммерческие предприятия лесной промышленности, занятые в сфере заготовки и переработки древесины, а также продуктов побочного пользования лесом. В отношении государственных лесохозяйственных учреждений (лесхозов) действуют другие правила и приоритеты. Стратегия лесхоза предполагает планирование мероприятий по лесовыращиванию и рациональному использованию древесных и недревесных ресурсов леса с учетом лесохозяйственного проекта и размера выделенных средств из республиканского бюджета на финансирование расходов на ведение лесного хозяйства. Тем не менее, несмотря на различия, на стратегию лесхоза также воздействуют рыночные факторы. На внутреннем рынке древесного сырья главным конкурентным фактором является цена и лесхозы, достигнувшие наибольших результатов в ресурсосбережении в процессе ведения лесного хозяйства, смогут предложить покупателям более низкие цены на продукцию лесного хозяйства, продавать больше и увеличивать свои показатели доходности. Таким образом, в лесном хозяйстве, как сырьевой отрасли, конкурентные стратегии также работают (имея свою специфику) и наиболее привлекательным подходом является применение стратегии лидерства на основе издержек в связи с преобладанием на внутреннем рынке покупателей с невысоким уровнем доходов.

Однако, учитывая сочетание бюджетной (лесное хозяйство) и коммерческой (лесозаготовки, деревообработка, побочное пользование лесом) видов деятельности, особенности планирования и оценки стратегии лесхоза должны отличаться от принципов работы коммерческих организаций. Важно обеспечить такие условия работы, при которых лесхозы будут стремиться увеличивать свою доходность за счет использования ресурсосберегающих технологий лесовыращивания и рационального природопользования, а не за

счет сокращения количества проводимых лесохозяйственных мероприятий. Минимизирует данный риск наличие дополнительного финансирования расходов на ведение лесного хозяйства из республиканского бюджета, а также проектирование лесохозяйственных мероприятий согласно требованиям лесохозяйственного проекта (обязателен для исполнения лесхозом).

Механизм формирования и реализации стратегии развития организации (лесхоза) должен включать следующие основные элементы:

- разработка стратегического плана с рассмотрением различных сценариев развития рынка лесной продукции (STEP-, SWOT-, ABC-анализ и др.);
- внедрение модели сбалансированной системы показателей (BSC) при реализации запланированной стратегии развития организации (лесхоза);
- создание профессиональной службы маркетинга и разработка эффективной маркетинговой стратегии продвижения продукции лесхоза;
- внедрение системы бережливого производства: оптимизация лесохозяйственных, лесопромышленных и управленческих издержек на основе рациональной логистики;
- создание сетевых структур управления и интеграция с другими предприятиями отрасли, а также системное управление проектами развития учреждений лесного хозяйства и коммерческих предприятий лесопромышленного комплекса;
- кадровое обеспечение стратегического процесса и стимулирование работников по результатам достижения ключевых показателей эффективности стратегии развития лесхоза.

Традиционное измерение эффективности деятельности организации, сосредоточенное только на финансовых показателях, полученных из систем бухгалтерского учета, устарело и не дает полной картины состояния дел в организации. Сегодня появилась необходимость в более совершенных и эффективных способах оценки деятельности организации и ее стратегии развития, в том числе обеспечения связи с целями устойчивого развития. Современные подходы в стратегическом менеджменте призывают обращать внимание на такие нефинансовые составляющие, как персонал, бизнес-процессы, инновации, отношения с потребителями, экологические, социальные и другие факторы. Поэтому внедрение модели сбалансированной системы показателей для оценки стратегии лесхоза позволит обеспечить соответствующие взаимосвязи между коммерческими (экономическими), экологическими и социальными интересами общества, собственника лесных ресурсов (государства), покупателей продукции и сотрудников организации (лесхоза).

Сбалансированная система показателей (Balanced Score Card) – это механизм последовательного доведения до сотрудников стратегии и целей развития организации (лесхоза), а также контроль их достижения через планируемые ключевые показатели эффективности. Сбалансированная система показателей – это система стратегического управления организацией на основе измерения и оценки ее эффективности по набору оптимально подобранных показателей, отражающих все аспекты деятельности организаций лесного хозяйства, как финансовые, так и нефинансовые. Название системы отражает равновесие, которое сохраняется между краткосрочными и долгосрочными целями, финансовыми и нефинансовыми показателями, основными и вспомогательными параметрами, а также внешними и внутренними факторами деятельности организации [3].

Формирование и внедрение сбалансированной системы показателей при оценке работы государственных лесохозяйственных учреждений (лесхозов) Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь должно осуществляться параллельно с процессами автоматизации систем управления подведомственными организациями, что позволит увеличить оперативность принятия управленческих решений, результативность и эффективность ведения лесного хозяйства и качество лесного менеджмента за счет применения современной системы стратегического планирования. Разработка и внедрение данной методики оценки позволит составлять рейтинг лесхозов по реализации целей устойчивого развития.

В настоящее время примеров успешного применения сбалансированной системы показателей на практике не так много, т. к. при внедрении модели приходится сталкиваться с различными проблемами.

Наиболее серьезные проблемы чаще всего касаются неправильной трактовки методологии или организационных моментов, трудоемкость разработки ССП и отсутствие недорогих и эффективных программных продуктов.

Сбалансированная система показателей рассматривается как стратегический инструмент обеспечения устойчивого развития лесного комплекса, направленный на достижение оптимального сочетания социальных, экологических, экономических факторов и должного компромисса между существующими приоритетами.

Среди моделей или подходов к созданию сбалансированной системы показателей выделяются следующие авторские точки зрения: Р. Каплана и Д. Нортон [3]; Х. Фридага и В. Шмидта [4]; Н. Горана, Ж. Роя и М. Веттера [5]; Х. Рамперсада [6].

Несмотря на многообразие форм проявления ССП, все они основываются на шести разработанных функциональных стандартах – элементах, соответствие которым обязательно. Среди них: перспективы – компоненты, обеспечивающие декомпозицию стратегии с целью ее реализации; стратегические цели – направления осуществления стратегии; показатели – определенные действия, необходимые для достижения целей; целевые значения – количественные выражения уровня, которому должен соответствовать показатель; стратегическая карта – график, отражающий причинно-следственные связи между отдельными стратегическими целями; стратегические инициативы – проекты или программы, способствующие реализации выбранных ориентиров [3–8].

Принципиальные различия подходов имеют под собой четыре основных критерия: формат участия субъектов лесных отношений в разработке и внедрении стратегии; формат представления самой стратегии; процесс каскадирования (декомпозиции) ССП; очередность этапов построения системы показателей.

Первый подход к построению сбалансированной системы показателей связан с родоначальниками данной концепции Р. Капланом и Д. Норманом. Отправной точкой, согласно их методологии, являются: миссия, базовые ценности, видение и стратегия организации (отрасли), которая описывает ее «программу», а сбалансированная система показателей – ее реализацию. Авторы модели подчеркивают, что «... приведение индивидуальных целей и задач в соответствие с общей концепцией и стратегией ... – процесс длительный и сложный» [3]. В связи с этим предлагают использовать для этих нужд несколько взаимосвязанных механизмов: информационные и образовательные программы, программы постановки целей, взаимосвязь системы вознаграждения со стратегией отрасли.

Процесс образования ССП лесного комплекса в рамках подхода Каплана-Нортон предусматривает выполнение следующих трех этапов:

- 1) формулирование или подтверждение миссии лесного комплекса, ее уточнение на предмет всестороннего отражения направлений устойчивого развития отрасли (социальной, экологической, экономической составляющих);
- 2) разработка ССП организации (лесхоза):
 - определение ключевых аспектов деятельности организации (лесхоза);
 - детализация миссии через определение стратегических (главных) целей-ориентиров, соответствующих показателей и их прогнозных значений для лесхоза;
 - выявление ключевых факторов успеха;
 - разработка системы уточняющих и содействующих реализации ключевых факторов успеха целей и соответствующих им показателей, определение плановых значений на ближайшую и отдаленную перспективы, выявление причинно-следственных связей;
 - формулирование действий, мероприятий, отражающих фокус усилий, которые приведут к достижению промежуточных и стратегических ориентиров, образование проектов или программ действий, их ранжирование по степени значимости;
- 3) декомпозиция (структурирование) ССП организации (лесхоза) на уровень отдельных исполнителей при адаптации ее содержания к их особенностям. Этот этап содействует пониманию исполнителей, как их текущие действия влияют на стратегические цели деятельности организации (лесхоза) и наоборот. Единое понимание общепромышленных ориентиров обязательно с точки зрения устойчивого развития лесной отрасли.

Анализируя процедуру построения ССП в рамках подхода Каплана-Нортон, видно, что формирование общекорпоративной (отраслевой) системы показателей осуществляется, преимущественно, в одностороннем порядке и является обязанностью ведущих сотрудников государственных органов управления лесным комплексом. Прочие заинтересованные лица к участию в данном процессе практически не привлекаются. Свои ССП они создают сами и финансируют за счет своих личных бюджетов. Стратегические проекты разрабатываются в расчете на каждую перспективу и в формате сбалансированной системы показателей не оформляются.

Согласно подходу Фридага-Шмидта, в центре внимания находится интеллектуальный капитал, который в настоящее время приобретает все большую значимость и становится движущей силой развития [4]. На этом фоне личные цели участников лесных отношений становятся отправной точкой ССП отрасли. Совместными усилиями люди определяют общие ориентиры, описывают стратегические цели, области развития потенциалов, содержание тематических программ, обеспечивающих реализацию выбранных направлений. Базовые ценности и личные цели посредством достигнутых договоренностей приводят к установлению взаимопонимания между всеми заинтересованными сторонами. Формулируется единое мнение относительно конечных состояний управляемого объекта. Индивидуальная мотивация постепенно отодвигается на второй план, ее сменяет осознание важности и необходимости совместного, коллективного движения в выполнении поставленных целей.

Третьим подходом, близким по содержанию к модели Р. Каплана и Д. Нортон, является позиция Н. Горана, Ж. Роя и М. Веттера. Принципиально их взгляды различаются только при оценке процесса декомпозиции ССП. По их мнению, разработка планов конкретных действий, формирование стратегических проектов должны осуществляться управленческим персоналом соответствующих подразделений (группой участников лесных отношений, например, ассоциацией лесопромышленников) и проводится уже после утверждения корпоративной (отраслевой) ССП [5], что обусловлено лучшим пониманием ими специфики работы отрасли.

Четвертый подход к построению ССП связан с именем Х. Рамперсада [6], который разработал и предложил миру новую целостную концепцию управления развитием и переменами, называемую универсальной системой показателей (Total Performance Scorecard). Ее можно определить как систематический процесс непрерывного, последовательного и регулярного совершенствования, развития и обучения, направленный на устойчивый рост результатов деятельности сотрудников и организации. Точкой отсчета в модели считаются цели личности и восприятие человеком своей собственной индивидуальности. «Действительно, если целям личности придается первоочередное значение, сотрудничество людей будет более осознанным, они будут лояльны и преданны организации, что, в свою очередь, усилит их мотивацию и вселит чувство удовольствия и вдохновения от выполняемой работы» [6]. Этот этап автор считает жизненно необходимым «... для достижения устойчивого организационного и стратегического развития» [6], поскольку способствует максимизации уровня ответственности и преданности персонала.

При этом, заметим, что по этому вопросу Х. Рамперсад продвинулся несколько дальше, чем Х. Фридаг и В. Шмидт. Если последние не настаивают на создании личной ССП, то в концепции Х. Рамперсада она занимает одно из ведущих мест. Этапы разработки и формат представления отраслевой ССП идентичен варианту Р. Каплана и Д. Нортон.

По нашим исследованиям, учитывая особенности функционирования отечественного лесного комплекса, среди рассмотренных моделей ССП для учреждений лесного хозяйства может быть использована централизованная модель (Каплан-Нортон), для предприятий концерна «Беллесбумпром» – ассоциативная модель ССП (Рамперсад), для частных независимых компаний лесного комплекса – децентрализованная модель ССП.

Успешные организации в своих моделях сбалансированной системы показателей учитывают и оценивают, как правило, четыре основные перспективы:

- управление клиентами;
- управление финансами,
- внутренние бизнес-процессы,
- обучение и развитие [7].

Для построения системы стратегического управления необходимо декомпонировать (разбить, структурировать) стратегию на конкретные стратегические цели, детально отображающие различные стратегические аспекты деятельности организации. Для графического отображения взаимосвязи стратегических целей и перспектив организации применяют стратегическую карту. Достижение стратегических целей предполагает реализацию соответствующих стратегических мероприятий, обоснованных в стратегическом плане развития организации. Целевые значения показателей целесообразно прогнозировать на длительный период времени [8].

Оптимальным соотношением числа целевых значений показателей стратегии рекомендуется следующее [3–8]: финансы – 4-5 показателей (22 %); клиенты – 4-5 показателей (22 %); внутренние бизнес-процессы – 8-10 показателей (34%); обучение и развитие – 4-5 показателей (22%). Как можно увидеть из соотношения, около 80 % показателей должны быть нефинансовыми. Если говорить об оптимальном количестве показателей управленческого контроля, то для этого существуют некие стандарты с разбивкой по уровням: верхний уровень (для отрасли в целом) – 15–20 показателей; уровень организации – 10–15 показателей; уровень отделов – 5–10 показателей; персональный уровень – 1–5 показателей.

В настоящее время стратегические планы развития лесхозов не разрабатываются и стратегия (стратегические цели) четко не прописаны в бизнес-планах. Поэтому внедрение методики потребует на перспективу совершенствования системы планирования и управления предприятиями лесного хозяйства, кадрового менеджмента, проведения дополнительных исследований для обоснования целевых значений ключевых показателей эффективности работы отрасли в целом и лесхозов в частности. Руководству отрасли необходимо будет разработать и утвердить единые подходы применения методики для проведения оценки стратегии устойчивого развития лесхозов, государственных производственных лесохозяйственных объединений (ГПЛХО) и Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь в целом. Единая система сбалансированных показателей позволит составлять рейтинг лесхозов по уровню выполнения целей устойчивого развития, что повысит инвестиционную привлекательность лесной отрасли в обозримой перспективе. Для внедрения системы требуется обновление используемого программного обеспечения для автоматизированного контроля результатов. Поэтому практическая реализация предлагаемой модели ССП потребует дополнительных научных исследований для дальнейшей адаптации модели к особенностям работы предприятий лесного хозяйства, а также инвестиций в информационные технологии в целях автоматизации процесса оценки, контроля изменений целевых показателей эффективности и принятия экономически обоснованных управленческих решений по реализации стратегии развития лесного хозяйства в соответствии с целями устойчивого природопользования и принципами «зеленой» экономики.

Заключение

Система сбалансированных показателей позволяет заполнить существующий во многих организациях пробел несогласованности действий между разработанной стратегией и ее использованием в планировании и оценке эффективности достигаемых результатов деятельности. Использование модели ССП при оценке стратегии развития лесхоза позволяет сбалансировать выполнение стратегических целей с учетом экономических, экологических и социальных интересов собственника лесных ресурсов (государства) и сотрудников организации (лесхоза). При проведении оценки может быть использована универсальная система индикаторов, позволяющих осуществить оценку стратегии развития лесхоза и составить рейтинг лесхозов в структуре Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь по критериям качества лесного менеджмента и устойчивого ведения лесного хозяйства. Нужно осознавать, что любые изменения в стратегии потребуют соответствующих изменений в системе ССП. Вследствие этого необходимо будет постоянно управлять процессом изменения стратегии и совершенствовать систему сбалансированных показателей с учетом принципов «зеленой» экономики.

Список цитированных источников

1. Лесное управление = Forest governance / А. В. Неверов [и др.], под общ. ред. А. В. Неверова. – Минск : Печатковская школа, 2014. – 400 с.
2. Портер, М. Курс МВА по стратегическому менеджменту / М. Портер, Дж. Самплер, С. Прахалад. – М. : Альпина Паблишер, 2002. – 608 с.
3. Каплан, Р. С. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию / Р. С. Каплан, Д. П. Нортон. пер. с англ. М. Павловой. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Олимп-Бизнес, 2008. – 320 с.
4. Фридаг, Х. Сбалансированная система показателей / Х. Фридаг, В. Шмидт ; пер. с нем. М. В. Лапшинова. – М. : Омега-Л, 2006. – 144 с.
5. Рой, Ж. Оценка эффективности деятельности компании. Практическое руководство по использованию сбалансированной системы показателей: пер. с англ. / Ж. Рой, В. Магнус, О. Нильс-Горан; – М.: Вильямс, 2004. – 304 с.
6. Рамперсад, Х. Универсальная система показателей: Как достигать результатов, сохраняя целостность: пер. с англ. / Х. Рамперсад – 3-е изд. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2006. – 352 с.
7. Разработка сбалансированной системы показателей. Практическое руководство с примерами. – 2-е изд., расшир. / под ред. А. М. Гершуна, Ю. С. Нефедьевой. – М. : Олимп-Бизнес, 2007. – 128 с.
8. Фисенко, А. И. Сбалансированная система показателей: новая парадигма или новый формат известных подходов? / А. И. Фисенко, Е. А. Кулешова // Транспортное дело России. – 2012. – № 4. – С. 137–140.

References

1. Lesnoe upravlenie = Forest governance / A. V. Neverov [i dr.], pod obshch. red. A. V. Neverova. – Minsk : Pachatkovaya shkola, 2014. – 400 s.
2. Porter, M. Kurs MVA po strategicheskomu menedzhmentu / M. Porter, Dzh. Sampler, S. Prahahad. – M. : Al'pina Publisher, 2002. – 608 s.
3. Kaplan, R. S. Sbalansirovannaya sistema pokazatelej. Ot strategii k dejstviyu / R. S. Kaplan, D. P. Norton. per. s angl. M. Pavlovoj. – 2-e izd., ispr. i dop. – M.: Olimp-Biznes, 2008. – 320 s.
4. Fridag, H. Sbalansirovannaya sistema pokazatelej / H. Fridag, V. SHmidt ; per. s nem. M. V. Lapshinova. – M. : Omega-L, 2006. – 144 s.
5. Roj, ZH. Ocenka effektivnosti deyatel'nosti kompanii. Prakticheskoe rukovodstvo po ispol'zovaniyu sbalansirovannoj sistemy pokazatelej: per. s angl. / ZH. Roj, V. Magnus, O. Nil's-Goran; – M.: Vil'yams, 2004. – 304 s.
6. Rampersad, H. Universal'naya sistema pokazatelej: Kak dostigat' rezul'tatov, sohranyaya celostnost': per. s angl. / H. Rampersad – 3-e izd. – M. : Al'pina Biznes Buks, 2006. – 352 s.
7. Razrabotka sbalansirovano sistemy pokazatelej. Prakticheskoe rukovodstvo s primerami. – 2-e izd., rasshir. / pod red. A. M. Gershuna, Yu. S. Nefed'evoy. – M. : Olimp-Biznes, 2007. – 128 s.
8. Fisenko, A. I. Sbalansirovannaya sistema pokazatelej: novaya paradigma ili novyj format izvestnyh podhodov? / A. I. Fisenko, E. A. Kuleshova // Transportnoe delo Rossii. – 2012. – № 4. – S. 137–140.

Материал поступил 09.02.2023, одобрен 05.03.2023, принят к публикации 06.03.2023

ФОРМИРОВАНИЕ РЫНКА ЛИЦЕНЗИОННОЙ ТОРГОВЛИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Э. Э. Ермакова¹, М. П. Мишкова²

¹ М. э. н., старший преподаватель кафедры экономической теории и логистики
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ermakova.eleonora@gmail.com

² К. э. н., доцент кафедры менеджмента УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail: mishkova69@yandex.by

Реферат

Передовые технологии выступают сегодня особым товаром на рынке, а торговля объектами интеллектуальной собственности приносит конкурентные преимущества и дополнительный доход участникам рыночных отношений. В связи с этим особый интерес представляют исследования в сфере функционирования лицензионной торговли. В статье представлены результаты анализа рынка объектов права промышленной собственности в Республике Беларусь, определены ресурсы и условия для развития рынка лицензий, установлены факторы эффективного функционирования рынка.

Ключевые слова: лицензионные соглашения, рынок лицензий, интеллектуальная собственность, объекты промышленной собственности, коммерциализация, изобретение.

FORMATION OF THE MARKET OF LICENSE TRADING IN THE REPUBLIC OF BELARUS

E. E. Ermakova, M. P. Mishkova

Abstract

Advanced technologies are a special commodity on the market today, and trade in intellectual property objects brings competitive advantages and additional income to market participants. In this regard, research in the field of functioning of the intellectual property market is of particular interest. The article presents the results of the analysis of the market of industrial property rights in the Republic of Belarus, the resources and conditions for the development of the license market are determined, the factors of the effective functioning of the market are established.

Keywords: license agreements, license market, intellectual property, objects of industrial property, commercialization, invention.

Введение

Экономическое, социальное и культурное развитие общества происходит вместе с ускорением темпов роста в научно-технической сфере. Кардинальные изменения происходят в информационно-компьютерной индустрии, формируются наукоёмкие технологии, ведутся разработки в области получения новых источников энергии, осуществлён прорыв в геномной инженерии, биотехнологиях, создан искусственный интеллект. Общество вступает в эпоху интеллектуальной экономики, где наука, информация, интеллектуальные продукты становятся движущей силой экономического роста. Создание новых технологий и эффективное использование их позволяет повысить уровень жизни населения, обеспечивает стратегическое преимущество предприятиям и определяет положение страны на экономической и политической картах мира. В связи с этим существенно повышается роль и значение результатов научно-технической деятельности в развитии общества [1, с. 17].

Научно-техническая деятельность играет сегодня значимую роль, достижения науки и внедрение новых технологий оказывают непосредственное влияние на социально-экономическое развитие общества и качество жизни людей. Именно интеллектуальная собственность становится одним из наиболее важных факторов производства, а изобретатели и инвесторы имеют возможность извлекать выгоду от коммерциализации запатентованных результатов исследований и разработок. В этих условиях особую значимость приобретают механизмы эффективного управления интеллектуальной собственностью, доведение результатов интеллектуальной деятельности до материализованных рыночных продуктов, удовлетворяющих различные потребности общества [2, с. 71].

Изобретение и другие объекты промышленной собственности проходят несколько продолжительных этапов своего развития, начиная от научной идеи и, достигая логического завершения, до коммерческого использования. На каждом из этапов жизненного цикла результаты интеллектуальной деятельности могут стать объектом лицензионного соглашения, однако большую коммерческую ценность объекты приобретают на стадии прикладных научно-технических работ.

В процессе фундаментальных научных исследований результатами выступают теоретические разработки, порой не ориентированные ещё на внедрение в производство, в связи с чем лицензионная торговля такими объектами достаточно ограничена и объём реализации их на рынке незначителен. Большим вниманием пользуются на рынке готовые к внедрению решения, промышленное применение которых может быть использовано для создания новой наукоёмкой продукции либо применения новой технологии.

Передовые технологии выступают сегодня особым товаром на рынке, а торговля объектами интеллектуальной собственности приносит конкурентные преимущества и дополнительный доход участникам рыночных отношений. Возможность обладать передовыми технологиями является основным условием повышения конкурентоспособности, а рост коммерческой реализации интеллектуальной собственности становится важнейшим фактором инновационного развития страны.

Исследование лицензионной торговли становится важным аспектом для выявления современных тенденций развития технологического рынка и уровня научно-технического развития стран, вовлечённых в торговлю лицензиями. Вследствие этого анализ состояния процессов коммерциализации результатов научно-технической деятельности в Беларуси и выявление основных проблем в этой сфере представляется актуальным.

Научная новизна исследования состоит в развитии теоретико-методических положений и разработке новых подходов к анализу рынка лицензионной торговли.

Коммерциализация объектов промышленной собственности

Целью государственной политики в сфере интеллектуальной собственности в долгосрочной перспективе является комплексная интеграция национальной системы интеллектуальной собственности в социально-экономическую политику государства и повышение конкурентоспособности национальной экономики, основанной на знаниях и инновациях. Среди основных задач выступает необходимость формирования полноценного рынка интеллектуальной собственности в Республике Беларусь, его интеграция в евразийский и мировой рынки интеллектуальной собственности и повышение эффективности

использования объектов интеллектуальной собственности, в том числе путём их коммерциализации, усиление роли интеллектуальной собственности в научной, научно-технической и экономической деятельности, развитии человеческих ресурсов и экономики знаний [3].

Торговля товарами и услугами начала формироваться в XV–XVI вв., рынок же научно-технических достижений появился в конце XVIII – начале XIX столетий, во времена промышленной революции. Это был совершенно новый рынок, который способствовал быстрому развитию государств, обладающих передовыми технологиями.

Республика Беларусь находится в стадии формирования рынка интеллектуальной собственности. Сегодня передача технологий осуществляется в рамках заключения лицензионных договоров, в форме заключения инжиниринговых и кооперационных соглашений. Лицензионные соглашения – основная форма коммерческой реализации объектов интеллектуальной собственности, большая доля рынка интеллектуальной собственности приходится на лицензионную торговлю. Лицензионные соглашения часто сопровождаются передачей ноу-хау, оказанием технической помощи в налаживании и обслуживании производства, предоставлении консультационных услуг и других услуг инженерно-технического характера.

Лицензионное соглашение – документ, предоставляющий право временного использования охраняемого объекта интеллектуальной собственности. Данный документ имеет ограничение по сроку действия, по территории использования и по объёму передаваемых прав, в том случае, если речь не идёт об уступке исключительных прав, когда договор предусматривает полную передачу прав на использование объекта лицензии и происходит смена правообладателя.

Передача технологий – это процесс, выгодный для всех участников рынка, продавец и покупатель стремятся удовлетворить свои экономические интересы. Бизнес получает доступ к новшествам высокого технического уровня, извлекает выигрывает от использования современных технологий, повышает свою конкурентоспособность, не осуществляя при этом затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки. Обладатели исключительных прав на технологии, отказываясь от использования объекта интеллектуальной собственности в собственном производстве, либо не имея возможности использования, получают доход в виде лицензионных платежей от проданных лицензий.

Анализ лицензионной торговли, определение закономерностей и тенденций её развития, изучение факторов влияющих на развитие рынка интеллектуальной собственности и эффективность коммерческого использования объектов интеллектуальной собственности требуют определённых критериев и количественных показателей оценки. Используем доступные данные официальной статистики для анализа процесса становления и развития рынка лицензий Республики Беларусь. В качестве критериев оценки используем показатели объёма лицензионной торговли и рынка франчайзинга.

Объём лицензионной торговли можно установить с помощью статистических данных о количестве зарегистрированных лицензионных договоров по видам объектов интеллектуальной собственности и по числу зарегистрированных договоров об уступке прав.

Лицензирование подразумевает заключение лицензионного договора, по которому правообладатель предоставляет лицензиату право использования результата интеллектуальной деятельности. Такая форма коммерциализации является одной из самых распространённых.

В систему государственного регулирования технологического обмена в различных странах входит регистрация лицензионных договоров и других видов коммерческих сделок по передаче научно-технических достижений [4, с. 408].

Таким образом, заключение лицензионных договоров выходит за рамки двусторонних отношений между лицензиаром и лицензиатом. Сделки по передаче прав на результаты научно-технических достижений непосредственно связаны также с интересами государства, науки и бизнеса. Именно поэтому многие государства используют практику регистрации лицензионных договоров для возможности сбора и анализа информации в сфере передачи наукоёмких технологий внутри страны и на международном рынке интеллектуальной собственности.

В соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь «О регистрации лицензионных договоров, договоров уступки, договоров залога прав на объекты права промышленной собственности и договоров комплексной предпринимательской ли-

цензии (франчайзинга)», патентное ведомство страны учитывает регистрацию лицензионных соглашений и договоров о передаче прав, об уступке прав, договоров залога прав на объекты интеллектуальной собственности. Регистрация лицензий носит обязательный характер, незарегистрированные договоры не имеют силы.

Формирование и развитие рынка интеллектуальной собственности в Беларуси можно анализировать по статистическим данным, публикуемым в ежегодном отчёте Национального центра интеллектуальной собственности. Эта информация демонстрирует абсолютные количественные показатели, характеризующие процессы, происходящие на рынке лицензий. Динамика этих показателей определяет развитие рынка интеллектуальной собственности.

На рисунке 1 представлена диаграмма, отражающая динамику развития рынка лицензий Республики Беларусь за период с 1993 по 2021 г. В качестве объектов лицензионной торговли представлены объекты промышленной собственности (ОПС). На диаграмме показано количество заключённых лицензионных договоров о передаче прав на использование объектов промышленной собственности и количество договоров об уступке прав на ОПС. Диаграмма достоверно демонстрирует изменения на рынке лицензий в Беларуси. Обе кривые практически параллельно меняют своё положение на графике.

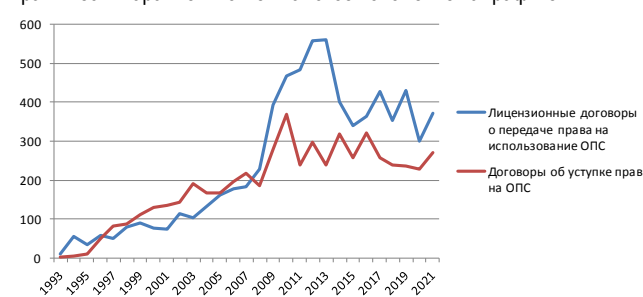


Рисунок 1 – Динамика развития рынка лицензий в Республике Беларусь [5]

В 1993 г. рынок лицензий Беларуси начал своё становление, диаграмма отражает стабильный рост лицензионной торговли в стране до 2010–2013 гг., довольно резкое снижение в 2014 г. и наметившуюся тенденцию замедления темпов роста в последующий период.

Основными причинами наметившейся тенденции выступают результаты изобретательской и патентной активности в стране, которые с 2010–2011 гг. начали своё снижение. Количество поданных заявок и выданных патентов на изобретение сократилось в разы. Число действующих патентов на изобретение в стране за последние 10 лет сократилось в 2,8 раза. В свою очередь, более глубокие причины этих явлений кроются в финансировании науки, показатель наукоёмкости ВВП в стране имеет критически низкое значение на протяжении длительного периода времени и составляет 0,5 % ВВП.

Для экономики Беларуси рынок франчайзинга является относительно новым явлением. Франчайзинговая деятельность регулируется Гражданским кодексом Республики Беларусь, а договоры комплексной предпринимательской лицензии (франчайзинга) начали регистрироваться только с 2006 г. Правовые вопросы франчайзинга непосредственно касаются и основ защиты интеллектуальной собственности. Франчайзинг выступает одним из видов кооперационных соглашений, при котором обеспечивается интенсивный технологический обмен. Правообладатель предоставляет пользователю комплекс исключительных прав, включающий право использования фирменного наименования правообладателя и охраняемой коммерческой информации, а также других объектов интеллектуальной собственности.

С трёх договоров франчайзинга, зарегистрированных в 2006 г. в Беларуси, количественные показатели заключённых договоров демонстрируют рост и в 2021 г. зарегистрировано 113 договоров.

Экономическая оценка результативности лицензионной торговли может быть осуществлена благодаря наличию статистических данных о размере поступивших денежных средств от коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности (РИД). Для приведения стоимостных показателей к сопоставимому виду, используем индексы цен промышленности в исследуемый период времени (Таблица 1).

Таблица 1 — Показатели экономической эффективности лицензионной торговли

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Поступление денежных средств от коммерциализации РИД, тыс. руб.	24072	32892	32026	22749	18052	5839	92137
Индексы цен промышленности, базовый 2015 г.	1	1,072	1,231	1,327	1,445	1,719	1,920
Поступление денежных средств от коммерциализации РИД в ценах 2015 г., тыс. руб.	24072	30683	26016	17143	12493	3397	47988
Регистрация договоров о передаче прав на ОПС, всего ед.	633	751	771	688	778	588	758
Средняя сумма поступлений на один договор в сопоставимых ценах, тыс. руб.	38,03	40,86	33,74	24,92	16,06	5,78	63,31
Внутренние затраты на исследования и разработки, тыс. руб.	449543	475344	617684	739340	777843	807000	813308
Доля доходов от реализации ОПС в общем объеме затрат на исследования и разработки, %	5,3	6,8	5,2	3,1	2,3	0,7	11,3

Данные таблицы свидетельствуют о неравномерных поступлениях денежных средств от коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности как по всем зарегистрированным договорам, так и в среднем на один договор. Доля доходов от реализации объектов промышленной собственности в общем объеме внутренних затрат на исследования и разработки только в 2021 г. превысила 10 %. Очевидно, что не каждый результат интеллектуальной деятельности находит коммерческое применение и имеет финансовую отдачу. Более того, объекты интеллектуальной собственности, используемые в собственном производстве, не учтены в сделках о передаче прав на ОПС, также неучтенными остаются объекты, переданные безвозмездно, в связи с чем с точностью определить эффективность лицензионной торговли не представляется возможным.

Важную роль в коммерциализации результатов научно-технической деятельности играет **система управления интеллектуальной собственностью**. Условия, создаваемые государством, выступают связующим звеном между наукой и бизнесом и представлены законодательством и инфраструктурой.

В Беларуси действует ряд документов, регулирующих вопросы коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности и их охраны, среди них Указ Президента Республики Беларусь № 59 от 04.02.2013 г. «О коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности, созданных за счёт государственных средств», который стимулирует процессы внедрения результатов научных разработок.

Инфраструктура, созданная для успешного продвижения научных результатов в бизнес, представлена Государственным комитетом по науке и технологиям Республики Беларусь, его подведомственными организациями, в том числе Национальным центром интеллектуальной собственности, центрами трансфера технологий. Содействие коммерциализации объектов права промышленной собственности обеспечивает Биржа интеллектуальной собственности. В республике создана сеть Центров поддержки технологий и инноваций. К концу 2021 г. функционировало 16 центров, один из которых создан на базе Брестского государственного технического университета.

На начало 2022 г. на Бирже интеллектуальной собственности размещено 724 коммерческих предложения на объекты права промышленной собственности, 703 из которых – изобретения [6].

Следует отметить, что не все сделки, совершаемые с объектами интеллектуальной собственности, находят своё отражение в статистической отчётности. Множество экономических отношений в этой сфере остаётся за рамками ненаблюдаемой экономики. Отсутствует информация о передаче прав на объекты интеллектуальной собственности при кооперационных соглашениях, когда передача прав осуществляется в рамках совместных предприятий, производственно-технических связей юридически независимых национальных или зарубежных компаний при их производственной кооперации. Передача технологий может происходить и между материнскими и дочерними компаниями, информация о которых не фиксируется статистикой. Также не публикуется информация об использовании объектов интеллектуальной собственности в качестве уставного капитала предприятия.

Рынок секретов производства (ноу-хау) также остаётся за пределами статистического наблюдения в сфере интеллектуальной собственности. Данные объекты не регистрируются в патентном ведомстве по причине возможной утечки конфиденциальной информации, регистрация сделок с секретами производства не осуществляется.

Кроме этого, в Беларуси в последние несколько лет сократился объём публикуемых статистических данных, что снижает качество анализа и оценки многих процессов и явлений, происходящих в стране. Ограниченность информации приводит к повышенной степени неопределённости и соответственно риску.

Заключение

В современном мире одним из перспективных направлений развития выступает научно-технический обмен. Обмен знаниями и технологиями создаёт возможность для внедрения и применения инноваций, позволяет повышать конкурентоспособность страны.

В Республике Беларусь создана законодательная база для развития лицензионной торговли, сформирована патентно-лицензионная политика, развивается инфраструктура. Таким образом, созданные условия позволяют функционировать и получать дальнейшее развитие для торговли объектами промышленной собственности. Страна находится на пути эффективного использования имеющихся интеллектуальных ресурсов, однако многое ещё предстоит сделать для развития лицензионной торговли и повышения степени взаимодействия международных экономических отношений в сфере интеллектуальной собственности.

Список цитированных источников

1. Ермакова, Э. Э. Роль интеллектуальной собственности в инновационном развитии общества / Э. Э. Ермакова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2010. – № 3 : Экономика. – С. 17–21.
2. Ермакова, Э. Э. Сущность, содержание и формы коммерциализации объектов интеллектуальной собственности / Э. Э. Ермакова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2011. – № 3 : Экономика. – С. 71–74.
3. О Стратегии Республики Беларусь в сфере интеллектуальной собственности до 2030 года [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 24 ноября 2021 г. № 672. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C22100672>. – Дата доступа: 30.10.2022.
4. Мухопад, В. И. Экономика и коммерциализация интеллектуальной собственности : учебник / В. И. Мухопад. – М. : Магистр : ИНФРА-М, 2016. – 512 с.
5. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Статистический бюлл. «О научной и инновационной деятельности в Республике Беларусь в 2020 году». – Минск : Нац. стат. комитет Респ. Беларусь, 2021. – 115 с.
6. Годовой отчёт Национального центра интеллектуальной собственности за 2021 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncip.by/upload/iblock/3fe/3fe6e1c68f770566a1fa280b5b03dae4.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2022.

References

1. Ermakova, E. E. Rol' intellektual'noj sobstvennosti v innovacionnom razvitii obshchestva / E. E. Ermakova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. – 2010. – № 3. – S. 17–21.
2. Ermakova, E. E. Sushchnost', soderzhanie i formy kommercializacii ob'ektov intellektual'noj sobstvennosti / E. E. Ermakova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. – 2011. – № 3. – S. 71–74.
3. Strategii Respubliki Belarus' v sfere intellektual'noj sobstvennosti do 2030 goda. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 24 noyabrya 2021 g. № 672 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C22100672>. – Data dostupa: 30.10.2022.
4. Muxopad, V. I. Ekonomika i kommercializaciya intellektual'noj sobstvennosti : uchebnik / V. I. Muxopad. – M. : Magistr : INFRA-M, 2016. – 512 s.
5. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. Statisticheskij byull. «O nauchnoj i innovacionnoj deyatelnosti v Respublike Belarus' v 2020 godu». – Minsk : Nac. stat. komitet Resp. Belarus', 2021. – 115 s.
6. Godovoj otchet Nacional'nogo centra intellektual'noj sobstvennosti za 2021 god [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.ncip.by/upload/iblock/3fe/3fe6e1c68f770566a1fa280b5b03dae4.pdf>. – Data dostupa: 30.10.2022.

Материал поступил 02.10.2022, одобрен 16.12.2022, принят к публикации 13.01.2023

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ: МЕТОДИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Е. С. Романова

*К. э. н., доцент, доцент кафедры экономики промышленных предприятий
УО «Белорусский государственный экономический университет», e-mail: rom_hel@mail.ru*

Реферат

Необходимость оценки экономического потенциала предприятия является актуальной научной и практической задачей, особенно в условиях цифровой трансформации экономики, характеризующейся фундаментальной перестройкой бизнес-процессов и, как следствие, появлением новых возможностей и дополнительных выгод у субъектов хозяйствования. В статье, по результатам обобщения подходов к определению сущности экономического потенциала предприятия и его количественной оценке, предложена методика, предусматривающая включение в состав структурных компонентов потенциала предприятия (наряду с трудовым, финансовым, технологическим и производственным) субпотенциала информационно-коммуникационных технологий, что позволяет учитывать специфику оценки ресурсных возможностей предприятия в условиях его цифровой трансформации. Методика отличается комплексным подходом, учитывающим взаимодействие и взаимообусловленное влияние всех составляющих за счет использования трех блоков показателей, характеризующих как обеспеченность предприятия ресурсами, так и возможную результативность их использования, что соответствует современному представлению о сущности экономического потенциала субъекта хозяйствования.

Ключевые слова: экономический потенциал, цифровая экономика, информационно-коммуникационные технологии, эффективность.

ASSESSMENT OF THE ECONOMIC POTENTIAL OF AN ENTERPRISE IN THE CONDITIONS OF THE DIGITAL ECONOMY: METHODOLOGICAL ASPECT

E. S. Romanova

Abstract

The need to assess the economic potential of an enterprise is an urgent scientific and practical task, especially in the context of the digital transformation of the economy, characterized by a fundamental restructuring of business processes and, as a result, the emergence of new opportunities and additional benefits for business entities. In the article, based on the results of generalizing approaches to determining the essence of the economic potential of an enterprise and its quantitative assessment, a methodology is proposed that provides for the inclusion of the sub-potential of information and communication technologies in the structure of the structural components of the enterprise's potential (along with labor, financial, technological and production), which allows taking into account the specifics of assessment of the resource capabilities of an enterprise in the context of its digital transformation. The methodology is distinguished by a comprehensive approach that takes into account the interaction and interdependent influence of all components through the use of three blocks of indicators that characterize both the availability of resources to the enterprise and the possible effectiveness of their use, which corresponds to the modern idea of the essence of the economic potential of a business entity.

Keywords: economic potential, digital economy, information and communication technologies, efficiency.

Введение

Развитие инструментов цифровой экономики, предусматривающих применение передовых производственных технологий в производстве и управлении, является одной из ключевых задач цифрового развития Республики Беларусь, что предусмотрено государственной программой «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы. Решение данной задачи на уровне хозяйствующих субъектов означает фундаментальную перестройку существующих бизнес-процессов и модернизацию традиционной бизнес-модели путем проведения цифровых преобразований, позволяющих предприятию оставаться конкурентоспособным и прибыльным в условиях новой цифровой эпохи. Вместе с тем, как показывает практика, белорусские предприятия пока не спешат с осуществлением данных преобразований. Одна из основных причин такой медлительности кроется в отсутствии у предприятий четкого понимания реальных возможностей и источников обеспечения цифрового развития, т. е. своего экономического потенциала.

Исследованию вопросов оценки экономического потенциала посвящено достаточное количество работ ученых-экономистов. Среди фундаментальных научных исследований, посвященных вопросам потенциала предприятия, известны труды И. Ансоффа, М. Портера, А. Томпсона, А. Д. Чандлера и др. Серьезное внимание исследованию структуры и оценки экономического потенциала предприятия в своих работах уделили Л. Абалкин, Н. Краснокутская, В. Ковалев, С. Тимофеева, И. Карапейчик, П. Фомин, М. Старовойтов, Т. Учаева, Б. Хрусталев [1–7] и другие. В последнее десятилетие, в связи с развитием цифровизации, появляются публикации, акцентирующие внимание на необходимость разработки специального инструментария оценки экономического потенциала с учетом специфики процесса цифровой трансформации экономики (В. Г. Фролов, Ю. А. Сидоренко [8], А. В. Козлов, А. Б. Тесля [9], А. Н. Головина [10]).

При этом, на наш взгляд, в отечественной науке пока не выработано единого подхода ни к определению сущности экономического потенциала на микроуровне, ни к его структуре, ни к особенностям оценки в условиях цифрового развития, что является одним из сдерживающих факторов перехода белорусских субъектов хозяйствования на новые цифровые стандарты. Целью исследования является разработка методики оценки экономического потенциала предприятия применительно к условиям цифровой экономики.

Основная часть. Методический подход к оценке экономического потенциала предприятия в условиях цифровой экономики

В научных трудах экономический потенциал трактуется по-разному. В «Русском толковом словаре» под потенциалом (от лат. potential – «сила») понимается совокупность средств, возможностей в какой-нибудь области [11]. В «Советском энциклопедическом словаре» потенциал определяется как «источники, возможности, средства, запасы, которые могут быть использованы для решения какой-либо задачи, достижения определенной цели; возможности отдельного лица, общества, государства в определенной области» [12]. Новая экономическая энциклопедия под ред. Е. Е. Румянцевой потенциал определяет как «совокупность различных видов ресурсов, включая материальные, финансовые, интеллектуальные, научно-технические и иные, с помощью которых можно получить определенные результаты» [13]. Б. Райан представляет потенциал как «реальную или вероятную способность выполнить целенаправленную работу» [14]. При всем многообразии определений, встречающихся в литературе у различных авторов, можно констатировать, что в зависимости от акцента, в науке сложилось несколько концепций в рамках общей теории потенциалов. Приверженцы одной концепции считают, что «потенциал» представляет собой конгломерат ресурсов. Сторонники другой – трактуют потенциал как результирующую

экономических и производственных отношений между субъектами хозяйственной деятельности. Последователи третьей концепции под потенциалом понимают способность экономического субъекта обеспечивать свое долговременное функционирование и достижение стратегических целей при данном количестве, качестве и структуре ресурсов. Однако ретроспективный анализ научно-методических подходов к определению сущности экономического потенциала указывает на устойчивую тенденцию к смещению акцентов от ресурсной концепции в сторону результативной концепции (разделяемую и авторами данного исследования), в рамках которой потенциал трактуется как *способность экономического субъекта обеспечивать максимально возможный результат от своей деятельности*.

Достижение результата от любой деятельности, как известно, обуславливается сочетанием определенного набора факторов, в составе которых главенствующую роль играют соответствующие ресурсы. В рамках сформулированного выше определения ресурсы рассматриваются в качестве движущей силы, определяющей вид предельных возможностей по осуществлению конкретного вида деятельности, что предполагает толкование различных видов ресурсных потенциалов (субпотенциалов) как факторной разновидности потенциала любой деятельности, осуществляемой экономическим субъектом. Классификация субпотенциалов в каждом конкретном случае определяется группировкой существенных факторов деятельности соответствующего вида. Вместе с тем анализ подходов к определению состава структурных элементов экономического потенциала предприятия позволил сделать вывод, что базовыми экономическими факторами практически любого вида деятельности являются трудовые (человеческие), финансовые, технологические и материально-технические ресурсы.

Человеческие ресурсы экономического потенциала предприятия представляют собой потенциально возможное применение в процессе производства комплекса необходимых знаний, умений и навыков работников для эффективного решения производственных задач. Стоит отметить, что именно человеческие ресурсы играют определяющую роль в эффективном формировании и использовании экономического потенциала предприятий в условиях цифровой экономики. Финансовые ресурсы как структурный элемент производственного потенциала предприятий представляют собой собственный, заемный и привлеченный денежный капитал, который используется предприятием для формирования своих активов, осуществления производственно-финансовой деятельности, а также реализации проекта цифровой трансформации. Другими словами, финансовые ресурсы представляют собой возможности руководства предприятия по усилению экономического потенциала, а именно за счет модернизации производственной составляющей, применяемых технологий и повышения квалификации работников. Производственные ресурсы как один из основных структурных элементов экономического потенциала реализуются через обеспечение функционирования процесса производства и выражаются через производственные фонды (основные и оборотные), подвергающиеся наибольшей трансформации в процессе цифровизации. Технологические ресурсы – важнейший структурный элемент экономического потенциала, который используется в процессе производства посредством реализации применяемых технологий в производственной деятельности и технологических возможностей.

Вместе с тем в условиях цифровизации экономики, наряду с данными ресурсами, значительное влияние на экономический потенциал предприятия в части ускорения процессов создания, накопления и использования материальных и финансовых ресурсов оказывают информационно-коммуникационные технологии (ИКТ). ИКТ как совокупность методов, процессов и программно-технических средств, объединенных с целью сбора, обработки, хранения, передачи и предоставления информации, а также использования ее в интересах пользователей, становятся основным источником организации производственного процесса, связующим звеном между другими видами ресурсов.

Следовательно, оценку ресурсных возможностей проведения цифровой трансформации, которая затрагивает все виды деятельности, реализуемые в процессе жизнедеятельности предприятия (производственную, воспроизводственную, финансовую, бытовую, управленческую и пр.), следует осуществлять как минимум по пяти структурным элементам его образующим (субпотенциалам):

- трудовой;
- финансовый;
- производственный;
- технологический;
- информационно-коммуникационный.

Современная экономическая наука предлагает довольно обширный набор средств и методов диагностики экономического потенциала предприятия. Наиболее распространенными и традиционными методами являются методы оценки рыночной стоимости предприятия, методика комплексной рейтинговой оценки экономического потенциала и методика оценки финансовой деятельности предприятия.

Во всех традиционных методах оценка экономического потенциала предприятия проводится с использованием фактических значений показателей, характеризующих результаты работы хозяйственной системы. При этом доходный и сравнительный методы рыночной стоимости, а также комплексная рейтинговая оценка характеризуют только результативную составляющую экономического потенциала предприятия, а имущественный (затратный) метод – только ресурсную. Преимуществом методики оценки финансовой деятельности предприятия является то, что она включает оценку обеих составляющих экономического потенциала предприятия – ресурсов (имущественный потенциал) и результатов (финансовое положение), однако имущественная и финансовая составляющие оцениваются разрозненно, без учета факторов взаимодействия [15], что также делает ее недостаточно объективной.

Помимо количественных методов существуют качественные методы оценки, основанные на знаниях и интуиции специалистов, среди которых можно выделить метод мозгового штурма, метод сценариев, метод экспертных оценок, морфологический метод, метод деловых игр и др. [16]. Их применение целесообразно при отсутствии необходимой информации относительно оцениваемого объекта или же при невозможности его количественного измерения.

Для целей оценки ресурсных возможностей предприятия при проведении цифровой трансформации целесообразно использовать методический подход, предусматривающий:

- количественное измерение имеющихся ресурсов и результатов функционирования предприятия, а также их взаимодействие и взаимообусловленное влияние;
- оценку экономического потенциала предприятия в разрезе формирующих ее (как минимум пяти) составляющих, ввиду необходимости выявления возможностей и источников роста по основным сферам деятельности предприятия;
- оценку экономического потенциала через сравнение его фактического значения (достигнутого уровня в настоящий момент) с нормативными (перспективными) значениями, обеспечивающими достижение целей цифровой трансформации.

С учетом сформулированных выше рекомендаций, оценка ресурсных возможностей предприятия может быть произведена на основе методического подхода, предложенного В. С. Дорофеевой и Е. Ю. Андреевой в работе [16], доработанного авторами настоящего исследования с учетом специфики решаемых задач оценки цифровой трансформации, в следующей последовательности:

- 1) *Отбор и определение показателей, характеризующих состояние структурных элементов экономического потенциала предприятия.* Для комплексной оценки уровня экономического потенциала предприятий целесообразно использовать индикаторы, наиболее полно отражающие эффективность используемых ресурсов и возможности производства по выпуску продукции. Система показателей должна быть увязана с определенными в качестве целевых индикаторов критериями достижения целей цифровой трансформации и служить гибким и удобным инструментом мониторинга производственных процессов, происходящих на предприятии в процессе реализации проекта трансформации. При этом в рамках результативного подхода в качестве критериев оценки следует использовать как натуральные и стоимостные показатели наличия, состояния, движения (привлечения и выбытия) различных ресурсов, так и показатели возможной результативности и экономической эффективности использования ресурсов.

Состав возможных показателей на примере производственного и ИКТ субпотенциалов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели оценки составляющих экономического потенциала предприятия (производственного и ИКТ)

Показатели оценки	Субпотенциал	
	Производственный	ИКТ
	Объект оценки	
Показатели наличия, состояния и движения	Основные и оборотные средства предприятия, материальные ресурсы	Применяемые методы, процессы и программно-технические средства, предназначенные для сбора, обработки, хранения, передачи и представления информации
Показатели возможной результативности	Кoeffициенты ввода и выбытия основных средств. Кoeffициенты износа и годности основных средств. Кoeffициент обеспеченности материальными ресурсами. Длительность одного оборота оборотных средств	Кoeffициент обеспеченности ПК. Количество структурных подразделений, подключенных к локальной компьютерной сети
Показатели эффективности	Прирост производственной мощности. Прирост выручки/добавленной стоимости. Прирост чистой прибыли	Сокращение времени выполнения операций. Повышение уровня удовлетворенности потребителей информации
Показатели эффективности	Фондоотдача. Фондоёмкость. Материалоотдача. Материалоёмкость. Кoeffициент оборачиваемости. Кoeffициент загрузки	Информационная отдача

- 2) *Определение достигнутых (фактических) значений выбранных показателей.* По каждому выбранному показателю по данным отчетности предприятия определяется фактическое значение выбранного *i*-го показателя в рамках *j*-го субпотенциала – $\Pi_{досij}$.
- 3) *Определение нормативных (целевых) показателей.* В соответствии с целями и задачами цифровой трансформации, а также выбранными в качестве целевых критериев количественными и качественными показателями их достижимости определяются нормативные (перспективные) значения оценочных показателей – $\Pi_{норij}$. Нормативные значения, как правило, устанавливаются экспертным путем. При этом для показателей, характеризующих изменение результативных показателей предприятия, нормативным является любое положительное значение.
- 4) *Определение значения каждого субпотенциала.* По каждому *i*-му показателю рассчитывается отклонение по формуле:

$$\Delta \Pi_{ij} = \Pi_{досij} - \Pi_{норij} \quad (1)$$

При расчете следует учитывать специфику рассчитываемого показателя. В случае, если целевой показатель стремится к минимуму, то формула (1) принимает вид

$$\Delta \Pi_{ij} = \Pi_{норij} - \Pi_{досij} \quad (2)$$

При $\Delta \Pi_{ij} \geq 0$ показателю присваивается 1 балл, при $\Delta \Pi_{ij} < 0$ показателю присваивается 0 баллов.

Количество баллов в сумме характеризует балльную оценку каждого субпотенциала (B_j).

- 5) *Определение коэффициента важности в достижении цели цифровой трансформации.* Для каждого субпотенциала путем экспертной оценки определяется коэффициент важности в достижении цели цифровой трансформации – K_{Bj} . Экспертная оценка выставляется с учетом влияния соответствующей составляющей потенциала на стратегическую цель цифрового развития предприятия. При этом, $\sum_{j=1}^n K_{Bj} = 1$.
- 6) *Определение частных субпотенциалов предприятия (СП).* Значение экономического субпотенциала определяется путем умножения балльной оценки каждого субпотенциала B_j на коэффициент важности в достижении цели (K_{Bj}).
- 7) *Определение максимального значения субпотенциалов.* Максимальное значение субпотенциала может быть определено по формуле

$$СП_{MAXj} = n \cdot K_{Bj} \quad (3)$$

где n – количество показателей, использованных для оценки каждого субпотенциала.

- 8) *Общий экономический потенциал предприятия,* характеризующий возможность достижения цели цифровой трансформации при имеющихся ресурсных возможностях, определяется по формуле

$$\text{ЭП} = \sum_{j=1}^m СП_j \quad (4)$$

где m – количество субпотенциалов.

Максимальное значение уровня экономического потенциала предприятия – показатель, характеризующий максимально возможное количество баллов, которое может быть получено в случае, если по всем оценочным показателям потенциал предприятия реализуется полностью, определяется по формуле

$$СП_{MAX} = \sum_{j=1}^m СП_{MAXj} \quad (5)$$

- 9) *Определение фактического уровня использования экономического потенциала.* Уровень использования экономического потенциала определяется отношением полученного значения по формуле (4) к максимально возможному уровню (формула (5)). По субпотенциалам расчет выполняется аналогично.

- 10) *Интерпретация полученных результатов.* Предлагаемая шкала интерпретации полученных результатов приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика уровней экономического потенциала

Значение	Уровень использования экономического потенциала	Краткая характеристика	
0,85–1	Высокий	Имеющиеся ресурсы в полной мере обеспечивают достижение стратегических целей в контексте реализации стратегии цифровой трансформации	
0,65–0,84	Достаточный	Предприятие может обеспечить значительное повышение уровня цифровой зрелости	
0,5–0,64	Средний	Предприятию необходимо произвести корректировку выявленных узких мест	
0,35–0,49	Ниже среднего	Необходимо: производственный субпотенциал	существенное улучшение материально-технической базы предприятия путем ускорения темпов обновления основного капитала, ускорения оборачиваемости оборотных средств
		трудовой субпотенциал	существенное повышение квалификации работников, снижение текучести кадров, оптимизация возрастной и профессиональной структуры кадров
		финансовый субпотенциал	привлечение дополнительных источников финансирования, оптимизация структуры финансовых ресурсов, активизация инвестиционной деятельности
		технологический субпотенциал	увеличить долю активной части основных средств, ускорение внедрения новых технологических решений
		ИКТ субпотенциал	необходимо увеличить долю работников, оснащённых ПК и обеспечивающих выход в Интернет, обновить программное обеспечение
0–0,34	Низкий	Проведение цифровой трансформации невозможно	

Заключение

Таким образом, предложенный методический подход позволяет выявить способность предприятия в достижении поставленных целей цифровой трансформации, учитывая уровень имеющегося производственного, финансового, трудового, технологического и ИКТ субпотенциалов, а также определить составляющие экономического потенциала с низкой оценкой.

Преимуществом данного подхода также является возможность осуществления как экспресс, так и детализированной оценки. При экспресс-оценке достаточно рассмотреть три–пять ключевых обобщающих показателей оценки каждого выбранного субпотенциала, при детализированной оценке количество анализируемых показателей может быть значительно больше.

Список цитированных источников

1. Абалкин, Л. И. Новый тип экономического мышления / Л. И. Абалкин. – М. : Экономика, 1987. – 192 с
2. Краснокутская, Н. С. Потенциал предприятия: формирование и оценка: учебное пособие / Н. С. Краснокутская. – К. : Центр учебной литературы, 2005. – 352 с.
3. Ковалев, В. В. Финансы организаций (предприятий): учебник / В. В. Ковалев. – М. : Проспект, 2010. – 352 с.
4. Тимофеева, С. А. Сравнительная оценка подходов к анализу экономического потенциала предприятия / С. А. Тимофеева, Н. Ю. Снегур // Научные записки Орел ГИЭТ. – 2011. – № 1 (3). – С. 108–114.
5. Карапейчик, И. Н. Классификация потенциалов экономических субъектов: методологические аспекты и возможные решения / И. Н. Карапейчик // Актуальные проблемы экономики. – 2013. – № 1. – С. 20–31.
6. Старовойтов, М. К. Особенности оценки потенциала промышленных предприятий / М. К. Старовойтов, П. А. Фомин // Антикризисное и внешнее управление. – 2006. – № 2. – С. 27–41.
7. Учаева, Т. В. Организационно-экономический потенциал предприятия. Пути повышения: моногр. / Т. В. Учаева, Б. Б. Хрусталев. – Пенза : ПГУАС, 2015. – 124 с.
8. Фролов, В. Г. Оценка экономического потенциала промышленных структур в условиях цифровой экономики / В. Г. Фролов, Ю. А. Сидоренко // Экономика, предпринимательство и право. – 2020. – Том 10. – № 10. – С. 2505–2516.
9. Козлов, А. В. Цифровой потенциал промышленных предприятий: сущность, определение и методы расчета / А. В. Козлов, А. Б. Тесля // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2019. – № 6. – С. 101–110.
10. Головина, А. Н. Разработка методического инструментария экономической оценки потенциала цифровых решений на промышленном предприятии / А. Н. Головина, А. А. Пешкова // Modern Economy Success. – 2021. – № 4. – С. 44–49.
11. Лопатш, В. А. Русский толковый словарь / В. А. Лопатш, Л. Е. Лопатина. – Изд. 7-е, испр. и доп. – М. : Рус. яз., 2001. – 882 с.
12. Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – Изд. 4-е. – М. : Сов. энциклопедия, 1987. – 1600 с.
13. Румянцева, Е. Е. Новая экономическая энциклопедия / Е. Е. Румянцева. – 4-е изд. – М. : ИНФРА-М. – 2016. – Т. XII. – 882 с.
14. Райан, Б. Стратегический учет для руководителя / Б. Райан ; под ред. В. А. Микрюкова. – М. : Аудит : ЮНИТИ. – 1998. – 615 с.
15. Теория и методология оценки экономического потенциала предприятий / Г. Г. Надворная [и др.] // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 6. – С. 70–90.
16. Дорофеева, В. С. Совершенствование методики оценки экономического потенциала предприятия / В. С. Дорофеева, Е. Ю. Андреева // Экономика и парадигма нового времени. – 2019. – Вып. 4. – С. 18–25.

References

1. Abalkin, L. I. Novyy tip ekonomicheskogo myshleniya / L. I. Abalkin. – M. : Ekonomika, 1987. – 192 s
2. Krasnokutskaya, N. S. Potencial predpriyatiya: formirovaniye i ocenka: uchebnoye posobie / N. S. Krasnokutskaya. – K. : Centr uchebnoy literatury, 2005. – 352 s.
3. Kovalev, V. V. Finansy organizacij (predpriyatij): uchebnik / V. V. Kovalev. – M. : Prospekt, 2010. – 352 s.
4. Timofeeva, S. A. Sravnitel'naya ocenka podhodov k analizu ekonomicheskogo potenciala predpriyatiya / S. A. Timofeeva, N. Yu. Snegur // Nauchnye zapiski Orel GIET. – 2011. – № 1 (3). – S. 108–114.
5. Karapejchik, I. N. Klassifikaciya potencialov ekonomicheskikh sub"ektov: metodologicheskie aspekty i vozmozhnye resheniya / I. N. Karapejchik // Aktual'nye problemy ekonomiki. – 2013. – № 1. – S. 20–31.
6. Starovojtov, M. K. Osobennosti ocenki potenciala promyshlennykh predpriyatij / M. K. Starovojtov, P. A. Fomin // Antikrizisnoe i vneshnee upravlenie. – 2006. – № 2. – S. 27–41.
7. Uchaeva, T. V. Organizacionno-ekonomicheskij potencial predpriyatiya. Puti povysheniya: monogr. / T. V. Uchaeva, B. B. Hrustalev. – Penza : PGUAS, 2015. – 124 s.
8. Frolov, V. G. Ocenka ekonomicheskogo potenciala promyshlennykh struktur v usloviyakh cifrovoj ekonomiki / V. G. Frolov, Yu. A. Sidorenko // Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. – 2020. – Tom 10. – № 10. – S. 2505–2516.
9. Kozlov, A. V. Cifrovoy potencial promyshlennykh predpriyatij: sushchnost', opredelenie i metody rascheta / A. V. Kozlov, A. B. Teslya // Vestnik Zabajkalskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2019. – № 6. – S. 101–110.
10. Golovina, A. N. Razrabotka metodicheskogo instrumentariya ekonomicheskoy ocenki potenciala cifrovyykh reshenij na promyshlennom predpriyatii / A. N. Golovina, A. A. Peshkova // Modern Economy Success. – 2021. – № 4. – S. 44–49.
11. Lopatsh, V. A. Russkij tolkovyj slovar' / V. A. Lopatsh, L. E. Lopatina. – Izd. 7-e, ispr. i dop. – M. : Rus. yaz., 2001. – 882 s.
12. Sovetskij enciklopedicheskij slovar' / gl. red. A. M. Prohorov. – Izd. 4-e. – M. : Sov. enciklopediya, 1987. – 1600 s.
13. Rumyanцева, E. E. Novaya ekonomicheskaya enciklopediya / E. E. Rumyanцева. – 4-e izd. – M. : INFRA-M. – 2016. – Т. XII. – 882 s.
14. Rajan, B. Strategicheskij uchet dlya rukovoditelya / B. Rajan ; pod red. V. A. Mikryukova. – M. : Audit : YUNITI. – 1998. – 615 s.
15. Teoriya i metodologiya ocenki ekonomicheskogo potenciala predpriyatij / G. G. Nadvornaya [i dr.] // Ekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz. – 2016. – № 6. – S. 70–90.
16. Dorofeeva, V. S. Sovershenstvovanie metodiki ocenki ekonomicheskogo potenciala predpriyatiya / V. S. Dorofeeva, E. Yu. Andreeva // Ekonomika i paradigma novogo vremeni. – 2019. – Vyp. 4. – S. 18–25.

Материал поступил 07.12.2022, одобрен 26.01.2023, принят к публикации 26.01.2023

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛАСТЕРНЫХ СТРАТЕГИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Г. А. Яшева¹, Ю. Г. Вайлунова²

¹ Д. э. н., профессор, заведующий кафедрой экономической теории и маркетинга
УО «Витебский государственный технологический университет», Витебск, Беларусь, e-mail: gala-ya@list.ru

² К. э. н., доцент, доцент кафедры экономической теории и маркетинга
УО «Витебский государственный технологический университет», Витебск, Беларусь, e-mail: Yulia_KG@tut.by

Реферат

В Республике Беларусь кластерная политика становится важным инструментом стимулирования инновационного развития экономики. Кластерная концепция, принятая в 2014 году определяет методологию разработки кластерной политики в Республике Беларусь. Инструментами реализации кластерной политики являются государственные программы и стратегии, в которых запланировано создание структур кластерного типа. Региональная кластерная стратегия входит в состав стратегии инновационного развития. Важным фактором, повлиявшим на трансформацию кластерной концепции, является Четвертая промышленная революция (Индустрия 4.0), которая меняет экономику и общество. Целью статьи является разработка методических основ формирования региональных кластерных стратегий под влиянием Индустрии 4.0. Задачами исследования являются: идентификация предпосылок и условий трансформации кластерной концепции под влиянием Индустрии 4.0; разработка этапов и методов формирования региональных кластерных стратегий.

В статье определены следующие предпосылки трансформации кластерной концепции: развитие ИКТ и цифровизация общества; развитие сетевых форм взаимоотношений между субъектами; «Демократизация» знаний благодаря Интернету; цифровая трансформация, вызванная четвертой промышленной революцией. С учетом этих факторов разработана методика формирования региональных кластерных стратегий, которая включает следующие этапы. 1 этап: SWOT-анализ кластеризации в регионе (определены факторы и показатели); 2 этап: формулирование целей и задач по кластеризации в условиях цифровой экономики (построена архитектура целей и задач с учетом возможностей Индустрии 4.0); 3 этап: разработка кластерных стратегий (предложен многовариантный подход к оптимальному набору стратегических альтернатив в зависимости: от стадии жизненного цикла кластеров; степени развития кластерных отношений; от целей и приоритетов в цифровизации); 4 этап: реализация кластерной стратегии включает финансирование кластерных программ, оценку их эффективности, мониторинг за ходом выполнения.

Ключевые слова: кластер, кластерная политика, цифровизация, кластерная концепция, кластерная стратегия.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF FORMING REGIONAL CLUSTER STRATEGIES IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION OF THE ECONOMY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

G. A. Yasheva, Y. G. Vailunova

Abstract

In the Republic of Belarus, cluster policy is becoming an important tool for stimulating the innovative development of the economy. The cluster concept adopted in 2014 defines the methodology for developing cluster policy in the Republic of Belarus. The instruments for the implementation of cluster policy are state programs and strategies in which the creation of cluster-type structures is planned. The regional cluster strategy is part of the innovation development strategy. An important factor that influenced the transformation of the cluster concept is the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0), which is changing the economy and society. The purpose of the article is to develop methodological foundations for the formation of regional cluster strategies under the influence of Industry 4.0. The objectives of the study are: to identify the prerequisites and conditions for the transformation of the cluster concept under the influence of Industry 4.0; development of stages and methods for the formation of regional cluster strategies.

The article defines the following prerequisites for the transformation of the cluster concept: the development of ICT and the digitalization of society; development of network forms of relationships between subjects; «Democratization» of knowledge thanks to the Internet; digital transformation caused by the fourth industrial revolution. Taking into account these factors, a methodology for the formation of regional cluster strategies has been developed, which includes the following steps. 1. Stage: SWOT-analysis of clustering in the region (factors and indicators are determined); Stage 2: formulation of goals and objectives for clustering in the digital economy (the architecture of goals and objectives has been built, taking into account the capabilities of Industry 4.0); Stage 3: development of cluster strategies (a multivariate approach to the optimal set of strategic alternatives is proposed depending on: the stage of the cluster life cycle; the degree of development of cluster relations; the goals and priorities in digitalization); Stage 4: the implementation of the cluster strategy includes the financing of cluster programs, evaluation of their effectiveness, monitoring the progress of implementation.

Keywords: cluster, cluster policy, digitalization, cluster concept, cluster strategy.

Введение

Одним из стратегических приоритетов экономического развития в Республике Беларусь, определенным в ряде Государственных программ и концепций (Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы [1]; Стратегии устойчивого развития Витебской области на 2016–2025 годы [2]; Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года [3]) является создание структур кластерного типа. В Республике Беларусь кластерная политика становится важным инструментом стимулирования инновационного развития экономики. Вместе с тем процессы кластеризации не достаточно активны по сравнению с зарубежными странами. В кластерах зарубежных стран задействовано около трети от общей численности

занятых, а производительность труда – выше на 40 %. В Республике Беларусь процессы кластеризации не достаточно активны по сравнению с зарубежными странами, разработана Концепция формирования и развития инновационно-промышленных кластеров в Республике Беларусь и мероприятий по ее реализации (постановление Совета Министров Республики Беларусь 16.01.2014, № 27) [4].

Важным фактором, повлиявшим на трансформацию кластерной концепции, является Четвертая промышленная революция (Индустрия 4.0), которая меняет экономику и общество. Она быстро переформирует бизнес-среду. В этом контексте основной особенностью успешных экономик будет их способность быть гибкими, адаптироваться к изменениям и обладать новыми факторами, соответствующими Индустрии 4.0, такими как Интернет вещей; искусственный интеллект,

машинное обучение и робототехника; облачные вычисления; Big Data; аддитивное производство; кибербезопасность; интеграционная система; моделирование; дополненная реальность.

Теоретико-методологические аспекты формирования региональных инновационных кластеров подробно изложены в работах таких авторов, как В. Ю. Самойлов, Е. Г. Попкова, Ю. Г. Тюрина, А. А. Соколова, Н. В. Бычкова, Н. В. Семкова, Н. А. Серебрякова, Е. И. Лазарева, П. А. Калинин, А. А. Соколова и других.

Роль кластеров в экономическом развитии и активизации инновационной деятельности отмечалась многими исследователями – зарубежными (М. Бест, М. Портер, Д. Гров, Н. Эндру, Саксенниан А., Оржан, Солвелл, М. Энрайт, Х. Шмиц, С. Розенфельд и др.), российскими (С. Лозинский, А. А. Мигранян, Л. С. Марков, А. Праздничных, Т. В. Цихан, М. А. Ягольничер и др.), украинскими (Т. В. Дзядук, М.П. Войнаренко, С.И. Соколенко, В. И. Захарченко, Л. Л. Ковальская, Е. В. Крикавский, О. Кузьмин и др.), белорусскими (Д. М. Крупский, И. В. Новикова, Н. И. Богдан, П. Г. Никитенко, А. В. Марков, В. В. Валетко, Н. Г. Синяк, С. Ф. Пятинкин, Г. А. Яшева и др.).

Признавая теоретическую и практическую значимость исследований в области кластеров и инноваций, а также принятых в Республике Беларусь концепций и методических документов, тем не менее, полагаем, что разработка теоретико-методических основ кластеризации экономики Республики Беларусь и направления создания инновационных кластеров на платформе Индустрии 4.0. недостаточно обоснованно прослеживается в предыдущих исследованиях. Нерешенными научными задачами, а также задачами, требующими развития, являются: идентификация предпосылок и условий трансформации кластерной концепции под влиянием Индустрии 4.0; определение понятийного аппарата неокластеризации и типологии кластеров; разработка теоретических основ smart-кооперации стейкхолдеров в контексте Индустрии 4.0; исследование электронных платформ как инструмента smart-кооперации стейкхолдеров в контексте Индустрии 4.0.

Целью является разработка методики формирования неокластерной концепции под влиянием Индустрии 4.0.

Задачами исследования являются:

- разработать понятийный аппарат неокластеризации;
- разработать методику формирования региональных кластерных стратегий в цифровой экономике.

Понятийный аппарат неокластеризации

Обобщив подходы ученых к определению «кластер» и с учетом понятия и трендов развития Индустрии 4.0, полагаем, что неокластер товаропроизводителей – это сетевая структура комплементарных, взаимосвязанных по цепочке ценностей, юридически оформленных отношениями сотрудничества и коопетиции стейкхолдеров, базирующих свои бизнес-процессы на элементах Индустрии 4.0, объединенных вокруг ядра – производителя ключевого товара для решения общих задач [5].

Неокластеры обладают рядом отличительных признаков:

- стратегическая ориентация на инновации;
- цифровые коммуникации, совместные исследования и разработки и совместные инвестиции;
- использование киберфизических систем;
- использование технологии искусственного интеллекта;
- ускоренная интеграция вычислительных ресурсов в промышленные процессы;
- ориентация на производство без участия человека;
- стирание границ между физическими, цифровыми и биологическими технологиями в рамках производящей отрасли неокластера;
- более высокая конкурентоспособность по сравнению с кластерами;
- более низкие транзакционные издержки по сравнению с кластерами;
- использование имитационного моделирования и создание диджитал-двойников;
- реализация машинного обучения;
- роботизация и информатизация производства;
- активное использование облачных технологий;
- использование ERP, CRM программного обеспечения для автоматизации стратегий взаимодействия с заказчиками; BPM (business process management) для управления бизнес-процессами системы [6].

Повышение конкурентоспособности экономики в результате создания неокластеров обеспечивается за счет новых источников роста и развития – цифровых технологий и Интернет. В результате меняется содержание факторов роста и повышения эффективности.

1. Активизация инноваций за счет: быстрой диффузии знаний в кластере благодаря цифровым технологиям; ускорения внедрения инноваций в результате сотрудничества производителями и потребителями (создание потребительских сетей, участие потребителей в разработке новых продуктов – краудсорсинг); внедрения перспективных бизнес-моделей Индустрии 4.0 («подключенные» компании с размытыми границами и цифровые бизнес-экосистемы).
2. Снижение затрат: транзакционных; логистических (цифровизация логистики) и маркетинговых (цифровизация маркетинга, чат-боты, инбрендинг, кобрендинг); на обучение благодаря кооперации стейкхолдеров и дистанционному обучению; на производство и реализацию за счет передачи части функций на аутсорсинг (использования фрилансеров, удаленной работы) и оптимизации бизнес-процессов на базе современных систем управления ресурсами предприятия и жизненным циклом продукта; на производство в результате внедрения искусственного интеллекта.
3. Увеличение спроса за счет создания новых потребностей с применением инструментов: больших баз данных, интернете вещей, социальных сетей и др. повышения потребительской удовлетворенности и качества продукта в результате включения в кластеры потребителей (создание потребительских сетей, участие потребителей в разработке новых продуктов – краудсорсинг).
4. Рост инвестиций за счет сотрудничества в финансировании проектов всех стейкхолдеров – бизнеса, бюджетов разных уровней, банков, международных доноров, а также благодаря цифровым технологиям – блокчейн, интернет-платежам.
5. Повышение качества и доступности информации за счет внедрения стандартов: в области непрерывной информационной поддержки жизненного цикла продукции (CALS-технологии); стандартов обмена электронными данными для административных, коммерческих и транспортных целей (EDIFACT); стандартов, устанавливающих требования к качеству и оценке качества программных средств (международные стандарты серии SQuaRE (Software product Quality Requirements and Evaluation)).
6. Повышение качества человеческих ресурсов за счет быстрого получения новых знаний благодаря интернету, дистанционному обучению, доступности новых знаний.

Перечисленные факторы роста влияют на показатели конкурентоспособности страны / региона, такие как: увеличение субъектов МСП; рост экспорта; увеличение занятости; рост доли инновационных организаций и объемов инновационной продукции; увеличение доли ИКТ-составляющей в готовой продукции; рост инвестиций; рост ВВП/ВРП.

Таким образом, неокластеры формируют основные факторы повышения конкурентоспособности национальной/региональной экономики. Создание новых и трансформация уже существующих кластеров в неокластеры должна быть задачей государственной кластерной политики.

Методика формирования региональных кластерных стратегий в цифровой экономике

С учетом показателей экономической безопасности, теоретических основ неокластеризации, зарубежного опыта формирования кластерной политики, положений Концепции формирования и развития инновационно-промышленных кластеров в Республике Беларусь [4], а также предпосылок трансформации кластерной политики, предлагаются следующие этапы разработки и осуществления неокластерной политики в Республике Беларусь:

1. SWOT-анализ осуществления кластерной политики;
2. формулирование целей и задач кластерной политики в условиях цифровой экономики;
3. разработка кластерных стратегий;
4. реализация стратегий.

1 Этап – SWOT-анализ осуществления кластерной политики.

Анализ внешней среды целесообразно проводить с использованием метода SWOT-анализа. В качестве факторов внешней среды выступают: политические, экономические, научно-технические, социальные,

природно-климатические. Показатели для этих факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели оценки внешней среды

Факторы	Показатель
Политические факторы	Проекты международной технической помощи, финансирующих кластеры
	Развитие процессов глобализации и интернационализации, развитие внешней торговли
	Внешняя политика международных союзов и образований в отношении Республики Беларусь
	Приток иностранных инвестиций
Экономические факторы	Рост экономики
	Развитие общества потребления
Научно-технические факторы	Развитие информационных технологий Цифровизация бизнес-процессов
Социальные факторы	Повышение социальных стандартов
Природно-климатические факторы	Тренд на «зеленую экономику», на инклюзивную экономику

Примечание – Составлено авторами

В экономической сфере основными внешними источниками угроз национальной безопасности являются:

- ухудшение условий внешней торговли, привлечения кредитных и инвестиционных ресурсов вследствие неблагоприятной конъюнктуры мировых рынков;
- принятие зарубежными государствами протекционистских мер, установление барьеров и дискриминационных условий осуществления экспортно-импортных операций;
- развитие транзитных коридоров, систем транспортировки энергоресурсов, альтернативных, имеющихся в Республике Беларусь, целенаправленное ограничение транзитных возможностей Республики Беларусь;
- дискриминация Республики Беларусь в рамках международных союзов и образований.

В научно-технологической сфере основными внешними источниками угроз национальной безопасности являются:

- ограничение доступа белорусских исследователей и субъектов хозяйствования к новейшим технологиям, результатам исследований и разработок мирового уровня;
- целенаправленная политика иностранных государств и компаний, стимулирующая эмиграцию высококвалифицированных ученых и специалистов из Республики Беларусь.

В экономической сфере внутренними источниками угроз национальной безопасности являются:

- устаревшие технологии и основные средства, обуславливающие высокую энергоёмкость и материалоемкость производства, низкое качество выпускаемой продукции;
- отставание от других стран, прежде всего сопредельных, по темпам и качеству экономического роста;
- структурная деформированность экономики, преобладание материало- и энергоёмких производств, недостаточное развитие сферы услуг, невысокий удельный вес высокотехнологичной наукоемкой продукции и медленное обновление продукции;
- низкий уровень самообеспечения сырьевыми и энергетическими ресурсами;
- высокие административные барьеры для развития бизнеса, предпринимательской активности;
- несбалансированность экономического развития, выражающаяся в росте совокупного потребления сверх реальных возможностей экономики;
- неблагоприятные условия для привлечения иностранных инвестиций и кредитов;
- низкая диверсификация экспорта и импорта Республики Беларусь;
- рост неплатежей в экономике вследствие дефицита собственных оборотных средств и высокого удельного веса убыточных субъектов хозяйствования.

В научно-технологической сфере внутренними источниками угроз национальной безопасности являются:

- наукоёмкость ВВП ниже критического уровня, необходимого для воспроизводства научно-технологического потенциала;
- низкая инновационная активность и восприимчивость белорусской экономики;
- неэффективность национальной инновационной системы, в том числе законодательства, инфраструктуры трансфера технологий из науки в производство, материально-технической базы научных учреждений, системы финансирования, отраслевой (фирменной) науки;
- неблагоприятная возрастная структура и недостаточный уровень подготовки научных кадров.

Для оценки кластерной модели предлагаются следующие факторы и показатели (таблица 2).

Таблица 2 – Показатели оценки внутренней среды кластерной модели

Фактор	Показатель
Результативность	Количество кластеров
	Численность субъектов в кластерах
	Доля кластеров в объеме промышленного производства
	ВВП на 1 экономически активного населения
Качество мониторинга кластерной политики	Наличие системы периодической отчетности по деятельности кластеров
	Прозрачность системы мониторинга
	Периодичность отчета
Финансирование программ	Количество источников, определенных законодательно
	Количество налоговых и других льгот для субъектов кластера
	Конкурсные процедуры государственной поддержки кластеров
	Выбор приоритетных направлений финансирования

Примечание – Составлено авторами.

2 Этап – формулирование целей и задач, определение объекта и субъекта неокластерной политики.

Экономическая безопасность – состояние экономики, при котором гарантированно обеспечивается защищенность национальных интересов Республики Беларусь от внутренних и внешних угроз [7].

Основной целью неокластерной политики является формирование условий для устойчивого развития страны/региона и обеспечения экономической безопасности посредством организации и развития инновационных кластеров на основе использования элементов Индустрии 4.0.

На основе сформулированной цели и с учетом результатов SWOT-анализа определяются задачи неокластерной политики, которые состоят в следующем:

- разработка методов выбора инструментов Индустрии 4.0 для кластеризации;
 - внедрение элементов Индустрии 4.0 в процесс формирования кластеров;
 - создание и развитие цифровой кластерной инфраструктуры в стране/регионе;
 - разработка национальных/региональных программ организации и развития кластеров;
 - финансирование мер по реализации кластерной политики;
 - мониторинг процесса кластеризации и оценка его эффективности.
- Приоритетными направлениями развития кластеров в неокластерной политике являются:
- технологическое лидерство на основе развития цифровой инфраструктуры поддержки кластеров;
 - поддержка инновационных МСП, реализующих проекты в кластерах;
 - реформирование системы цифровизации образования под потребности развития кластеров;
 - формирование системы кластеризации на основе цифровизации на уровне страны/регионов;

- стимулирование создания международных кластеров;
- развитие системы доступа к международным электронным базам данных научной и технической информации, создание системы международных научных лабораторий и центров, а также обеспечение наиболее благоприятных экономических и имиджевых условий для проведения исследований в Беларуси и привлечения инвестиций в ее научно-инновационную сферу, создания новых инновационных кластеров;
- формирование экспертной системы технологического предвидения, осуществление постоянного мониторинга рынка научных идей и проведение правовой защиты интеллектуальной собственности.
- создание совместных компаний по выпуску высокотехнологичной и сложно-технической продукции, развитие сектора наукоемких услуг.

Объектами неокластерной политики являются инновационность в стране/регионе. В качестве количественных критериев их оценки предлагаются уровень инновационности и количество кластеров.

Субъектами проведения неокластерной политики являются органы управления наднационального, национального и регионального уровня.

Основываясь на зарубежном опыте, с учетом специфики государственного управления в Республике Беларусь предлагается система субъектов кластерной политики, включающая наднациональные, национальные, региональные органы и микроуровня:

Наднациональными органами управления выступают различные международные организации – ОСЭР, Европейский Союз, ЮНИДО, Европейский банк реконструкции и развития и др., которые финансируют донорские кластерные проекты.

Национальные органы управления кластерной политикой:

- Министерство экономики Республики Беларусь;
- Министерство торговли Республики Беларусь;
- государственные отраслевые концерны.

Субъекты региональной кластерной политики: комитеты по экономике местных администраций.

Микроуровень управления кластеризацией: организация кластерного развития – создаваемое или определяемое участниками кластера юридическое лицо (хозяйственное общество или объединение юридических лиц и (или) индивидуальных предпринимателей (ассоциация, союз), объединяющее участников кластера для достижения общих целей, обеспечивающее реализацию кластерного проекта, осуществляющее управление и эксплуатацию специализированной инфраструктуры кластерного развития, а также иные функции, определенные законодательством Республики Беларусь.

В организации кластерного развития или в организации, на которую возложены такие функции в соответствии с договором о совместной деятельности, образуются совет директоров или совет кластера.

К основным функциям данных органов управления отнесены:

- формирование и обеспечение реализации стратегии кластера;
- утверждение кластерного проекта, внесение в него изменений и (или) дополнений;
- принятие решений в отношении объектов специализированной инфраструктуры кластерного развития, инженерной и транспортной инфраструктуры, а также иного имущества, необходимого для функционирования кластера;
- обращение за оказанием государственной поддержки, организация работы по мониторингу за целевым и эффективным использованием средств государственной поддержки;
- иные функции по развитию кластера.

В организации кластерного развития или организации, на которую возложены функции организации кластерного развития в соответствии с договором о совместной деятельности, будет образован исполнительный орган (единоличный или коллегиальный), к основным функциям которого отнесена подготовка отчета для совета директоров или совета кластера о ходе реализации кластерного проекта.

3 Этап – разработка кластерных стратегий.

Центральным этапом формирования кластерной политики является разработка кластерной стратегии, которая, в соответствии с принципом многоуровневости формирования, должна разрабатываться на уровне государства (национальная), на местном уровне (региональная) и на уровне субъектов кластеров (микроуровень).

Исходя из обозначенного системного подхода, кумулятивного характера процессов кластеризации, а также роли кластеров в повышении конкурентоспособности экономических систем, региональная кластерная стратегия должна быть составной частью стратегии социально-экономического развития региона. Кластерная стратегия на микроуровне (стратегия участия в кластере) должна быть составной частью стратегии повышения конкурентоспособности предприятий.

На основе результатов исследования кластеров генерируются стратегические альтернативы. Оптимальный набор стратегических альтернатив определяется в зависимости, во-первых, от стадии жизненного цикла кластеров: возникающие, кластеры в стадии развития, кластеры в стадии упадка. Например, для возникающих кластеров стратегиями поддержки их развития могут быть просвещение и популяризация кластерного подхода, обеспечение форума для конструктивного диалога между участниками кластеров, привлечение иностранных инвестиций в кластер, экономическое стимулирование сетевого сотрудничества в науке, образовании, маркетинге и сбыте.

Для кластеров в стадии развития – поддержка предпринимательства, расширение источников финансирования, трансфер технологий в кластере, проведение совместных маркетинговых исследований и сбыта на внешних рынках, развитие приграничного сотрудничества, проведение совместных разработок новой продукции для субъектов кластера.

Для кластеров в стадии упадка – создание банка инвестиционных проектов в кластере, создание объектов финансовой инфраструктуры в регионе (общества взаимного кредитования, венчурные фонды и др.), привлечение иностранных инвестиций в кластер, расширение приграничного сотрудничества и сбыта на внешнем рынке.

Во-вторых, стратегические альтернативы будут зависеть от степени развития кластерных отношений. Например, оптимальная стратегия для реальных кластеров будет отличаться от стратегии для потенциальных кластеров. Так, стратегическими альтернативами для потенциальных кластеров могут быть следующие: просвещение и популяризация кластеров, экономическое образование специалистов органов государственного, регионального управления и менеджеров предприятий, организационное объединение субъектов в некоммерческую организацию, разработка методов экономического стимулирования кластеров и др.

Для реальных кластеров, которые уже организационно оформлены (создана некоммерческая организация) и налажены отношения сотрудничества, стратегическими альтернативами могут быть: создание общей деловой инфраструктуры для кластера, привлечение иностранных инвестиций в кластер, осуществление программ совместного сбыта на внешних рынках, совместных научных разработок и др.

Оптимальная стратегия для кластеров, которые можно охарактеризовать как очень локализованные, широкие, глубокие, с высокой конкурентоспособностью, в которых доминируют малые и средние предприятия и преобладают долгосрочные отношения, будет очень отличаться от стратегии для тех кластеров, которые рассредоточены, узкие, мелкие, имеют низкую конкурентоспособность.

В-третьих, стратегические альтернативы зависят от целей и приоритетов в формировании кластерных связей и сотрудничества. Программы кластерного развития могут быть сконцентрированы на следующих направлениях: расширении и углублении местного рынка; привлечении иностранных инвесторов; сочетании этих двух направлений. По этому фактору формирования кластерной стратегии возможны следующие стратегические альтернативы:

- стратегия национального/регионального кластера, целью которой является повышение конкурентоспособности страны/региона путем выявления кластеров в стране/регионе и создания мер по их развитию. Преимущество этой стратегии в том, что она способствует созданию особых конкурентных преимуществ стране/региону, которые сложно скопировать;
- стратегия интернациональных кластеров, которая предполагает создание кластеров путем привлечения иностранных инвесторов и внешних поставщиков. Преимущество этой стратегии заключается в быстром развитии региональной экономики. Слабая сторона этой стратегии состоит в том, что интернациональные кластеры являются предметом для копирования и конкуренции.

Кроме того, существует риск, что иностранные инвесторы по каким-либо причинам могут свернуть свои мощности и уйти с рынка;

- смешанная стратегия, согласно которой объединяются стратегия национального/регионального кластерного развития и стратегия интернационального кластера. Смешанная стратегия, будучи по существу привлекательной, может привести к неопределенности и конкуренции среди стратегий, направленных на местные и иностранные предприятия.

Таким образом, оптимальный набор стратегических альтернатив будет зависеть от существующих местных ресурсов и изначальных возможностей самого кластера, а также от проводимой кластерной политики. Выбор стратегических кластерных альтернатив осуществляется по следующим критериям: осуществимость, достижимость цели, ресурсообеспеченность, минимальный риск, период реализации стратегии.

На основе определенных кластерных стратегий разрабатывается кластерная программа, включающая: мероприятия, сроки, затраты, источники финансирования, ответственных исполнителей. Кластерная программа разрабатывается по приоритетным направлениям, выявленным в ходе анализа, и состоит из отдельных проектов, например, проект организации туристического кластера, проект организации кластера обуви и т. д., проект создания промышленной ассоциации, проект создания кластерной инфраструктуры и др. Таким образом программа может формироваться как мультипроект.

4 Этап - реализация кластерной стратегии включает финансирование кластерных программ, оценку их эффективности, мониторинг за ходом выполнения.

В проекте постановления Совета Министров Республики Беларусь «О некоторых вопросах формирования и реализации комплексных проектов на основе кластерной модели развития» предусмотрен следующий механизм финансирования кластерных проектов.

Комплексные проекты могут предполагать реализацию своих мероприятий с использованием средств инновационных фондов, иной государственной финансовой поддержки, а также быть подготовлены к реализации без указанной поддержки (субъектами самостоятельно, за счет собственных средств либо иных источников, не запрещенных законодательством Республики Беларусь).

Положением о порядке формирования и реализации комплексных проектов определяется, что комплексный проект подлежит реализации в рамках одного или нескольких смежных видов экономической деятельности, при условии соответствия положениям Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы, а также наличия в его составе одной из совокупности мероприятий комплексного проекта согласно абзацам второму и третьему настоящей части:

- не менее одного научно-технического проекта и не менее одного инновационного проекта, предусматривающего коммерциализацию результата (результатов) научно-технической деятельности, полученного (полученного) после реализации этого научно-технического проекта, посредством организации новых производств по выпуску инновационной и (или) высокотехнологичной продукции, в том числе на основе интеграции информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий, являющихся отечественными и базирующихся на V и VI технологических укладах;
- не менее двух инновационных проектов, предусматривающих коммерциализацию ранее полученного (полученных) в Республике Беларусь результата (результатов) научно-технической деятельности, посредством организации новых производств по выпуску инновационной и (или) высокотехнологичной продукции, в том числе на основе интеграции информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий, являющихся отечественными и базирующихся на V и VI технологических укладах.

В рамках комплексного проекта могут быть созданы объекты специализированной инфраструктуры (инновационной, инженерной, транспортной), необходимые для обеспечения полноценной производственно-хозяйственной и научно-инновационной деятельности участников кластера.

Источником финансирования мероприятий комплексного проекта являются средства инновационного фонда, а также иные источники, не запрещенные законодательством Республики Беларусь.

Оценка и мониторинг эффективности результатов реализации комплексных проектов осуществляется по каждому мероприятию в отдельности (оценивается результат выполнения каждого бизнес-плана, каждого ТЭО). Так, организации-исполнители мероприятий комплексных проектов будут два раза в год до 10 января и до 10 июля направлять головной организации-исполнителю отчеты о ходе реализации данных мероприятий за истекшие шесть месяцев (согласно проекту постановления Совета Министров Республики Беларусь «О некоторых вопросах формирования и реализации комплексных проектов на основе кластерной модели развития»).

В настоящее время проект постановления Совета Министров Республики Беларусь «О некоторых вопросах формирования и реализации комплексных проектов на основе кластерной модели развития» еще не принят. С учетом зарубежного опыта финансирования кластеров, а также институциональных условий Республики Беларусь предлагаются следующие методы и инструменты финансирования кластерных проектов:

- Финансирование на условиях ГЧП создания кластерной инфраструктуры (центров кластерного развития, стартап-школ, сети бизнес-ангелов, центров мастерства, центров кластерных инициатив и др.) [8]. Такой способ финансирования требует привлечения государства и предполагается только для проектов, в которых возможен государственный интерес. Одним из вариантов привлечения средств частных инвесторов являются механизмы: концессия, ВООТ (built–own–operate–transfer или «строить – владеть – эксплуатировать – передавать») и энергосервисный контракт.
- Конкурсное финансирование инвестиционных кластерных проектов, предоставление грантов на разработку новых технологий в кластере.
- Предоставление субъектам кластеров: льгот при сотрудничестве в образовании и научных исследованиях, государственных гарантий банкам под инвестиционные проекты субъектов кластера.
- Привлечение средств международных доноров – ОЭСР, ЮНИДО, Центральная Европейская Инициатива и Европейский банк реконструкции и развития.
- Проектное финансирование кластерных проектов в счет ожидаемой прибыли в период реальной эксплуатации. При таком варианте финансирования проекта потоки поступления денежных средств должны служить основными источниками возвращения кредитов, доходов инвесторов и акционеров, а активы проекта могут выступать имущественным залогом.
- Программы поддержки малого и среднего предпринимательства со стороны Министерства экономики. В рамках такой поддержки на конкурсной основе должно осуществляться предоставление субсидий субъектам кластеров на финансирование мероприятий, предусмотренных в соответствующей региональной программе, в том числе на развитие кластеров в соответствующем регионе.
- Региональные программы поддержки развития территориальных кластеров со стороны местных бюджетов.
- Финансирование проектов участников кластеров также может осуществляться с помощью ряда финансовых институтов, включая государственную корпорацию открытое акционерное общество «Банк развития Республики Беларусь», региональные агентства развития инвестиций, Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и других финансовых институтов, Фонд поддержки инноваций в научно-технической сфере.

Заключение

Разработанная методика формирования региональной кластерной стратегии базируется на неокластерной концепции. Предложенные этапы отражают состояние внешней и внутренней среды кластерной модели, построены на методах и инструментах, соответствующих институциональным условиям Республики Беларусь. Методика представляет практический интерес для государственных и региональных органов управления. Внедрение указанных методов и инструментов финансирования кластерных проектов расширит источники и позволит адресно поддерживать наиболее конкурентоспособные кластеры.

Список цитированных источников

1. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: (Указ Президента Республики Беларусь 15.09.2021 № 348)– 2021. – Режим доступа: https://pravo.by/upload/docs/op/P32100348_1632171600.pdf. – Дата доступа: 12.08.2022.
2. Стратегия устойчивого развития Витебской области на 2016–2025 годы [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <https://docplayer.com/44311405-Cstrategiya-ustoychivogo-razvitiya-vitebskoj-oblasti.html>. – Дата доступа: 21.09.2022.
3. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года) [Электронный ресурс]: (Протокол заседания Президиума Совета Министров Республики Беларусь 02.05.2017, № 10– 2021. – Режим доступа: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>. – Дата доступа: 29.09.2022.
4. Концепция формирования и развития инновационно-промышленных кластеров в Республике Беларусь и мероприятий по ее реализации) [Электронный ресурс]: (постановление Совета Министров Республики Беларусь 16.01.2014, № 27). – Режим доступа: https://pravo.by/upload/docs/op/ C21400027_1390424400.pdf. – Дата доступа: 25.04.2022.
5. Кондратьева, В. Д. Неокластеризация на платформе Индустрии 4.0 как драйвер стабилизации экономики Республики Беларусь в условиях пандемии COVID-19: теоретические и практические аспекты [Электронный ресурс] / В. Д. Кондратьева, Г. А. Яшева // Сборник статей лауреатов конкурса НИРС-2021 Республики Беларусь. – Минск, 2022. – Режим доступа: <http://www.sws.bsu.by/respkonk.html>. – Дата доступа: 29.09.2022.
6. Вайлунова, Ю. Г. Теоретические аспекты неокластеризации / Ю. Г. Вайлунова, Г. А. Яшева // Материалы докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ»: в 2 т. – Витебск, 2022. – Т.1. – 276 с. – С. 275–277.
7. Концепция национальной безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]: (Указ Президента Республики Беларусь 09.11.2010 № 575– Режим доступа: <https://www.prokuratura.gov.by/ru/acts/kontseptsiya-natsionalnoy-bezopasnosti-respubliki-belarus/>. – Дата доступа: 21.09.2022.
8. Яшева, Г. А. Государственно-частное партнерство как инструмент стимулирования инноваций: методологические аспекты / Г. А. Яшева // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – № 4. – С. 253–261.

References

1. Gosudarstvennaya programma innovacionnogo razvitiya Respubliki Belarus' na 2021 – 2025 gody [Elektronnyj resurs]: (Ukaz Prezidenta Respubliki Belarus' 15.09.2021 № 348)– 2021. – Rezhim dostupa: https://pravo.by/upload/docs/op/P32100348_1632171600.pdf. – Data dostupa: 12.08.2022.
2. Strategiya ustojchivogo razvitiya Vitebskoj oblasti na 2016–2025 gody [Elektronnyj resurs]. – 2015. – Rezhim dostupa: <https://docplayer.com/44311405-Cstrategiya-ustoychivogo-razvitiya-vitebskoj-oblasti.html>. – Data dostupa: 21.09.2022.
3. Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2030 goda) [Elektronnyj resurs]: (Protokol zasedaniya Prezidiuma Soveta Ministrov Respubliki Belarus' 02.05.2017, № 10– 2021. – Rezhim dostupa: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>. – Data dostupa: 29.09.2022.
4. Konceptsiya formirovaniya i razvitiya innovacionno-promyshlennyh klasterov v Respublike Belarus' i meropriyatij po ee realizacii) [Elektronnyj resurs]: (postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' 16.01.2014, № 27). – Rezhim dostupa: https://pravo.by/upload/docs/op/ C21400027_1390424400.pdf. – Data dostupa: 25.04.2022.
5. Kondrat'eva, V. D. Neoklasterizacija na platforme Industrii 4.0 kak drajver stabilizacii ekonomiki Respubliki Belarus' v usloviyah pandemii COVID-19: teoreticheskie i prakticheskie aspekty [Elektronnyj resurs] / V. D. Kondrat'eva, G. A. YAsheva // Sbornik statej laureatov konkursa NIRS-2021 Respubliki Belarus'. – Minsk, 2022. – Rezhim dostupa: <http://www.sws.bsu.by/respkonk.html>. – Data dostupa: 29.09.2022.
6. Vajlunova, Yu. G. Teoreticheskie aspekty neoklasterizacii / Yu. G. Vajlunova, G. A. YAsheva // Materialy докладов 55-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii prepodavatelej i studentov / UO «VGTU»: v 2 t. – Vitebsk, 2022. – T.1. – 276 s. – С. 275–277.
7. Konceptsiya nacional'noj bezopasnosti Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]: (Ukaz Prezidenta Respubliki Belarus' 09.11.2010 № 575– Rezhim dostupa: <https://www.prokuratura.gov.by/ru/acts/kontseptsiya-natsionalnoy-bezopasnosti-respubliki-belarus/>. – Data dostupa: 21.09.2022.
8. YAsheva, G. A. Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo kak instrument stimulirovaniya innovacij: metodologicheskie aspekty / G. A. YAsheva // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. – 2016. – № 4. – С. 253–261.

Материал поступил 09.02.2023, одобрен 05.03.2023, принят к публикации 06.03.2023

Научное издание

ВЕСТНИК БРЕСТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ);
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ
№ 1 (130). 2023 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 «Геоэкология»	Волчек А. А.
Зам. ответственного редактора по разделу «Геоэкология»	Мешик О. П.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Экономика»	Касперович С. А.
Зам. ответственного редактора по разделу «Экономика»	Зазерская В. В.
Технический редактор	Соколюк А. П.
Дизайн	Колб К. С.
Корректор	Дударук С. А.

Лицензия № 02330/463 от 27.03.2014 г. Подписано в печать
22.03.2023 г. Формат 60×84 1/8. Бумага «Performer». Гарнитура «Arial».
Уч.-изд. л. 20. Усл. печ. л. 18,6. Заказ № 187. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе УО «Брестский государственный
технический университет» Адрес редакции: 224017, г. Брест,
ул. Московская, 267, Брестский государственный технический
университет. Тел. 32 17 40, e-mail: rio_nikand@mail.ru,
<http://journal.bstu.by>



9 771818 111004 23001