



ISSN 1818-1112

№ 1(127)

Научный журнал
Scientific journal

ВЕСТНИК

Брестского государственного
технического университета

VESTNIK

Brest State
Technical University

WWW.BSTU.BY

DOI 10.36773/1818-1112-2022-127-1

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
БАХАНОВИЧ АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ
д-р техн. наук, доцент, ректор БрГТУ

Заместитель главного редактора
ШАЛОБЫТА НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ
канд. техн. наук, доцент, проректор 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 «Информационные технологии»

д-р техн. наук, профессор ГОЛОВКО ВЛАДИМИР АДАМОВИЧ (ответственный редактор)
канд. физ.-мат. наук, доцент ЛЕБЕДЬ СВЕТЛАНА ФЁДОРОВНА (зам. ответственного редактора)

д-р техн. наук, профессор ГОЛЕНКОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ
д-р техн. наук, профессор ДУДКИН АЛЕКСАНДР АРСЕНТЬЕВИЧ
д-р техн. наук, профессор КРАСНОПРОШИН ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ
д-р физ.-мат. наук, доцент ОРЛОВ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ
д-р физ.-мат. наук, профессор ЧИЧУРИН АЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

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 ЗАЗЕРСКАЯ ВИКТОРИЯ ВАСИЛЬЕВНА (ответственный редактор)
канд. экон. наук, доцент МЕДВЕДЕВА ГУЛЬНАРА БАРАНГАЛИЕВНА (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-теоретический журнал «Вестник Брестского государственного технического университета» включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований технической (строительство, машиностроение, информационные технологии, геоэкология) отрасли науки и экономической отрасли науки

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)



ВЕСТНИК

Брестского государственного технического университета

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

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

1⁽¹²⁷⁾ '2022

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО

АНДРЕЮК С. В. Технологические схемы очистки и кондиционирования воды нецентрализованных систем питьевого водоснабжения **2**

БЕЛОВ С. Г., ДМУХАЙЛО Е. И., НАУМЧИК Г. О., РЫБАК Е. С. Рекомендации по повышению эффективности обработки осадков сточных вод города Бреста на механо-биологических сооружениях брестского мусороперерабатывающего завода (БМПЗ) **6**

ГАСАНОВ М. В. Необходимое и достаточное условие существования подвижной особой точки для нелинейного дифференциального уравнения третьего порядка **13**

ДУБОДЕЛ В. П., ЗЛОТНИКОВ И. И., ШАПОВАЛОВ В. М. Опыт разработки гидроизоляционных битумно-полимерных материалов с использованием вторичных полимеров и их смесей **17**

ЖИТЕНЁВ Б. Н., ГУРИНОВИЧ А. Д. Технология обесцвечивания гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод коагулированием с предварительным окислением пероксидом водорода в присутствии металлов переменной валентности **21**

ЖИТЕНЁВ Б. Н., ГУРИНОВИЧ А. Д., СЕНЧУК Д. Д. Технология сорбционной очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди гранулированным торфом **26**

ЛЕВКЕВИЧ В. Е., САЙДОВ Ф. Н. Критерии рационального размещения поверхностных водозаборов на водохранилищах Беларуси и Таджикистана **32**

МОРОЗ В. В. К вопросу динамики фильтрационного осветления суспензий на каркасно-засыпных фильтрах **37**

ПИЛИПЕНКО М. В., КОЗЛОВСКАЯ И. Ю., РОМАНОВСКИЙ В. И. Железо-лантан-содержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания **42**

СЕВЕРЯНИН В. С. Управляемое пульсирующее горение **45**

ТУР Э. А., БАСОВ С. В. Лакокрасочные материалы с повышенной водостойкостью для защиты бетонных строительных конструкций гидротехнических сооружений **49**

ШАЛОБЫТА Н. Н., АКУЛОВА О. А., ШАЛОБЫТА Е. Н. Мировой и отечественный опыт нормирования в области информационного моделирования зданий и сооружений **53**

МАШИНОСТРОЕНИЕ

АЛИФАНОВ А. В., БОГДАНОВИЧ И. А., КРИВОНОС Ю. И., МАЛЕРОНОК В. В., МИЛЮКОВА А. М., ТОЛКАЧЕВА О. А. Исследование процесса высоковольтного электроразрядного спекания порошка быстрорежущей стали Р6М5 **62**

БАХАНОВИЧ А. Г. Исследование физических процессов передачи мощности в фрикционных ременных передачах **66**

БАХАНОВИЧ А. Г. Конструкторские и технологические методы снижения шумоизлучения зубчато-ременных передач **70**

ПАНТЕЛЕНКО Ф. И., КАРПЕЦ М. Н. Особенности химико-термической обработки микрообъектов различных структурных классов **73**

СТРОК Е. Я., БЕЛЬЧИК Л. Д., АНАНЧИКОВ А. А., САВЧУК С. В. Повышение точности копирования рельефа поляподпружиненными сошниками посевного агрегата с использованием электрогидравлической системы управления **77**

ГЕОЭКОЛОГИЯ

ВОЛЧЕК А. А., НОВОСЕЛЬЦЕВА А. Г. Оценка влияния климата на расход тепловой энергии в энергоэффективных жилых домах **83**

ВОЛЧЕК А. А., ПАРФОМУК С. И., ШЕШКО Н. Н., ШПЕНДИК Н. Н., ДАШКЕВИЧ Д. Н., СИДАК С. В., КУХАРЕВИЧ М. Ф. Оценка влияния рыбхоза «селец» на сток реки Ясельда **86**

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ГАРЧУК И. М. Методика проведения мониторинга и корректировки процессов стратегического управления организацией **97**

МАРТЫНОВИЧ Н. В. Международное экономическое сотрудничество Республики Беларусь и Китая: этапы и перспективы развития **100**

ПАНАСЮК В. В. Концептуальные основы и особенности функционирования областных энергосистем **106**

ЦЕХАНОВИЧ Д. Б. Подходы к формированию педагогической системы современного вуза **112**

УДК 628.162+ 628.316

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОЧИСТКИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОДЫ НЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

С. В. Андreyuk

*К. т. н., доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов
Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: a_asv75@mail.ru*

Реферат

Приводится аналитический обзор достижений и публикаций по разработке водоочистных устройств нецентрализованных систем питьевого водоснабжения. С учетом проведенного анализа предлагаются и обосновываются результаты собственных экспериментальных исследований по оптимизации технологического режима очистки воды от нитратов на ионообменных смолах для нецентрализованных локальных и индивидуальных систем питьевого водоснабжения. Исследование наиболее эффективных анионитов проводилось с применением математического планирования экспериментов, целью которого являлось изучение влияния основных факторов работы ионообменной колонки на эффективность удаления нитратов подземных вод. Полученные частные решения экспериментально-статистических зависимостей в области оптимальных значений позволяют оценить изменение эффекта очистки воды от нитратов по уравнениям линейной регрессии с учетом варьирования скорости фильтрации, соотношения высоты ионообменной колонки и ее диаметра, температуры обрабатываемой воды. Разработаны технологические схемы и устройства для очистки и кондиционирования подземных вод нецентрализованных индивидуальных систем питьевого водоснабжения с использованием метода ионного обмена для удаления нитратов.

Ключевые слова: очистка, кондиционирование воды, нецентрализованные системы, питьевое водоснабжение, нитраты, ионный обмен, технологические схемы.

TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR WATER PURIFICATION AND CONDITIONING OF NON-CENTRALIZED DRINKING WATER SUPPLY SYSTEMS

S. V. Andreyuk

Abstract

The article provides an analytical review of the achievements and publications on the development of water treatment devices for non-centralized drinking water supply systems. It contains the results of our own experimental research on the optimization of the technological regime of water purification from nitrates on ion-exchange resins for non-centralized local and individual drinking water supply systems. The study of the most effective anion exchangers was carried out using mathematical planning of experiments, the purpose of which was to study the influence of the main factors of the operation of the ion-exchange column on the efficiency of removing nitrates from groundwater. The obtained particular solutions of the experimental-statistical dependencies in the range of optimal values make it possible to assess the change in the effect of water purification from nitrates according to linear regression equations taking into account the variation in the filtration rate, the ratio of the height of the ion-exchange column and its diameter, and the temperature of the treated water. Technological schemes and devices have been developed for the purification and conditioning of underground waters of non-centralized individual drinking water supply systems using the ion exchange method to remove nitrates.

Keywords: purification, water conditioning, decentralized systems, drinking water supply, nitrates, ion exchange, technological schemes.

Введение

Согласно техническому регламенту Таможенного союза 010/2011 «О безопасности машин и оборудования», действующему в Республике Беларусь, как и на территории Евразийского экономического союза, оборудование для подготовки и очистки питьевой воды входит перечень продукции, подлежащей подтверждению в форме декларирования соответствия. К данному оборудованию относятся, в том числе, системы и устройства предназначенных для очистки, доочистки и кондиционирования питьевой воды (далее – водоочистные системы и устройства) нецентрализованных систем питьевого водоснабжения, к разработке, производству, испытаниям и реализации которых устанавливаются определенные гигиенические требования.

Различают водоочистные системы и устройства индивидуального, коллективного, производственно-технологического назначения, предназначенные для очистки, доочистки и кондиционирования питьевой воды подземных и поверхностных водоисточников с производительностью до 150 м³/час. К водоочистным системам и устройствам относятся также бытовое оборудование для подготовки и очистки питьевой воды. Количество стадий обработки воды в бытовых условиях в значительной степени определяется качеством очистки в системе централизованного водоснабжения или качеством воды индивидуального источника водоснабжения – скважины, шахтного колодца. Дополнительная водоподготовка питьевой воды, прошедшей сооружения централизованной системы водоснабжения, бытовыми устройствами включает, как правило, одну или две стадии. В других случаях необходимо использовать большее количество стадий очистки [1, 2].

В водоочистных системах и устройствах допускается использовать методы обработки воды: макро-, микро- и ультрафильтрация; осмос и обратный осмос; сорбция, коагуляция, флокуляция; электрохимическая коагуляция; ультрафиолетовое облучение, обработка ультразвуком, озонирование, низкоэнергетический импульсный разряд, насыщение ионами серебра, йодирование; кондиционирование воды (йод, фтор, селен и другие вещества); катионный и анионный обмен. Применение методов катионного и анионного обмена для получения питьевой воды допускается при использовании в водоочистных системах и устройствах в качестве загрузок ионообменных волокнистых материалов и смол, разрешенных Министерством здравоохранения Республики Беларусь к применению в практике хозяйственно-питьевого водоснабжения с обязательным применением совместно с ними активированных углей и/или микро-ультрафильтрации. Правильный выбор и сочетание отдельных приемов в общей технологической схеме подготовки подземных вод различного исходного состава гарантируют получение качественной питьевой воды [3].

Согласно обзору литературных данных и результатам современных гидрохимических наблюдений, которые указывают на высокую степень загрязненности подземных вод азотистыми соединениями, актуальной остается проблема очистки воды от нитратов [4, 5]. Высокие уровни загрязнения воды шахтных колодцев и скважин нитратами заслуживают самого серьезного внимания, так как отрицательное влияние нитратов, содержащихся в воде, проявляется в заболевании метгемоглобинемией (в особенности у детей грудного и младшего возраста). Длительное употребление воды с повышенным

содержанием азотистых соединений вызывает болезни обмена веществ и нервной системы [6].

Исследование технологических возможностей водоочистных систем и устройств децентрализованных систем питьевого водоснабжения проводились с целью разработать технологию очистки подземных вод от нитратов, обеспечивающую получение воды питьевого качества, с использованием метода ионного обмена.

Аналитический обзор достижений по разработке водоочистных устройств децентрализованных систем питьевого водоснабжения

Водоочистные устройства индивидуального назначения предназначены для очистки воды в домашних (бытовых) условиях. Для пользующихся централизованным водоснабжением горожан и сельских жителей – для доочистки и кондиционирования водопроводной воды, для сельских жителей при отсутствии централизованного водоснабжения – для очистки и обеззараживания речной, озерной или колодезной воды. Такие устройства должны быть простыми в монтаже и обслуживании, а количество эксплуатационных операций должно быть сведено до минимума или лучше – вообще отсутствовать. Вопрос автоматизации не имеет однозначного ответа, поскольку определенный технологический режим может быть регламентирован инструкцией по пользованию либо задаваться автоматически.

Водоочистные устройства коллективного, производственно-технологического назначения для обслуживания небольших потребителей, таких как вахтовые, пастбищные и полевые бригады, детские сады и ясли, школы, больницы, воинские казармы и т. п. могут быть более сложными в эксплуатации и требовать специально подготовленного технического персонала или обслуживаться бригадами по сервису. Здесь уровень автоматизации может быть достаточно высоким, а технологический режим включать стадии регенерации. При этом дополнительное оборудование для регенерации должно включаться в общую технологическую схему [7, 8].

Достаточно широкий набор фильтров и мембранных установок выпускают следующие фирмы: RAINFRESH («Райнфреш», Канада), TELEDYNE WATER PIK («Теледайн Уотер Пик», США), АМТЕК («Аметек», США), SAFE WATER TECHNOLOGY («Сейф Уотер Систем», США), ЗАО «Гейзер» (Россия), реализовавшие несколько типов технологии очистки и кондиционирования воды.

Наиболее простым решением является использование седиментационных фильтров. Они предназначены для удаления взвешенных частиц, которые обычно представляют собой загрязнения природного происхождения – песок, глинистые частицы, ил и ржавчину. Седиментационные фильтры рекомендуется использовать в каждом доме – либо в помещении, либо в месте водозабора, если источник водоснабжения индивидуального пользования. Так, разработана установка [9], которая может быть использовано в системах предварительной очистки природных вод подземных водисточников преимущественно от железа, марганца и взвешенных веществ в хозяйственно-питьевом, промышленном и сельскохозяйственном водоснабжении.

Усложнение технологии при содержании в воде растворенных молекулярных и ионных примесей, которые не могут быть задержаны седиментационными фильтрами, сводится к добавлению второй стадии – адсорбции на угольных или минеральных адсорбентах. Обычно адсорбционные фильтры выполнены в виде патрона из гранулированного активированного угля – картриджа – или сформованного композитного блока. Основное назначение угольных фильтров – это удаление посторонних привкусов и запахов, которые присутствуют в природной воде либо возникают в процессе ее хлорирования на водопроводных станциях. Для удаления ионных примесей, таких как нитраты, нитриты, тяжелые металлы, используют природные или синтетические иониты. Так, фирма «Сейф Уотер Систем» адсорбционные угольные фильтры дополнительно комплектуется блоками, например с анионитом, для извлечения нитратов и нитритов. Ресурс этих блоков составляет от 3 до 6 месяцев в зависимости от содержания этих загрязнений в исходной воде. В некоторых адсорбционных фильтрах этим целям служат природные иониты – минералы цеолиты (шунгит, клиноптилолит). Адсорбционные фильтры разрешается использовать, если вода предварительно надежно дезинфицирована. Более того, использование угольных адсорбционных фильтров для недезинфицированной воды приводит к размножению микроорганизмов на загрузке, что дает дополнительное загрязнение фильтра.

Задачи обеззараживания в водоочистных системах и устройствах решаются с помощью разных технологических приемов. Так, в адсорбционных фильтрах «Родник», «Сейф Уотер Систем» используется обеззараживание тяжелыми металлами: в первом случае серебром, во втором – медью. Однако бактерицидные свойства тяжелых металлов (включая серебро) проявляются в концентрациях, близких к предельно допустимым. Причем для получения надежного бактерицидного эффекта время экспозиции должно быть достаточно длительным. Следует отметить, что установки, в которых использован этот метод обеззараживания, не дают необходимого времени контакта в режиме фильтрации воды; функция носителей серебра и меди сводится к обеспечению консервирующего действия, когда фильтрат не отбирается. Фирма «Теледайн Уотер Пик» проводит работы по оценке возможности озонирования применительно к водоочистным устройствам. Предложено обеззараживание воды проводить методами прямого электролиза, ультрафиолетовым облучением, применением йодированных полимеров. Известна, в частности, установка для глубокой очистки водопроводной воды, а также воды из поверхностных и подземных источников, состоящая из входного фильтра механической очистки воды, фильтров обезжелезивания и умягчения, а также обеззараживателя воды, выполненного в виде размещенной в трубопроводе ультрафиолетовой лампы [10].

Мембранные водоочистные устройства обычно имеют комплексную технологическую схему, в которой представлены в виде блоков седиментационные и адсорбирующие фильтры, – установки фирм «Нимбус», «Аметек», «Теледайн Уотер Пик», «ЭД-500». Исключением являются мембранные устройства «Родничок» и «Опреснитель» (НИИХИММАШ) – в них реализован только один основной технологический процесс, что сужает круг решаемых задач и делает эти устройства уязвимыми ко многим примесям. В мембранных водоочистных системах (мембранных модулях) используются два типа технологий: баромембранные (ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос) и электромембранные (электродиализ). Технологический процесс обратного осмоса заключается в том, что вода продавливается через полупроницаемую мембрану, в результате чего до 95 % растворенных минеральных и органических примесей задерживаются мембраной. Эти установки дают питьевой воды в объеме 10–15 % от поступающей на очистку. Электромембранные водоочистные устройства в основном рассчитаны на опреснение соленых вод. Установка «ЭД-500» имеет комплексную систему, включающую стадии фильтрации грубых взвесей, дезинфекции, адсорбции, опреснения и кондиционирования. В работе [11] представлены результаты исследований ионнообменных и мембранных методов как комплексных методов очистки природных подземных вод с повышенным содержанием катионов металлов (железа, кальция, магния). Показана возможность использования исследуемых методов как комплексных. Известно использование для очистки воды от нитратов метода ионного обмена [12, 13].

Водоочистные системы и устройства коллективного, производственно-технологического (локального) назначения имеют ряд преимуществ перед индивидуальными бытовыми устройствами, в том числе использование таких водоочистных систем облегчает решение проблемы сервиса и регенерации сорбентов, а также автоматизации технологического процесса.

Задачей выполненных исследований стала оптимизация технологического режима очистки воды на ионнообменных смолах с удалением из воды нитратов до значений ниже предельно допустимой концентрации для децентрализованных локальных и индивидуальных систем питьевого водоснабжения.

Исследование и оптимизация технологического режима очистки воды от нитратов на ионнообменных смолах

Исследование наиболее эффективных анионитов проводилось с применением математического планирования экспериментов, целью которого являлось изучение влияния на эффективность процесса очистки воды от нитратов основных факторов работы ионнообменной колонки с определением их оптимальных значений:

- скорости фильтрации воды V , м/ч;
- величины отношения высоты загрузки фильтрационной колонки к ее диаметру H/d ;
- температуры обрабатываемой воды t , °С.

В области оптимальных значений частные решения полученных экспериментально-статистических зависимостей позволяют оценить изменение эффекта очистки воды от нитратов с учетом варьирования факторов работы ионообменной колонки по уравнениям линейной регрессии (95 %-й значимости):

– для фактора температуры обрабатываемой воды t , °С, в интервале $t = 5-18$ °С,

$$\Theta = 1,03 \cdot t + 78,46, \% \quad (1)$$

– для фактора скорости фильтрации V , м/ч, в интервале $V = 10-32$ м/ч,

$$\Theta = -0,69 \cdot V + 99,28, \% \quad (2)$$

– для фактора H/d , в интервале $H/d = 0,1-5$,

$$\Theta = 3,71 \cdot (H/d) + 77,77, \% \quad (3)$$

Полученное математическое описание, во-первых, дает информацию о влиянии факторов, во-вторых, позволяет количественно определить значения функции отклика (эффекта удаления нитратов) при любом заданном режиме ведения процесса очистки воды [14].

Разработка технологических схем и устройств очистки и кондиционирования подземных вод нецентрализованных систем питьевого водоснабжения с использованием метода ионного обмена для удаления нитратов

Наличие железа (Fe^{2+}) в подземных водах, наряду с нитратами, в концентрациях, превышающих предельно допустимые, является дополнительным фактором, определяющим состав технологической схемы водоподготовки для нецентрализованных локальных и индивидуальных систем питьевого водоснабжения.

Так, при анализе качества пресных подземных вод Беларуси и практически всех регионов с гумидным климатом (в пределах Российской Федерации, в Польше, Литве и многих других странах) отмечают, что наиболее часто в подземных водах фиксируются повышенные концентрации содержания железа, превышающие допустимый уровень, установленный для вод хозяйственно-питьевого назначения – $0,3$ мг/дм³. Основной формой, в которой железо присутствует в пресных подземных водах, является Fe^{2+} . Важнейшими геохимическими условиями, способствующими накоплению железа в подземных водах, являются наличие бескислородной обстановки и отсутствие в водах осадителей железа (CO_3^{2-} , HS^- и др.). Максимальные концентрации в водах кислорода (до $8-11$ мг/дм³) и, соответственно, минимальные концентрации железа (не обн. – $0,3$ мг/дм³) наблюдаются в неглубоко залегающих грунтовых водах на незаболоченных участках. С глубиной содержание кислорода уменьшается. В подобных условиях железо (в форме Fe^{2+}) может накапливаться до весьма значительных концентраций (до $20-50$ мг/дм³).

С учетом показателей качества исходной воды, в процесс очистки от соединений азота следует включать (рисунок 1): осветление (предварительная механическая обработка для исключения попадания мелких частиц в устройства последующей водоподготовки); кондиционирование (основная стадия: удаление нитратов; обезжелезивание – при необходимости); сорбцию (заключительная стадия обработки воды) и обеззараживание [15].



Рисунок 1 – Блок-схема водоподготовки для удаления нитратов

На рисунке 2 представлена разработанная технологическая схема очистки подземных вод, содержащих соединения азота (нитраты) и железа (II) в концентрациях выше ПДК, в индивидуальной системе питьевого водоснабжения.

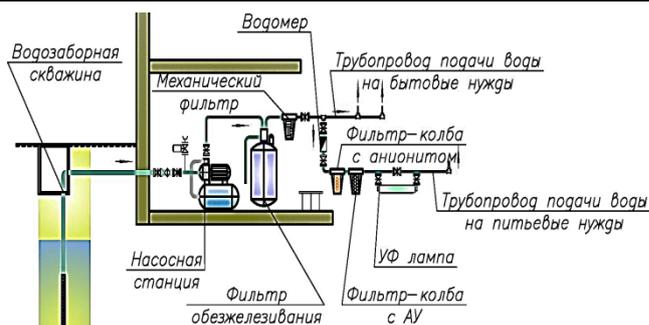


Рисунок 2 – Технологическая схема очистки подземных вод, содержащих нитраты и соединения железа (II) в концентрациях выше ПДК, для индивидуальной системы питьевого водоснабжения

Исходная вода забирается насосной станцией с пневмобаком и подается на водоподготовку: проходит первую ступень очистки – обезжелезивание предварительно насыщенной кислородом воды, после чего разделяется на два потока: 1) подается на бытовые (гигиенические и хозяйственные) нужды потребителю; 2) направляется на последующую водоподготовку; вода второго потока проходит подготовку на сильноосновных ионообменных смолах, сорбционную очистку на активных углях, обеззараживание ультрафиолетовой лампой. Далее вода второго потока поступает потребителю на питьевые нужды.

Устройство очистки воды для питьевого водоснабжения, схема которого представлена на рисунке 3, обеспечивает улучшение качества водоподготовки, в том числе удаление из воды нитратов, а также повышение надежности и долговечности элементов конструкции. Разработанный блок водоподготовки содержит механический, ионообменный и сорбционный фильтры, устройство обеззараживания [16].

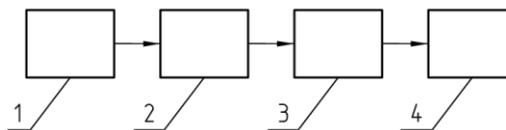


Рисунок 3 – Устройство очистки воды для питьевого водоснабжения

Загрязненная вода поступает в механический фильтр 1, представляющий собой заменяемый нитяной картриджный фильтр, где происходит тонкая фильтрация – это полное осветление и удаление взвешенных веществ – до 98 процентов (в том числе, практически всех нерастворенных соединений железа), что обеспечивает длительную работу материалов (угля, анионитной смолы), которые осуществляют очистку воды от растворенных веществ и не подвергаются обволакиванию их зерен и частиц взвешенными загрязнениями. Затем вода проходит через ионообменный фильтр 2, в котором в качестве наполнителя используется анионитная смола (высокоэффективный ионообменный материал). При этом из воды удаляются нитраты, что обеспечивает качество воды в соответствии требованиям СанПиН 10-124 РБ 99 «Питьевая вода» по указанному показателю. После этого вода проходит сорбционный фильтр 3 с загрузкой из активированного дробленого угля, где задерживаются остаточные загрязнения, обуславливающие запахи и привкусы. Далее вода поступает в устройство обработки УФ-лучами 4, где подвергается ультрафиолетовому облучению, обеспечивающему обеззараживание воды.

Испытание опытного блока водоподготовки показало, что предлагаемое техническое решение обеспечивает:

- повышение степени водоподготовки (при основных показателях: мутность – $1,5$ мг/дм³, железо (II) – $0,3$ мг/дм³, нитраты – 100 мг/дм³) до норм СанПиН 10-124 РБ 99 «Питьевая вода»: по органолептическим показателям – высшая категория, по нитратам – до 45 мг/дм³;
- увеличение межрегенерационного цикла работы и срока службы угля и ионообменных смол в полтора раза;
- обеспечение санитарно-эпидемиологической надежности процессов водоподготовки и обеззараживания.

Заключение

Технологические возможности водоочистных систем и устройств нецентрализованных систем питьевого водоснабжения более широки, а реализуемые в них процессы могут быть более надежными и безопасными по многим примесям по сравнению с традиционными технологиями. Усовершенствование технологических процессов на водопроводных станциях очистки в системах централизованного водоснабжения, а также использование водоочистных устройств в системах нецентрализованного водоснабжения с целью повышения надежности по некоторым загрязнениям заключается, в частности, в возможности удаления нитратов подземных вод, во введении обязательной фильтрации очищенной воды на конечной стадии через загрузку активированным углем, а также применение современных методов обеззараживания.

На основании проведенных теоретических исследований, лабораторных и полупроизводственных испытаний разработана эффективная технология очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена, состоящая из механического фильтра, ионообменного фильтра с сильноосновным анионитом, сорбционного фильтра с активированным углем, УФ-лампы обеззараживания, обеспечивающая удаление из воды нитратов до значений ниже предельно допустимой концентрации для нецентрализованных локальных и индивидуальных систем питьевого водоснабжения.

Таким образом, традиционные технологии водоподготовки эволюционируют к технологиям, разрабатываемым для водоочистных систем и устройств. Поэтому прогресс в последних будет способствовать также развитию крупномасштабной технологии водоподготовки для обеспечения питьевых, хозяйственных и производственных нужд, а также очистки сточных вод.

Список цитированных источников

1. Говорова, Ж. М. Предпосылки к разработке компактной установки для очистки подземной воды / Ж. М. Говорова, В. А. Семеновых, О. Б. Говоров // Системные технологии. – 2020. – № 1 (34). – С. 28–31.
2. Казанцева, А. В. Компактная установка для приготовления питьевой воды / А. В. Казанцева, М. Ю. Белканова, В. И. Васильев // Строительство и экология: теория, практика, инновации: сборник докладов I Международной научно-практической конференции, 9 марта 2015 года. – Челябинск: Пирс, 2015. – С. 19–21.
3. Дзюбо, В. В. Технологии и технологические схемы подготовки подземных вод для целей питьевого водоснабжения / В. В. Дзюбо, Л. И. Алферова // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – № 5 (5). – С. 45–49.
4. Зайцева, И. С. Современные методы очистки питьевой воды от нитратов / И. С. Зайцева, В. В. Козловская, Е. В. Шатрова // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью: сборник научных статей V Международной научно-практической конференции / Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2018. – С. 146–150.
5. Гуляева, В. И. Методы очистки природной воды от нитратов / В. И. Гуляева // Аллея науки. – 2020. – Т. 1, № 6 (34). – С. 350–354.
6. Шумигай, И. В. Влияние нитратов подземных вод на состояние здоровья населения / И. В. Шумигай // Агроэкологический журнал. – 2015. – № 4. – С. 53–58.
7. Технология и блочно-модульная установка подготовки подземных вод для водоснабжения автономных объектов ЖКХ / Е. А. Дугин [и др.] // Экология и водное хозяйство. – 2019/2 (2) – С. 22–34.
8. Способ очистки подземных вод для сельскохозяйственного использования. Патент на изобретение RU 2717522 C1, 23.03.2020. Заявка № 2019129951 от 23.09.2019 / Роспатент.
9. Установка для очистки подземных вод. Патент на изобретение RU 2641132 C1, 16.01.2018. Заявка № 2017104725 от 14.02.2017 / Роспатент.
10. Установка для очистки воды из подземных источников. Патент на полезную модель RU 116486 U1, 27.05.2012. Заявка № 2012101175/05 от 16.01.2012 / Роспатент.
11. Чигаев, И. Г. Исследование нанофильтрации и ионного обмена как комплексных методов очистки природных подземных вод / И. Г. Чигаев, Л. Ф. Комарова // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 99–102.
12. Использование ионного метода для очистки воды от нитратов / И. Н. Трус [и др.] // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2016. – № 12 (108). – С. 28–30.
13. Житенев, Б. Н. Технологические схемы водоподготовки для удаления нитратов на ионообменных смолах в нецентрализованных системах питьевого водоснабжения / Б. Н. Житенев, С. В. Андreyuk //

Производственно-технический и научно-практический журнал «Вода Magazine». – 2018. – № 5 (129). – С. 40–43.

14. Андreyuk, С. В. Технология очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / С. В. Андreyuk; БНТУ. – Минск, 2019. – 20 с.
15. Житенев, Б. Н. Технологические решения подготовки воды, с примесями соединений азота и железа, для питьевого водоснабжения / Б. Н. Житенев, С. В. Андreyuk // Вестник БрГТУ. – 2017. – № 2 : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 95–98.
16. Блок водоподготовки. Патент на полезн. модель 12064 ВУ, МПК C02F9/04, C02F101/16, C02F103/04 / С. В. Андreyuk, Б. Н. Житенев; заявл. Брестский гос. техн. ун-т. – № u20190027; заявл. 30.01.2019; опубл. 03.06.2019 / Гос. реестр полезн. моделей.

References

1. Govorova, Zh. M. Predposylki k razrabotke kompaktnoy ustanovki dlya oчитki podzemnoj vody / Zh. M. Govorova, V. A. Semenovyyh, O. B. Govorov // Sistemye tekhnologii. – 2020. – № 1 (34). – S. 28–31.
2. Kazanceva, A. V. Kompaktnaya ustanovka dlya prigotovleniya pit'evoy vody / A. V. Kazanceva, M. Yu. Belkanova, V. I. Vasil'ev // Stroitel'stvo i ekologiya: teoriya, praktika, innovacii: sbornik dokladov I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 9 marta 2015 goda. – Chelyabinsk : Pirs, 2015. – S. 19–21.
3. Dzyubo, V. V. Tekhnologii i tekhnologicheskie skhemy podgotovki podzemnykh vod dlya celej pit'evogo vodosnabzheniya / V. V. Dzyubo, L. I. Alferova // Vodoочистка. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. – 2008. – № 5 (5). – S. 45–49.
4. Zajceva, I. S. Sovremennye metody oчитki pit'evoy vody ot nitratov / I. S. Zajceva, V. V. Kozlovskaya, E. V. Shatrova // Problemy stroitel'nogo proizvodstva i upravleniya nedvizhimost'yu: sbornik nauchnykh statej V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. T. F. Gorbacheva. – Kemerovo, 2018. – S. 146–150.
5. Gulyaeva, V. I. Metody oчитki prirodnoj vody ot nitratov / V. I. Gulyaeva // Alleya nauki. – 2020. – T. 1, № 6 (34). – S. 350–354.
6. Shumigaj, I. V. Vliyanie nitratov podzemnykh vod na sostoyanie zdorov'ya naseleniya / I. V. Shumigaj // Agroэкологичnij zhurnal. – 2015. – № 4. – S. 53–58.
7. Tekhnologiya i blochno-modul'naya ustanovka podgotovki podzemnykh vod dlya vodosnabzheniya avtonomnykh ob'ektov ZHKKH / E. A. Dugin [i dr.] // Ekologiya i vodnoe hozyajstvo. – 2019/2 (2) – S. 22–34.
8. Sposob oчитki podzemnykh vod dlya sel'skohozyajstvennogo ispol'zovaniya. Patent na izobretenie RU 2717522 C1, 23.03.2020. Zayavka № 2019129951 ot 23.09.2019 / Rospatent.
9. Ustanovka dlya oчитki podzemnykh vod. Patent na izobretenie RU 2641132 C1, 16.01.2018. Zayavka № 2017104725 ot 14.02.2017 / Rospatent.
10. Ustanovka dlya oчитki vody iz podzemnykh istochnikov. Patent na poleznuyu model' RU 116486 U1, 27.05.2012. Zayavka № 2012101175/05 ot 16.01.2012 / Rospatent.
11. Chigaev, I. G. Issledovanie nanofiltracii i ionnogo obmena kak kompleksnykh metodov oчитki prirodnykh podzemnykh vod / I. G. Chigaev, L. F. Komarova // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. – 2019. – T. 22, № 4. – S. 99–102.
12. Ispol'zovanie ionnogo metoda dlya oчитki vody ot nitratov / I. N. Trus [i dr.] // Vodoочистка. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. – 2016. – № 12 (108). – S. 28–30.
13. Zhitenev, B. N. Tekhnologicheskie skhemy vodopodgotovki dlya udaleniya nitratov na ionoobmennyyh smolah v necentralizovannykh sistemah pit'evogo vodosnabzheniya / B. N. Zhitenev, S. V. Andreyuk // Proizvodstvenno-tekhnicheskij i nauchno-prakticheskij zhurnal «Voda Magazine». – 2018. – № 5 (129). – S. 40–43.
14. Andreyuk, S. V. Tekhnologiya oчитki podzemnykh vod ot nitratov metodom ionnogo obmena: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.04 / S. V. Andreyuk; BNTU. – Minsk, 2019. – 20 s.
15. Zhitenev, B. N. Tekhnologicheskie resheniya podgotovki vody, s primesyami soedinenij azota i zheleza, dlya pit'evogo vodosnabzheniya / B. N. Zhitenev, S. V. Andreyuk // Vestnik BrGTU. – 2017. – № 2 : Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoэкология. – S. 95–98.
16. Blok vodopodgotovki. Patent na polezn. model' 12064 ВУ, МПК S02F9/04, S02F101/16, S02F103/04 / S. V. Andreyuk, B. N. Zhitenev; zayav-l' Brestskij gos. tekhn. un-t. – № u20190027; zayavl. 30.01.2019; opubl. 03.06.2019 / Gos. reestr polezn. modelej.

Материал поступил в редакцию 26.01.2022

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД ГОРОДА БРЕСТА НА МЕХАНО-БИОЛОГИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ БРЕСТСКОГО МУСОРОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА (БМПЗ)

С. Г. Белов¹, Е. И. Дмухайло², Г. О. Наумчик³, Е. С. Рыбак⁴

¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: siarhei.bialou@gmail.com

² Инженер-изобретатель, г. Брест, Республика Беларусь

³ Ст. преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь

⁴ Ст. преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь

Реферат

Реализация технологических схем удаления биогенных элементов на городских очистных сооружениях требует индивидуального подхода к обработке образующихся осадков. Статья посвящена проблемам, возникающим при обработке осадков городских сточных вод на существующих сооружениях обработки осадка из первичных отстойников и избыточного активного ила с использованием метантенков проточного типа. Также рассмотрены новейшие разработки в области аэробного и анаэробного сбраживания осадков, образующихся на городских очистных сооружениях, позволяющие сделать процесс переработки осадков энерго и ресурсосберегающим, а также обеспечить очистку возвратных потоков от соединений азота по технологии Анаммокс и удаление соединений фосфора с получением минерального удобрения – струвита. Также приведена информация, позволяющая сравнить эффективность различных режимов безреагентной напорной флотации с реагентной седиментацией. Выполнен анализ влияния температуры и уплотнения осадков на процесс анаэробного сбраживания. Предложена усовершенствованная технологическая схема обработки осадков, поступающих с канализационных очистных сооружений, сочетающая в себе процессы аэробного и анаэробного сбраживания осадков при соблюдении оптимальных температуры и влажности.

Ключевые слова: осадки сточных вод, метантенк, аэробная стабилизация, активный ил, уплотнение, напорная флотация, удаление биогенных элементов, очистка возвратных потоков от соединений азота, дефосфатация, минеральное удобрение струвит.

RECOMMENDATIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF WASTEWATER SLUDGE TREATMENT IN THE CITY OF BREST AT THE MECHANICAL AND BIOLOGICAL FACILITIES OF THE BREST WASTE PROCESSING PLANT (BWPP)

S. G. Belov, E. I. Dmukhaylo, G. O. Naumchik, E. S. Rybak

Abstract

The implementation of technological schemes for the removal of biogenic elements at urban wastewater treatment plants requires an individual approach to the treatment of sludge. The article is devoted to the problems that arise during the treatment of urban sewage sludge at existing facilities for the treatment of sludge from primary settling tanks and excess activated sludge using flow type digesters. The latest developments in the field of aerobic and anaerobic digestion of sludge generated at urban wastewater treatment plants are also considered, which make it possible to make the process of sludge processing energy and resource-saving, as well as to ensure the purification of return flows from nitrogen compounds using the Anammox technology and the removal of phosphorus compounds with the production of mineral fertilizer - struvite. Information is also provided to compare the effectiveness of various regimes of reagentless pressure flotation with reagent sedimentation. The influence of temperature and compaction of sediments on the process of anaerobic digestion was analyzed. An improved technological scheme for the treatment of sludge coming from sewage treatment plants is proposed, which combines the processes of aerobic and anaerobic sludge digestion while maintaining optimal temperature and humidity.

Keywords: sewage sludge, digester, aerobic stabilization, active sludge, compaction, pressure flotation, removal of biogenic elements, purification of return flows from nitrogen compounds, dephosphatation, struvite mineral fertilizer.

Введение

В настоящее время осадки сточных вод с очистных сооружений города Бреста в виде осадка из первичных отстойников с расходом 500 м³/сут и средней влажностью 96 % и избыточного активного ила из вторичных отстойников с расходом 1200 м³/сут и средней влажностью 98,5 % перекачиваются на механо-биологические сооружения обработки осадка БМПЗ. На территории БМПЗ расположены два метантенка (объемом по 5000 м³) проточного типа, в которых происходит совместное сбраживание осадка из первичных отстойников и активного ила. Активный ил перед подачей в метантенки обезвоживается на ситах. Осадок из первичных отстойников поступает в осадкоуплотнитель, откуда смешанный с активным илом перекачивается в метантенк. Сброженная смесь осадков поступает в резервуар-накопитель, где должно происходить его окончательное дображивание. Далее осадок из резервуара-накопителя перекачивается в цех мехобезвоживания, где с помощью фильтр-прессов осуществ-

ляется его сгущение. Обезвоживание осадков интенсифицируется введением флокулянтов. Иловая вода из осадкоуплотнителей, фильтрат от фильтр-прессов и сит, перекачивается в приемную камеру городских очистных сооружений. Технологическая схема обработки осадков показана на рисунке 1.

В связи с необходимостью сбраживания значительных объемов осадков с высокой влажностью в условиях перегрузки метантенков, что снижает выход биогаза, а также перекачки сильнозагрязненных возвратных потоков, что повышает нагрузки (до 30 %) на механо-биологическую очистку городских очистных сооружений, возникает необходимость повышения эффективности обработки осадков на БМПЗ. В рамках ХД № 20/155 (от 12.11.2020) были определены и уточнены состав и свойства осадков, поступающих на БМПЗ, и выполнен аналитический обзор основных методов повышения эффективности обработки осадка путем интенсификации технологических процессов и оптимизации параметров их работы.

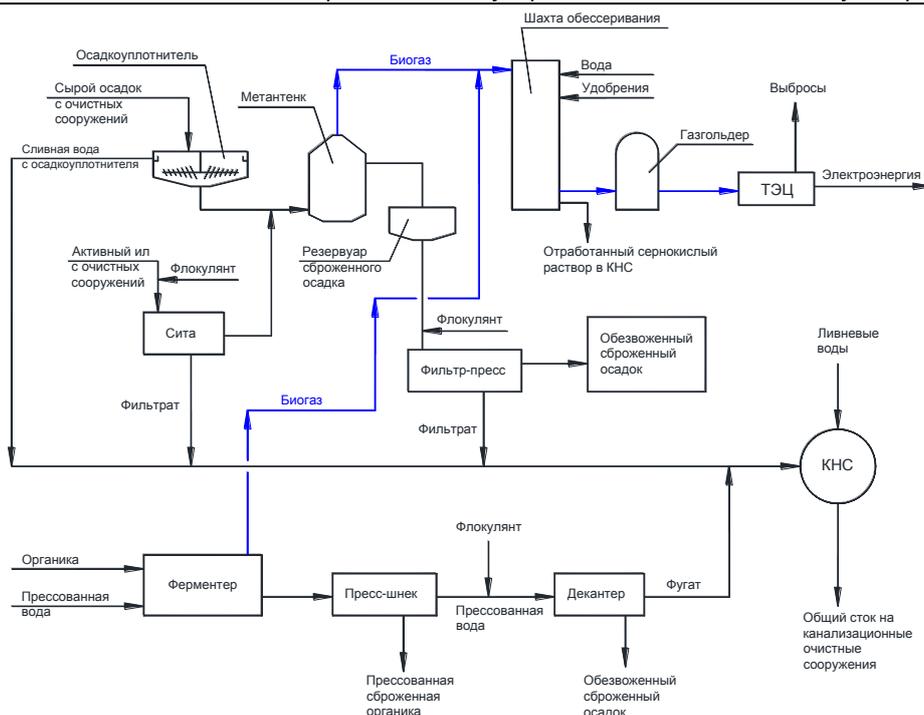


Рисунок 1 – Технологическая схема сооружений по обработке осадков на Брестском мусороперерабатывающем заводе

Методы интенсификация обработки осадков в метантенках

Связь между величиной суточной нагрузки по беззольному веществу N_b ($кг/(м^3 \cdot сут)$), дозой загрузки d (%) и продолжительностью t (сут) при заданных величинах влажности осадка W (%), концентрации сухого вещества C ($кг/м^3$) и зольности Z_{oc} (доли единицы) может быть выражена рядом уравнений [1]:

$$N_b = \frac{d}{100} \cdot \left(\frac{100 - W}{100} \right) \cdot (1 - Z_{oc}) = \frac{1}{t} \cdot \left(\frac{100 - W}{100} \right) \cdot (1 - Z_{oc}) \cdot 10^3;$$

$$d = \frac{Q_{cym}}{V_m} \cdot 100 = \frac{100}{t}; \quad G_b = Q_{cym} \cdot \left(\frac{100 - W}{100} \right) \cdot (1 - Z_{oc}),$$

где Q_{cym} – суточный объём осадка, $м^3/сут$;

G_b – масса беззольной части осадка, $кг/сут$;

V_m – объём метантенка, $м^3$.

Величина нагрузки условно классифицируется на низкую (до 2 кг/м^3), среднюю ($3 \dots 4 \text{ кг/м}^3$) и высокую. Чем выше нагрузка, тем ниже величина фактического распада вещества (при прочих равных условиях). Допустимая разница между теоретическим \mathcal{E}_m и фактическим распадом $\mathcal{E}_ф$ ($\frac{\mathcal{E}_ф - \mathcal{E}_m}{\mathcal{E}_m}$) не должна быть более 0,2. Для упрощенных

расчетов можно принимать, что разница между ними не должна быть более 0,25·C для мезофильного брожения и не более 0,22·C для термофильного режима

$$C = 10 \cdot (100 - W),$$

где C – концентрация сухого вещества в осадке, $кг/м^3$.

Разница между теоретическим и фактическим распадом может быть обусловлена не только условиями ведения процесса, но и поступлением больших масс промышленных несбраживаемых примесей. Если таковые отсутствуют, то повышение нагрузки, сопровождаемое снижением фактического распада, свидетельствует о вымывании культуры метанообразующих бактерий, перегрузке имеющейся биомассы, надвигающейся угрозе дестабилизации процесса.

Интенсификация процесса анаэробного сбраживания производится для достижения следующих целей:

- сокращение продолжительности пребывания осадка в метантенках при достижении заданной степени распада с целью уменьшения объемов сооружений, а следовательно, капитальных затрат;
- повышение выделения количества биогаза с целью его использования на обогрев метантенков и дополнительного получения других видов энергии;
- увеличение содержания метана в биогазе с целью повышения его теплоты сгорания и эффективности утилизации;
- достижение хорошего уплотнения и водоотдающих свойств сброженных осадков с целью сокращения затрат на его обезвоживание.

Одним из основных способов интенсификации является повышение концентрации осадков и биомассы (микроорганизмов) в метантенке.

В соответствии с традиционной технологией сбраживания в метантенк загружается смесь сырого осадка из первичных отстойников и уплотненного избыточного активного ила с концентрацией сухого вещества $30 \dots 40 \text{ кг/м}^3$. При такой сравнительно низкой концентрации невозможно поддержать высокую нагрузку по сухому веществу и одновременно обеспечить достаточную продолжительность процесса.

Увеличение концентрации сухого вещества осадка путем предварительного его сгущения позволяет увеличить нагрузку на метантенк и вести процесс при продолжительности, достаточной для предотвращения срывов сбраживания. Для нагрузки с постоянной концентрацией органического вещества C произведение нагрузки d и продолжительности сбраживания t постоянно, т. е. $C = d \cdot t$.

Максимальный поточный выход биогаза на единицу объёма метантенка достигается при оптимальной концентрации органического вещества в загруженном осадке $C_{кр}$, составляющей в зависимости от вида осадка и температуры процесса $65 \dots 90 \text{ кг/м}^3$.

Поскольку зольность осадка при сгущении растет сравнительно медленно, а его плотность близка к 1 т/м^3 , можно считать правомерной прямую пропорциональность концентраций сухого и сухого обезвоженного (органического) вещества жидкотекучих осадков, как видно из данных в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние влажности загруженного осадка на нагрузку метантенка и выход биогаза

| Влажность загружаемого осадка, % | Нагрузка по сухому беззольному веществу, кг/(м ³ ·сут) | Время пребывания осадка в метантенке, сут | Удельный выход биогаза, м ³ /кг загружаемого беззольного вещества осадка | Скорость выхода биогаза, м ³ /(м ³ ·сут) |
|----------------------------------|---|---|---|--|
| 90 | 2 | 50 | 0,8 | 1,6 |
| | 3 | 33 | 0,75 | 2,25 |
| | 4 | 22 | 0,72 | 2,88 |
| 93 | 5 | 17 | 0,6 | 3,45 |
| | 2 | 33 | 0,72 | 1,44 |
| | 3 | 20 | 0,68 | 2,04 |
| 96 | 4 | 17 | 0,65 | 2,6 |
| | 5 | 12,5 | 0,63 | 3,15 |
| | 2 | 20 | 0,62 | 1,24 |
| 96 | 3 | 14 | 0,53 | 1,54 |
| | 4 | 10 | 0,56 | 2,24 |
| | 5 | 8 | 0,54 | 2,4 |

В некоторых источниках представлены данные по мезофильному сбраживанию осадков [2], при этом сгущение обеспечивает заметное улучшение показателей процесса, особенно если учесть, что по условиям надежности процесса при сбраживании жидких осадков влажностью 96 % поддерживается нагрузка $d = 2...3$ кг/(м³·сут), а при сбраживании сгущенных осадков, влажностью 90...93 % нагрузку можно увеличить до 4...5 кг/(м³·сут) и более.

Возможны различные технологические схемы сгущения осадков, связанных с совместной или раздельной обработкой осадков первичных отстойников и избыточного активного ила на тех или иных сооружениях и аппаратах за счет гравитационного уплотнения с предварительной аэрацией [3, 4]. Низкотемпературный нагрев уплотненного ила (50...70 °С) позволяет снизить дозы вводимых реагентов при реагентной обработке (коагулянты, флокулянты, известь и другие) иловой смеси [2, 5, 6]. Также применяется напорная флотация активного ила [6, 7, 8].

В таблице 2 приведены сравнительные показатели уплотнения и сгущения активного ила для станций, производительностью 50...280 тыс. м³/сут.

Таблица 2 – Показатели уплотнения и сгущения избыточного активного ила

| Показатель | Метод уплотнения или сгущения активного ила | | | |
|---|---|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| | гравитационное уплотнение | напорная флотация | сгущение на сепараторах | сгущение на центрифугах |
| Концентрация сухого вещества, % | 2...2,7 | 3...5 | 3...6 | 5...7 |
| Кратность уменьшения объема активного ила | 5...6 | 7...10 | 7...15 | 12...17 |
| Расход электроэнергии, тыс. кВт/год | 700 | 665...2600 | 526...3153 | 564...1702 |

Повышение концентрации осадка в метантенках можно достичь путем предварительного сгущения загружаемого осадка или рециркуляцией сброженного осадка. В первом случае в метантенке увеличивается концентрация сбраживаемого субстрата, во втором – биомассы микроорганизмов.

Предварительное сгущение осадка гравитационным уплотнением с применением струйной аэрации [3], центрифугирования и флотации получили распространение в ряде стран. Например, в Швейцарии, Англии практически повсеместно применяется гравитационное уплотнение, а на новых очистных сооружениях – центрифугирование. С 1971 года в Бирмингеме (Англия) осуществлен перевод метантенков на работу с осадками повышенной концентрации, а именно 5...6 % вместо 3...4 %, что достигается двенадцатичасовым

сгущением в илоуплотнителе. Это позволило исключить из эксплуатации один метантенк, одновременно увеличив продолжительность сбраживания с 25 до 36 суток. Причем выход биогаза из каждого метантенка увеличился на 19 %.

Помимо гравитационного и ситового большой интерес представляют флотационный и центробежный способы уплотнения осадков. Флотация, особенно активного ила и его смесь с сырым осадком, применяется за рубежом более полувека. Её использование позволяет сгустить избыточный активный ил до влажности 93...96 % со скоростью в 10...20 раз больше, чем отстаивание.

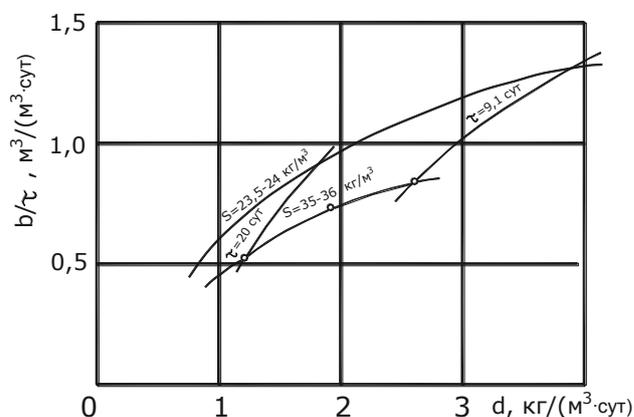
В США сгущают смесь избыточного ила и осадка с исходной концентрацией 2...3 % до 4...5 %, что позволяет в 2 раза уменьшить число метантеков.

В последние годы получили распространение механические аппараты для сгущения высоковлажных суспензий [2, 7].

Таблица 3 – Технические характеристики механических аппаратов для сгущения активного ила

| Показатель | Сепаратор НВ-600 (СССР) | Центрифуга ОГШ-501К-10 (СССР) | Центрифуга AVNX-417 фирмы «Альфа-Лаваль» (Швеция) |
|---|-------------------------|-------------------------------|---|
| Производительность, м ³ /ч | 25...30 | 10...16 | 6...12 |
| Концентрация сгущенного ила, % | 6...7 | 7,5...7 | 5,5...4,5 |
| Эффективность задержания сухого вещества, % | 90...95 | 93...85 | 91...74 |

Сепаратор НВ-600 прошел испытания на станции аэрации г. Первоуральска, а центрифуга ОГШ-501К-10 – на очистных сооружениях г. Шауляя (Литва, СССР). В ходе производственного эксперимента в г. Первоуральске сгущенный активный ил смешивался при температуре 32...39 °С с сырым осадком из первичных отстойников. Сравнительные результаты анаэробного сбраживания приведены на рисунке 2.



b/τ – скорость выхода биогаза;
 d – нагрузка на метантенк по сухому беззольному веществу

Рисунок 2 – Влияние сгущения активного ила на показатели мезофильного анаэробного сбраживания смеси осадка и активного ила

Сгущение активного ила позволило увеличить концентрацию сухого беззольного вещества в загрузке метантенка с 24 до 36 кг/м³. При одной и той же продолжительности сбраживания $t = 20$ сут расход органического вещества увеличился с 42,9 % до 51,1 %, а скорость выхода биогаза – с 0,52 до 0,92 м³/(м³·сут). Из приведенных данных следует, что, хотя предварительное сгущение увеличивает концентрацию осадка, она все же остается существенно ниже критической и, следовательно, имеющиеся возможности интенсификации процесса остаются в значительной степени нереализованными.

Наиболее простой и дешевый способ концентрирования (уплотнения) достигается флотацией (всплыванием) совместно уплотняемых осадка и избыточного активного ила.

Флотация твердой фазы наблюдается при насыщении суспензии воздухом или другим газом, пузырьки которого поднимаясь вверх увлекают за собой твердые частицы, что приводит к разделению суспензии на фазы. Применение флотации наиболее эффективно при разделении тонкодисперсных суспензий, в частности активного ила.

Во флотаторах-уплотнителях поступающий осадок предварительно насыщается воздухом под давлением 0,3...0,5 МПа. Влажность ила после флотации снижается с 97,7...99,5 % до 92,6...96,3 % (рисунок 3), а объем осадка уменьшается в 3...7 раз. Иловая вода содержит до 400...800 мг/л взвешенных веществ.

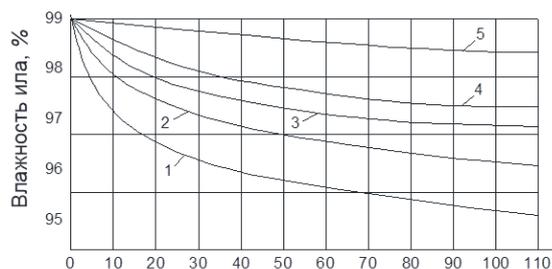


Рисунок 3 – Зависимость снижения влажности ила от продолжительности флотации и отстаивания

При напорной флотации объем активного ила сокращается в 2...4 раза в зависимости от давления и продолжительности уплотнения. При химической флотации (введение в ил реагентов, выделяющих в жидкость газ) эффективность повышается до 7 раз, а при электрофлотации и непосредственном диспергировании воздуха – на 30...60 %. В РФ успешно эксплуатируются установки для уплотнения активного ила напорной флотацией. Наибольший эффект достигается при насыщении воздухом не активного ила, а иловой воды или другой рабочей жидкости, которая циркулирует в системе: насос – напорный бак-флотатор (рисунок 4). Количество рабочей жидкости в 2...3 раза превышает объем активного ила.

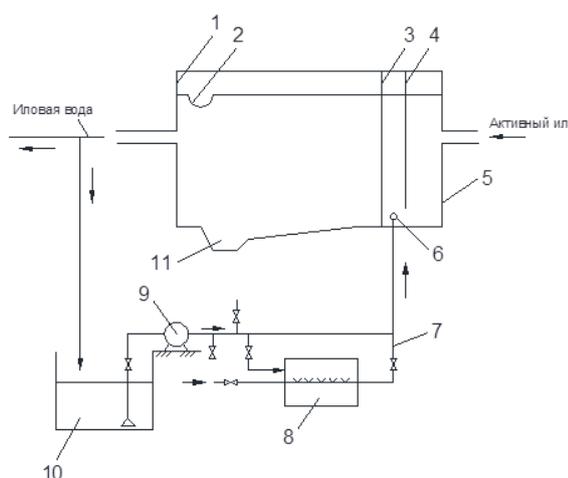


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки напорной флотации для уплотнения активного ила

Рекомендуются следующие характеристики напорного бака:

- продолжительность пребывания рабочей жидкости 2...3 мин;
- давление воздуха – 0,3...0,5 МПа;
- расход воздуха 10...12 литров на 1 кг актиала;
- продолжительность флотации 0,7...1,0 час.

При этом вместимость резервуаров рассчитывается на суммарный объем смеси активного ила и рабочей жидкости.

Влияние температуры

Диапазон температур, при котором возможно анаэробное сбраживание с выделением метана – от 0 до 97 °С.

Оптимальные температуры для анаэробного метанового сбраживания в психрофильной зоне 15...17 °С, в мезофильной 33...35 °С, и в термофильной 53...55 °С.

Процесс брожения необходимо осуществлять при оптимальном температурном режиме, даже кратковременные нарушения которого, особенно в сторону снижения температуры, приводит к торможению стадии метаногенеза. Чем выше температура сбраживания, тем ниже допустимые пределы колебаний. При $t = 38$ °С допустимые пределы колебаний составляют $\pm 2,8$ °С.

Температурный режим сбраживания тесно связан с временем пребывания в метантенках. Нарушение оптимального температурного режима оказывает сильное отрицательное влияние на процесс при коротком времени пребывания, так как при этом обычно продолжается функционирование быстрорастущих кислотообразующих микроорганизмов при торможении активности метаногенов и их вымыванию из системы. Чем больше сырого осадка загружено в метантенк, тем больше требуется времени для восстановления процесса брожения после доведения температуры до расчетной. Поэтому при нарушении температурного режима работы метантенков и появления первых признаков нарушения процесса (уменьшение выхода биогаза и содержания в нем метана, повышение содержания в иловой воде летучих жирных кислот) необходимо снижать дозу загрузки в метантенке.

В Англии разработан процесс «ускоренной холодной стабилизации», заключающийся в смешении нагретого стабилизированного в мезофильных условиях осадка с сырым и последующей выгрузке этой смеси в анаэробную лагуну, где стабилизация происходит во много раз быстрее, чем ненагретого осадка. Такой прием рекомендуется для перегруженных очистных сооружений.

Аэробно-анаэробная стабилизация осадков

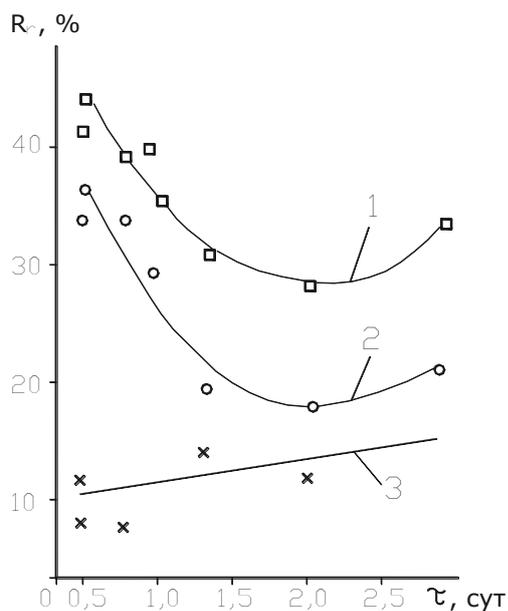
В связи с ужесточением санитарно-гигиенических требований к сброженным осадкам при их использовании в сельском хозяйстве в западной Европе и Америке получила распространение аэробная термофильная стабилизация, которая в сочетании с мезофильным сбраживанием обеспечивает биологическую стабилизацию и обеззараживание осадков, получение энергии в виде биогаза, а в некоторых вариантах – улучшение водоотдающих свойств осадка.

Технология анаэробного сбраживания с предварительной или завершающей аэробной стадией базируется на использовании особенностей микроорганизмов, осуществляющих эти процессы и на их различном отношении к факторам окружающей среды (таблица 4).

Таблица 4 – Особенности аэробных и анаэробных микробиологических процессов

| Показатель | Процесс | |
|--|---|------------------------|
| | аэробный | анаэробный |
| Процент биологически используемой энергии | высокий | низкий |
| Саморазогрев осадка | есть | нет |
| Энергетический уровень конечного продукта | низкий | высокий |
| Степень минерализации исходного продукта | глубокая | менее глубокая |
| Прирост микроорганизмов | высокий | низкий |
| Биохимические превращения, лежащие в основе процесса | одностадийные упрощенные | многостадийные сложные |
| Чувствительность к внешним факторам | низкая | высокая |
| Получение энергии | нет | есть |
| Затраты энергии | большие | малые |
| Водоотдающие свойства осадка | улучшаются или ухудшаются в зависимости от технологических параметров | |

Предварительная аэробная обработка в течение 1...2 суток перед анаэробным сбраживанием оказывает значительное влияние на общий итог стабилизации по выходу биогаза и снижении концентрации органических веществ (рисунок 6) [9]. Аэрирование в течение этого времени осадка на I-ой ступени снижает концентрацию органического вещества и тем самым нагрузку на II-ую анаэробную ступень. Дальнейшее увеличение продолжительности аэробной переработки приводит к существенному увеличению степени аэробного окисления органических веществ (снижение отношения БПК/ХПК) и уменьшению содержания биогаза в анаэробной ступени, при этом состав газа и его теплота сгорания не отличается от обычного одноступенчатого процесса. Согласно требованиям ЕПА (Агентства по охране окружающей среды США) общий распад органического сухого вещества осадка при стабилизации должен быть не менее 38 %. Чтобы выполнить это требование, продолжительность аэробного процесса (при продолжительности пребывания осадка в анаэробной ступени 8 сут при температуре $t = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$) не должна превышать 1 сут (рисунок 5):



1 – аэробно-анаэробная стабилизация; 2 – анаэробный реактор ($\tau = 8\text{ сут}$); 3 – аэробный реактор

Рисунок 5 – Зависимость распада осадка при аэробно-анаэробной стабилизации R_r от времени пребывания в аэробной ступени τ

В результате метаболической активности аэробных организмов высвобождается большое количество энергии, что приводит к повышению температуры в реакторе. Основными факторами, влияющими на степень повышения температуры, является эффективность переноса кислорода, превышающая 10 % (т. е. в биохимических реакторах должно потребляться более 10 % подаваемого кислорода при тщательном перемешивании). Считается, что при распаде 1 г органического вещества осадка (ХПК) выделяется 15 кДж энергии и достигается повышение температуры на 2,4...2,6 $^{\circ}\text{C}$. За 1...2 сут аэробной стабилизации степень снижения ХПК сырого осадка составляет 11,5 %, что при ХПК сырого осадка 8...10 г/л достаточно для повышения температуры до 60 $^{\circ}\text{C}$, благодаря чему достигается обеззараживание осадка для комбинированной аэробно-анаэробной схемы сбраживания. Для данной схемы рекомендуемые технологические параметры приводятся в таблице 5.

Имеющийся в США практический опыт применения аэробно-анаэробного процесса стабилизации осадка свидетельствует о его большой надежности и устойчивости в условиях неравномерного поступления осадков, при наличии в нем токсичных для анаэробных процессов веществ. Для поддержания необходимой температуры в аэробном реакторе он должен быть перекрыт и теплоизолирован. Кроме того, необходимо, особенно при низких температурах, обеспечить систему рекуперации теплоты стабилизированного осадка

и даже его подогрев. Для растворения необходимого количества кислорода воздуха перспективны пневмо-струйные системы аэрации, разработанные на кафедре ВВиОВР УО «БрГТУ» [10, 11]

Таблица 5 – Рекомендуемые параметры аэробно-анаэробного сбраживания

| Параметр | I-я стадия (аэробная) | II-я стадия (анаэробная) |
|---|-----------------------|--------------------------|
| Время пребывания, сут | 0,5 | 8 |
| Нагрузка по органическому веществу, кг/м ³ ·сут | 60 | 3,5 |
| Температура, $^{\circ}\text{C}$ | 55 | 35 |
| Расход энергии, Вт/м ³ | 120 | 5 |
| Снижение концентрации органического вещества, % | 8 | 35 |
| Образование теплоты в биологическом процессе распада органического вещества, кДж/кг | 50 000 | – |
| Выход биогаза, м ³ /кг органического вещества | – | 0,3 |

Очистка возвратных потоков от соединений азота и фосфора

Возвратные потоки от сооружений обработки осадка сточных вод содержат высокие концентрации азота и фосфора. При подаче их в «голову» сооружений значительно увеличивается (до 30 %) нагрузка на стадию биологической очистки (аэротенки), вызывая снижение эффективности очистки сточных вод. Для стабильного достижения нормативного качества очистки сточной воды целесообразно предусматривать стадию очистки возвратных потоков. Для очистки стоков такого типа от аммонийного азота в последнее время находят применение технология Анаммокс [12].

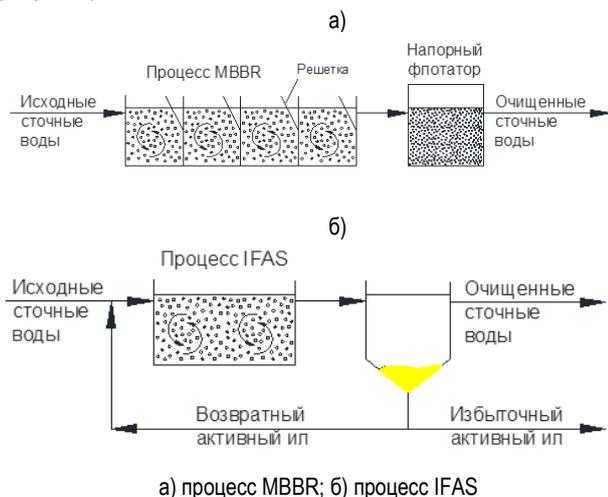
Технологии на основе процесса Анаммокс были разработаны для очистки сточных вод с высокими концентрациями аммония N-NH₄ (до 2000 мг/л) и низким содержанием органического вещества, недостаточного для рутинного процесса нитриденитрификации (отношение БПК/N < 1,7 для денитрификации через нитрит и БПК/N < 2,8 для денитрификации через нитрат). Технологии типа Анаммокс основаны на двух самостоятельных микробиологических процессах: частичной нитрификации (нитритирование), которая включает окисление половины аммония до нитрита, и анаэробном (аноксидном) окислении аммония нитритом до молекулярного азота (непосредственно процесс Анаммокс). Технологии типа Анаммокс рассматриваются как перспективные для обработки сточных вод с низким отношением C/N. Экономически, технологически и экологически эта технология очень привлекательна по сравнению с классическими вариантами биологического удаления азота.

В процессе Анаммокс потребность в органическом веществе отсутствует, потребность в кислороде снижается на 60 %, что приводит к значительному снижению энергопотребления – расход энергии на удаление единицы массы азота снижается в 2–3 раза. Прирост она снижается на 90 %, и, как следствие, сокращаются затраты на переработку и утилизацию осадка сточных вод. Технологии с использованием процесса Анаммокс оказывают значительно меньший парниковый эффект. Образование углекислоты в расчете на 1 кг удаленного азота снижается по сравнению традиционными процессами в 6...10 раз, а закись азота N₂O в промежуточных реакциях не образуется. Реакторы для удаления азота компактны и занимают меньше места, чем работающие по традиционному процессу нитриденитрификации.

Важной особенностью анаммокс-бактерий является их высокая адгезионная способность, они легко формируют агрегаты, биопленки. Для них рост в агрегированном состоянии является более предпочтительным, чем в свободноплавающем. Это свойство является ценным для создания биотехнологий очистки воды, так как относительно просто осуществляются приемы удержания ценной медленно растущей биомассы анаммокс-бактерий в биореакторах путем использования плавающих или прикрепленных загрузкиемых материалов.

В биореакторах Анаммокс располагается плавающая загрузка с системой удержания ее в реакторе. Реактор проточного типа, смеситель со строго контролируемыми значениями температуры,

растворенного кислорода, pH, расхода и концентрации нитритов. Иловая смесь из биореактора пропускается через удерживающее загрузку устройство и направляется во вторичный отстойник. Технологию Анаммокс предлагается реализовывать на основе схемы IFAS (рисунок 6).



а) процесс MBBR; б) процесс IFAS
Рисунок 6 – Типовые схемы потоков для процессов

У данной схемы есть ряд преимуществ перед стандартной схемой MBBR. А именно, в случае проскока через удерживающее устройство элементы загрузки попадут в первую очередь во вторичный отстойник, после чего могут быть возвращены обратно в биореактор. Риск потери биомассы Анаммокс в этом случае минимален. Дополнительным фактором является то, что, по данным европейских исследований, схема IFAS позволяет наращивать мощность сооружений [3].

Удаление соединений фосфора с получением минерального удобрения – струвита

Для повышения эффективности очистки по соединениям фосфора, а также для возврата фосфора в почву в качестве удобрения предлагается использовать на локальных очистных сооружениях (ЛОС) процесс получения минерального удобрения из возвратных потоков от сооружений обработки осадка. Этот процесс основан на управляемом осаждении струвита.

Струвит является кристаллическим минералом, состоящим из аммония, магния и фосфора $NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$, который образуется, когда в растворе присутствует каждый из этих ионов в концентрациях выше точки насыщения раствора. Процесс основан на добавлении одного или двух из этих реагентов с целью интенсификации образования струвита и в результате их удаления. Для очистки коммунальных стоков лимитирующим ионом является магний и поэтому требуется его добавление для удаления фосфора [4].

Процесс может обеспечить эффективность удаления фосфора 90 % и его можно адаптировать для технических и экономических условий каждого объекта. Точка насыщения раствора значительно зависит от pH, поэтому для увеличения производительности может потребоваться корректировка щелочности потока. Обычно процесс проводится в диапазоне pH 7...8. Образование гранул удобрения (струвита) начинается с микроскопических кристаллов, которые образуются в реакторе и затем растут и превращаются в слой струвита. В результате получаются достаточно чистые кристаллические гранулы струвита, которые выводятся из реактора после достижения оптимального размера для использования в качестве удобрения.

Заключение

По результатам проведенных исследований состава, количества и свойства осадка, поступающего на БМПЗ, а также анализа современных перспективных технологий его предварительной обработки с целью повышения эффективности его сбраживания и соблюдения санитарно-гигиенических требований к сброженным осадкам для использования их в сельском хозяйстве кафедрой ВВиОВР УО «БрГТУ» предлагается усовершенствованная комплексная технологическая схема обработки осадка на БМПЗ (рисунок 7).

Предлагаемая технологическая схема по сравнению с существующей включает новые технологические процессы с целью выхода на оптимальные параметры сбраживания осадка (температура 40 °С, влажность 94 %) и заключается в двухступенчатой технологии аэробно-термофильной – анаэробно-мезофильной стабилизации, напорной флотации избыточного активного ила, очистку возвратных потоков по технологии Анаммокс.

Предлагаемая технология обработки осадков является перспективной, так как без больших капитальных затрат и без существенной реорганизации производства позволит достичь интенсификации процесса метанового брожения, очистки возвратных потоков и снизить до 30 % нагрузку на городские очистные сооружения.

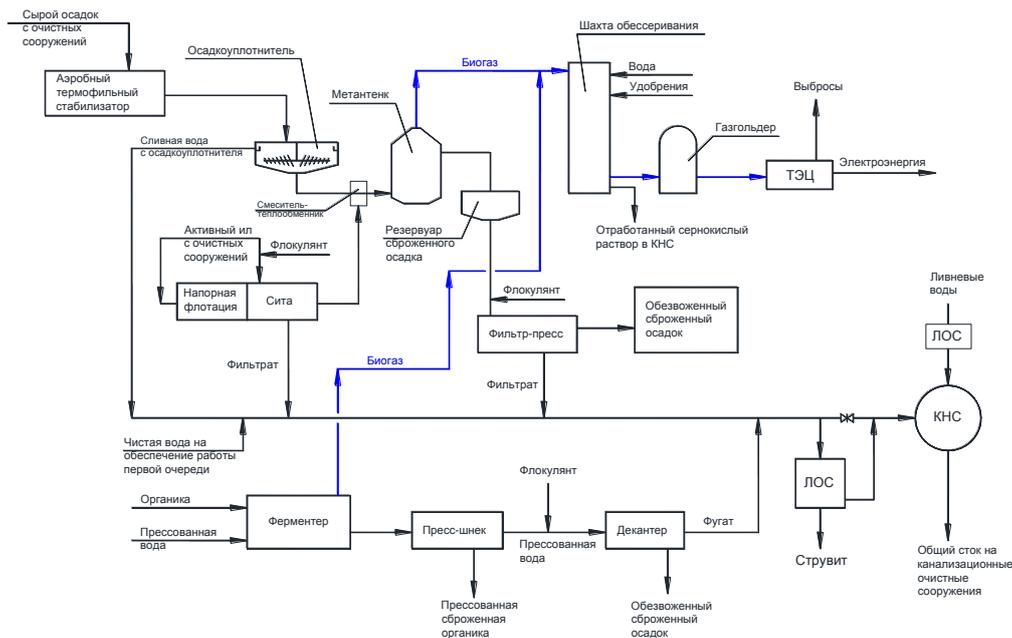


Рисунок 7 – Предлагаемая технологическая схема сооружений по обработке осадков на Брестском мусороперерабатывающем заводе

Список цитированных источников

1. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник / Под ред. В. Д. Дмитриева, Б. Г. Мишукова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, 1988. – 383 с.
2. Туровский, И. С. Обработка осадков сточных вод / И. С. Туровский. – М.: Стройиздат, 1975. – 192 с.
3. Фростер, К. Ф. Экологическая биотехнология / К. Ф. Фростер, Д. А. Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1990. – 160 с.
4. Кулаков, А. А. Совершенствование методов обработки осадков городских сточных вод. А. А. Кулаков, Е. М. Терехова, Н. А. Кучевал // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 5. – С. 16–20.
5. Луков, С. А. Совершенствование технологии обработки осадков сточных вод крупных городов (на примере г. Нижний Новгород): дис. к.т.н.: 05.23.04 / С. А. Луков. – Нижний Новгород, 2007. – 204 с.
6. Рубчак, Н. Ю. Сооружения для обработки осадков городских сточных вод / Н. Ю. Рубчак, М. Н. Сирота. – М.: Стройиздат. – 1978. – 216 с.
7. Пугачев, Е. А. Процессы и аппараты обработки осадков сточных вод / Е. А. Пугачев. – М.: Издательство АСВ. – 2012. – 143 с.
8. Авторское свидетельство СССР № 1118623 С 02 F 11/12 Струститель осадка / Е. И. Дмухайло, В. С. Северянин; блок № 5; Брестский политехнический институт, 1993 г.
9. Гюнтер, Л. И. Метатенки / Л. И. Гюнтер, Л. Л. Гольдфарб. – М.: Стройиздат, 1991. – 129 с.
10. Белов С. Г. Пневмогидравлический диспергатор «Торнадо» / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: материалы IV Международной научно-практической конференции, Брест, 25–27 сентября 2013 г. / БрГТУ; редкол.: А. А. Волчек [и др.] – Брест, 2013. – С. 7–12.
11. Дмухайло, В. И. Энергоэффективная система струйной аэрации для биохимической очистки сточных вод и образования осадка / Е. И. Дмухайло, С. Г. Белов, В. С. Белов // Проблемы энергетической эффективности в различных отраслях: материалы научного семинара, Брест, 25 марта 2016 г. / БрГТУ; под ред. В. С. Северянина, В. Г. Новосельцева. – Брест, 2016. – С. 67–68.
12. Понамаренко Д. Ю. Инновационные направления развития люберецких очистных сооружений / А. М. Понамаренко, Д. Ю. Власов, Н. А. Беновидр // Водоснабжение и санитарная техника. – 2021. – № 1. – С. 46–49.

References

1. Eksploataciya sistem vodosnabzheniya, kanalizacii i gazosnabzheniya: Spravochnik / Pod red. V. D. Dmitrieva, B. G. Mishukova. – 3-e izd., pererab. i dop. – L.: Strojizdat, 1988. – 383 s.
2. Turovskij, I. S. Obrabotka osadkov stochnyh vod / I. S. Turovskij. – M.: Strojizdat, 1975. – 192 s.
3. Froster, K. F. Ekologicheskaya biotekhnolgiya / K. F. Froster, D. A. Dzh. Vejza. – L.: Himiya, 1990. – 160 s.
4. Kulakov, A. A. Sovershenstvovanie metodov obrabotki osadkov gorodskih stochnyh vod. A. A. Kulakov, E. M. Terekhova, N. A. Kuceval // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2018. – № 5. – S. 16–20.
5. Lukov, S. A. Sovershenstvovanie tekhnologii obrabotki osadkov stochnyh vod krupnyh gorodov (na primere g. Nizhnij Novgorod): dis. k.t.n.: 05.23.04 / S. A. Lukov. – Nizhnij Novgorod, 2007. – 204 s.
6. Rubchak, N. YU. Sooruzheniya dlya obrabotki osadkov gorodskih stochnyh vod / N. YU. Rubchak, M. N. Sirota. – M.: Strojizdat. – 1978. – 216 s.
7. Pugachev, E. A. Processy i apparaty obrabotki osadkov stochnyh vod / E. A. Pugachev. – M.: Izdatel'stvo ASV. – 2012. – 143 s.
8. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1118623 S 02 F 11/12 Sgustitel' osadka / E. I. Dmuhajlo, V. S. Severyanin; blok № 5; Brestskij politekhnicheskij institut, 1993 g.
9. Gyunter, L. I. Metatenki / L. I. Gyunter, L. L. Gol'dfarb. – M.: Strojizdat, 1991. – 129 s.
10. Belov S. G. Pnevmo gidravlicheskiy dispergator «Tornado» / S. G. Belov, G. O. Naumchik, V. S. Belov // Aktual'nye nauchno-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya: materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Brest, 25–27 sentyabrya 2013 g. / BrGTU; redkol.: A. A. Volchek [i dr.] – Brest, 2013. – S. 7–12.
11. Dmuhajlo, V. I. Energoeffektivnaya sistema strujnoj aeracii dlya biokhimicheskoj ochistki stochnyh vod i obrazovaniya osadka / E. I. Dmuhajlo, S. G. Belov, V. S. Belov // Problemy energeticheskoy effektivnosti v razlichnyh otraslyah: materialy nauchnogo seminara, Brest, 25 marta 2016 g. / BrGTU; pod red. V. S. Severyanina, V. G. Novosel'ceva. – Brest, 2016. – S. 67–68.
12. Ponomarenko D. Yu. Innovacionnye napravleniya razvitiya lyubeckih ochistnyh sooruzhenij / A. M. Ponomarenko, D. YU. Vlasov, N. A. Benovidr // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2021. – № 1. – S. 46–49.

Материал поступил в редакцию 26.01.2022

НЕОБХОДИМОЕ И ДОСТАТОЧНОЕ УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПОДВИЖНОЙ ОСОБОЙ ТОЧКИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

М. В. Гасанов

*Преподаватель кафедры высшей математики «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет», e-mail: GasanovMV@mgsu.ru*

Реферат

Рассматривается нелинейное уравнение третьего порядка с полиномом седьмой степени в правой части. Отличительной чертой этого класса уравнений является наличие подвижных особенностей, что делает эти уравнения неразрешимыми в квадратурах. В работе получены интервальные критерии существования подвижных особых точек. Представленная теория является основой для составления алгоритма и написания программного комплекса нахождения подвижных особых точек.

Ключевые слова: волновые процессы, нелинейные дифференциальные уравнения, критерии существования подвижных особых точек.

A NECESSARY AND SUFFICIENT CONDITION FOR THE EXISTENCE OF A MOBILE SINGULAR POINT FOR A NONLINEAR DIFFERENTIAL EQUATION OF THE THIRD ORDER

M. V. Gasanov

Abstract

A nonlinear third-order equation with a seventh-degree polynomial on the right-hand side is considered. A distinctive feature of this class of equations is the presence of movable functions, which makes these equations undecidable in quadratures. The work obtained data on the observance of movable singular points. The presented theory is a means of compiling an algorithm and writing a software complex for finding moving points.

Keywords: wave processes, nonlinear differential equations, signs of the existence of moving points

Введение

В работе [1] рассматриваются волновые процессы в стержне на основе обобщенного уравнения Кортевега – де Фриза – Бюргерса

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \varphi(u)}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + m \frac{\partial^3 u}{\partial z^3}, \quad m, \mu = \text{const.}$$

В случае стационарного процесса, когда время отсутствует, уравнение переходит в категорию обыкновенных дифференциальных уравнений. В зависимости от параметров уравнения переходим к исследуемому нами классу дифференциальных уравнений. В указанной публикации при рассмотрении исходного уравнения не была учтена специфика рассматриваемого уравнения, существование подвижной особой точки. Поэтому о строгом аналитическом решении говорить не приходится, так как наличие подвижных особых точек является препятствием к разрешимости рассматриваемого уравнения в квадратурах.

В публикации [2] так же проводится исследование волновых процессов для эластичных балок. Рассматривается задача в виде дифференциального уравнения третьего порядка, заданного неявно:

$$f(t, u(t), u'(t), u''(t), u'''(t)) = 0, \quad 0 \leq t \leq 1$$

$$u(0) = u'(0) = u'(1) = 0.$$

Неявный случай подразумевает как линейный случай, так и нелинейный. Поэтому аналогично, как и в случае с работой [1], не учтена специфика нелинейных дифференциальных уравнений, существование подвижных особенностей.

Для реализации метода нахождения аналитического приближенного решения с подвижными особенностями необходимо строить алгоритмы для программного обеспечения, основой которого и является теоретический материал, представленный в данной работе. Реализация данного метода была рассмотрена в работах [3–5].

Если работах [6–7] дается теоретическое обоснование учета особенностей, применяемого класса нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка для исследования волновых

процессов в эластичных балках, то в статьях [8–9] дано развитие общих теоретических положений при исследовании нелинейных дифференциальных уравнений с подвижными особенностями. Отметим ряд работ последнего времени с приложением данной категории уравнений для строительных конструкций [10–17].

Рассмотрим нелинейное дифференциальное уравнение

$$y'''(x) = \sum_{n=1}^7 a_n(x) y^n(x), \quad (1)$$

которое с помощью замены, показанной в работе [7], приводится к нормальной форме

$$y''' = y^7 + r(x). \quad (2)$$

Добавив начальные условия

$$\begin{cases} y(x_0) = y_0, \\ y'(x_1) = y_1, \\ y''(x_2) = y_2, \end{cases} \quad (3)$$

рассмотрим задачу Коши (2)–(3).

Далее, путем замены $y(x) = \frac{1}{u(x)}$ переходим к инверсному уравнению:

$$u''' \cdot u^5 = 6u^4 \cdot u' \cdot u'' + 6(u'u'')^3 + 1 + u^7 \cdot r(x) \quad (4)$$

$$\begin{cases} u(x_0) = u_0, \\ u'(x_1) = u_1, \\ u''(x_2) = u_2. \end{cases} \quad (5)$$

Используя связь локальных экстремумов инверсионной и прямой задачи, сформулируем следующую теорему:

Теорема 1. Потребуем выполнение следующих условий:

- 1) $y(x)$ – решение задачи Коши (2) – (3) и $u(x)$ – решение инверсной задачи Коши (4)–(5) непрерывны на отрезке $[a; b]$
- 2) $\forall x \in [a; b] u(x) > 0 (u(x) < 0)$.

Тогда необходимым и достаточным условием локального максимума $y(x)$, решение задачи Коши (2)–(3), в точке $c \in (a; b)$ является наличие у функции $u(x)$, являющейся решением инверсной задачи Коши (4)–(5), минимума в точке c .

Доказательство данного факта основывается на использовании классического метода математического анализа, необходимого и достаточного условия локального экстремума.

Теорема 2. Пусть функция $y(x)$ – решение задачи Коши (2)–(3), определена на полуинтервале $[x_0; x^*)$, где $x_0 < x^*$, x^* – подвижная особая точка задачи Коши (2)–(3). Тогда найдется некоторая окрестность $[a; x^*)$ точки x^* , в которой функция $y(x)$, ее первая и вторая производная имеют один знак $y(x) > 0, y' > 0, y'' > 0, (y(x) < 0, y'(x) < 0, y''(x) < 0)$.

Доказательство. Функцию $y(x)$ можно представить в виде

$$y(x) = (x^* - x)^{\frac{1}{2}} \sum_0^{\infty} C_n (x^* - x)^{\frac{n}{2}}. \quad (6)$$

Согласно теореме существования, найдется точка $x_1 \in [x_0; x^*)$, для которой правильная часть ряда (6) сходится в области $[x_1; x^*)$. Расписывая правую часть (6) получаем:

$$y(x) = -\sqrt[6]{\frac{15}{8}} (x^* - x)^{\frac{1}{2}} + C_6 (x^* - x)^3 + C_7 (x^* - x)^{\frac{7}{2}} + \dots \quad (7)$$

Дифференцируя обе части равенства (8), имеем:

$$y'(x) = y(x) = -\frac{1}{2} \cdot \sqrt[6]{\frac{15}{8}} (x^* - x)^{\frac{3}{2}} - 3C_6 (x^* - x)^2 - \frac{7}{2} C_7 (x^* - x)^{\frac{5}{2}} - \dots \quad (8)$$

Введем обозначения

$$y'(x) = g_1(x) + h_1(x),$$

$$g_1(x) = -\frac{1}{2} \cdot \sqrt[6]{\frac{15}{8}} (x^* - x)^{\frac{3}{2}};$$

$$h_1(x) = -3C_6 (x^* - x)^2 - \frac{7}{2} C_7 (x^* - x)^{\frac{5}{2}} - \dots$$

Учитывая, что $g_1(x) \rightarrow -\infty$, а также $h_1(x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow x^* - 0$, то найдется точка $x_2 : x_2 \geq x_1$, и $\forall x \in [x_2; x^*)$ будет выполняться неравенство $g_1(x) < h_1(x)$, следовательно $y'(x) < 0$.

Дифференцируем теперь выражение (9):

$$y''(x) = -\frac{3}{4} \cdot \sqrt[6]{\frac{15}{8}} (x^* - x)^{\frac{5}{2}} + 6C_6 (x^* - x) + \frac{35}{4} C_7 (x^* - x)^{\frac{3}{2}} + \dots \quad (9)$$

Обозначим

$$y''(x) = g_2(x) + h_2(x),$$

$$g_2(x) = -\frac{3}{4} \cdot \sqrt[6]{\frac{15}{8}} (x^* - x)^{\frac{5}{2}};$$

$$h_2(x) = 6C_6 (x^* - x) + \frac{35}{4} C_7 (x^* - x)^{\frac{3}{2}} + \dots$$

Так как $g_2(x) \rightarrow -\infty$ и $h_2(x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow x^* - 0$, то существует такая точка $x_3 : x_3 \geq x_1$, что для любого x из полуинтервала $[x_3; x^*)$ будет выполняться неравенство $g_2(x) < h_2(x)$, следовательно $y''(x) < 0$.

Теорема 3. Точечный критерий существования подвижных особых точек. Чтобы x^* являлась подвижной особой точкой функции $y(x)$, решение задачи Коши (2)–(3), необходимо и достаточно, чтобы функция $x(u)$, являющаяся обратной функцией решения инверсной задачи Коши (4)–(5), удовлетворяла следующим условиям:

$$x(0) = x^*, x'(0) = 0, x''(0) = -\sqrt[3]{15}. \quad (10)$$

Доказательство. Необходимость. Представим функцию $u(x)$ в виде регулярного ряда:

$$u(x) = D_0 (x^* - x)^{\frac{1}{2}} + D_1 (x^* - x) + D_2 (x^* - x)^{\frac{3}{2}} + \dots \quad (11)$$

Учитывая, что $u(0) = 0$, и на основании теоремы Лагранжа об обращении рядов [18] получаем:

$$(x^* - x)^{\frac{1}{2}} = \sum_1^{\infty} B_n \cdot u^n,$$

где $B_1 = \frac{1}{C_0}$.

Тогда

$$x^* - x = \left(\sum_1^{\infty} B_n \cdot u^n \right)^2 \quad (12)$$

или

$$x^* - x = \tilde{B}_1^2 \cdot u^2 + \tilde{B}_2 u^3 + \tilde{B}_3 u^4 + \dots$$

При $u = 0$ получаем $x(0) = x^*$. Далее, дифференцируя по u , имеем:

$$x' = -2\tilde{B}_1^2 \cdot u - 3\tilde{B}_2 u^2 - 4\tilde{B}_3 u^3 + \dots$$

Откуда находим $x'(0) = 0$, а также

$$x'' = -2\tilde{B}_1^2 - 6\tilde{B}_2 u - 12\tilde{B}_3 u^2 + \dots$$

В итоге получаем требуемое:

$$x(0) = x^*, x'(0) = 0, x''(0) = -\sqrt[3]{15}.$$

Достаточность. Докажем, что исходная функция $y(x)$ имеет особую точку алгебраического типа. Исходя из теоремы 3, представим функцию $x(u)$ в виде регулярного ряда:

$$x(u) = B_0 + B_1 u + B_2 u^2 + \dots$$

Обозначим $B_0 = x^*$. Дифференцируя, получаем:

$$x' = B_1 + 2B_2 u + 3B_3 u^2 + \dots,$$

$$x'' = 2B_2 + 6B_3 u + 12B_4 u^2 + \dots$$

Из условия теоремы находим значения коэффициентов разложения

$$B_1 = 0, B_2 = \frac{-\sqrt[3]{15}}{2}. \text{ С учетом найденных коэффициентов}$$

имеем:

$$x(u) = x^* + \frac{-\sqrt[3]{15}}{2} u^2 + \tilde{B}_3 u^3 + \dots$$

или

$$x^* - x = \frac{\sqrt[3]{15}}{2} u^2 - \tilde{B}_3 u^3 - \tilde{B}_4 u^4 - \dots$$

На основании теоремы об обращении рядов [18] получаем:

$$u(x) = D_0 (x^* - x)^2 + D_1 (x^* - x) + D_2 (x^* - x)^3 + \dots,$$

где $D_1 = \left(\frac{2}{\sqrt[3]{15}}\right)^2$.

В силу используемой замены $y(x) = \frac{1}{u(x)}$, исходная функция записывается в виде:

$$y(x) = \frac{1}{u(x)} = \frac{1}{D_0} (x^* - x)^{-2} + \tilde{D}_1 (x^* - x)^0 + \tilde{D}_2 (x^* - x)^2 + \dots$$

Данное разложение представимо в виде (6). Таким образом, x^* является подвижной особой точкой задачи Коши (2)–(3), что и завершает доказательство.

Теорема 4. Интервальный критерий существования подвижной особой точки. x^* является подвижной особой точкой $y(x)$, решения задачи Коши (2)–(3), тогда и только тогда, когда существует некоторая окрестность подвижной особой точки $[x_1; x_2]$, $x^* \in [x_1; x_2]$, для которой функция $u(x)$, решение инверсной задачи Коши (4)–(5), являлась бы непрерывной и выполнялось условие:

$$u(x_1) \cdot u(x_2) < 0.$$

Доказательство. Необходимость. Так как уравнение было переведено в инверсное, то точка x^* для функции $u(x)$ переходит в класс регулярных, а значит функция $u(x)$ непрерывна, при этом $u(x^*) = 0$. При переходе через точку x^* функция $u(x)$ меняет знак, согласно теореме Больцано – Коши получаем требуемое: $u(x_1) \cdot u(x_2) < 0$.

Достаточность. Так как функция $u(x)$ непрерывна и имеет различные знаки на концах отрезка $u(x_1) \cdot u(x_2) < 0$, то существует точка $x_3 \in [x_1; x_2]$, в которой функция $u(x)$ равна нулю.

Тогда в силу инверсии $y(x) = \frac{1}{u(x)}$, x_3 является подвижной особой точкой для решения задачи Коши (2)–(3).

Вывод

В данной статье решена задача о нахождении точных критериев существования подвижных особенностей (необходимое условие существования, необходимое и достаточное условие существования), что является основой для разработки алгоритма и программного комплекса для нахождения подвижных особых точек с любой наперед заданной точностью.

Список цитированных источников

1. Чугайнова, А. П. Нестационарные решения обобщенного уравнения Кортвега – де Фриза – Бюргерса / А. П. Чугайнова // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. – 2013. – No. 281. – P. 204–212.
2. Yuqiang Feng. Existence and uniqueness results for a third-order implicit differential equation / Feng Yuqiang // Computers and Mathematics with Applications. – 2008. – No. 56. – P. 2507–2514.
3. Леонтьева, Т. Ю. Об одном обобщении точных критериев существования подвижных особых точек одного класса нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений в комплексной области / Т. Ю. Леонтьева // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. – 2017. – № 13 (262). – Вып. 47.
4. Орлов, В. Н. Точные критерии существования подвижных особых точек решения одного нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения / В. Н. Орлов, М. П. Гузь // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 4 (80). – Ч. 2.
5. Орлов, В. Н. Метод приближенного решения первого, второго дифференциальных уравнений Пенлеве и Абеля / В. Н. Орлов. – М.: МПГУ, 2013. – 174 с.
6. Orlov, V. N. Study of wave processes in elastic beams and nonlinear differential equations with moving singular points / V. N. Orlov, M. V. Gasanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020.
7. Орлов, В. Н. Теорема существования решения одного класса нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка с полиномиальной правой частью седьмой степени в окрестности подвижной особой точки / В. Н. Орлов, М. В. Гасанов // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. – 2020. – № 1 (43). – С. 92–99.
8. Орлов, В. Н. Исследование приближенного решения дифференциального уравнения Абеля в окрестности подвижной особой точки / В. Н. Орлов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Естественные науки. – 2009. – № 4 (35). – С. 23–32.
9. Орлов, В. Н. О расширении области для аналитического приближенного решения одного класса нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка в комплексной области / В. Н. Орлов, Т. Ю. Леонтьева // Вестник Самарского гос. техн. университета. Сер. Физ.-мат. Науки. – 2020. – Т. 2.
10. Орлов, В. Н. Теорема существования решения одного класса нелинейных дифференциальных уравнений четвертого порядка с полиномиальной правой частью второй степени в окрестности подвижной особой точки / В. Н. Орлов, Б. Б. Ив // Вестник Башкирского университета. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 980–986.
11. Orlov, V. N. Mathematical modeling of building structures and nonlinear differential equations / V. N. Orlov, Y. G. Zhiglova // International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. – 2020. – Vol. 11, No. 3. 2050026 (7 pages) World Scientific Publishing Company.
12. Orlov, V. N. Research of one class of nonlinear differential equations of third order for mathematical modelling the complex structures / V. N. Orlov, O. A. Kovalchuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – No. 365.
13. Research into a Class of Third-Order Nonlinear Differential Equations in the Domain of Analyticity / V. N. Orlov [et al.] // Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci. – 2018. – No. 4. – P. 24–35 (in Russ.).
14. Orlov, V. N. Mathematical modeling of complex structures and nonlinear differential equations with movable points / V. N. Orlov, O. A. Kovalchuk // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – No. 456. 012122 IOP Publishing.

15. Orlov, V. N. Mathematical problems of reliability assurance the building constructions / V. N. Orlov, O. A. Kovalchuk // E3S Web Conf. XXII International Scientific Conference – Construction the Formation of Living EnvironmentII (FORM-2019). Volume 97. 03031. – 2019.
16. Orlov, V. N. An analytical solution with a given accuracy for a nonlinear mathematical model of a console-type construction (Scopus) / V. N. Orlov, O. A. Kovalchuk // 18 Modelling and Methods of Structural Analysis IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1425. 012127 IOP Publishing. – 2020.
17. Orlov, V. N. On the theory of constructing a numerical-analytical solution of a cantilever beam bend nonlinear differential equation of the first order (Scopus) / V. N. Orlov, A. Chichurin // Modelling and Methods of Structural Analysis IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1425. 012129 IOP Publishing. – 2020.
18. Голубев, В. В. Лекции по аналитической теории дифференциальных уравнений / В. В. Голубев. – М. – Л. : Гостехтеориздам, 1950.
8. Orlov, V. N. Issledovanie priblizhennogo resheniya differencial'nogo uravneniya Abelya v okrestnosti podvizhnoj osoboj toчки / V. N. Orlov // Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Seriya: Estestvennye nauki. – 2009. – № 4 (35). – S. 23–32.
9. Orlov, V. N. O rasshirenii oblasti dlya analiticheskogo pri-blizhennogo resheniya odnogo klassa nelinejnyh differenci-al'nyh uravnenij vtorogo poryadka v kompleksnoj oblasti / V. N. Orlov, T. Yu. Leont'eva // Vestnik Samarskogo gos. tekhn. universiteta. Ser. Fiz.-mat. Nauki. – 2020. – T. 2.
10. Orlov, V. N. Teorema sushchestvovaniya resheniya odnogo klassa nelinejnyh differencial'nyh uravnenij chetvertogo poryadka s polinomial'noj pravoj chast'yu vtoroj stepeni v okrestnosti podvizhnoj osoboj toчки / V. N. Orlov, B. B. Iv // Vestnik Bashkirskogo universiteta. – 2018. – T. 23, № 4. – S. 980–986.
11. Orlov, V. N. Mathematical modeling of building structures and nonlinear differential equations / V. N. Orlov, Y. G. Zhiglova // International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. – 2020. – Vol. 11, No. 3. 2050026 (7 pages) World Scientific Publishing Company.
12. Orlov, V. N. Research of one class of nonlinear differential equations of third order for mathematical modelling the complex structures / V. N. Orlov, O. A. Kovalchuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – No. 365.
13. Research into a Class of Third-Order Nonlinear Differential Equations in the Domain of Analyticity / V. N. Orlov [et al.] // Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci. – 2018. – No. 4. – P. 24–35 (in Russ.).
14. Orlov, V. N. Mathematical modeling of complex structures and nonlinear differential equations with movable points / V. N. Orlov, O. A. Kovalchuk // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – No. 456. 012122 IOP Publishing.
15. Orlov, V. N. Mathematical problems of reliability assurance the building constructions / V. N. Orlov, O. A. Kovalchuk // E3S Web Conf. XXII International Scientific Conference – Construction the Formation of Living EnvironmentII (FORM-2019). Volume 97. 03031. – 2019.
16. Orlov, V. N. An analytical solution with a given accuracy for a nonlinear mathematical model of a console-type construction (Scopus) / V. N. Orlov, O. A. Kovalchuk // 18 Modelling and Methods of Structural Analysis IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1425. 012127 IOP Publishing. – 2020.
17. Orlov, V. N. On the theory of constructing a numerical-analytical solution of a cantilever beam bend nonlinear differential equation of the first order (Scopus) / V. N. Orlov, A. Chichurin // Modelling and Methods of Structural Analysis IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1425. 012129 IOP Publishing. – 2020.
18. Golubev, V. V. Lekcii po analiticheskoi teorii differencial'nyh uravnenij / V. V. Golubev. – М. – Л. : Gostekhteorizdam, 1950.
1. Chugajnova, A. P. Nestacionarnye resheniya obobshchennogo uravneniya Kortevega – de Friza – Byurgersa / A. P. Chugajnova // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. – 2013. – No. 281. – P. 204–212.
2. Yuqiang Feng. Existence and uniqueness results for a third-order implicit differential equation / Feng Yuqiang // Computers and Mathematics with Applications. – 2008. – No. 56. – P. 2507–2514.
3. Leont'eva, T. Yu. Ob odnom obobshchenii tochnyh kriteriev sushchestvovaniya podvizhnyh osobyh toчек odnogo klassa nelinejnyh obyknovennyh differencial'nyh uravnenij v kompleksnoj oblasti / T. Yu. Leont'eva // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Fizika. – 2017. – № 13 (262). – Vyp. 47.
4. Orlov, V. N. Tochnye kriterii sushchestvovaniya podvizhnyh osobyh toчек resheniya odnogo nelinejnogo obyknovennogo differencial'nogo uravneniya / V. N. Orlov, M. P. Guz' // Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I. Ya. Yakovleva. – 2013. – № 4 (80). – CH. 2.
5. Orlov, V. N. Metod priblizhennogo resheniya pervogo, vtorogo differencial'nyh uravnenij Penleve i Abelya / V. N. Orlov. – М. : MPGU, 2013. – 174 s.
6. Orlov, V. N. Study of wave processes in elastic beams and nonlinear differential equations with moving singular points / V. N. Orlov, M. V. Gasanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020.
7. Orlov, V. N. Teorema sushchestvovaniya resheniya odnogo klassa nelinejnyh differencial'nyh uravnenij tret'ego poryadka s polinomial'noj pravoj chast'yu sed'moj stepeni v okrestnosti podvizhnoj osoboj toчки / V. N. Orlov, M. V. Gasanov // Vestnik CHGPU im. I. Ya. Yakovleva Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya. – 2020. – № 1 (43). – S. 92–99.

Материал поступил в редакцию 18.01.2022

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ БИТУМНО-ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ИХ СМЕСЕЙ

В. П. Дубодел¹, И. И. Злотников², В. М. Шаповалов³

¹ Магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры инженерно-педагогического образования Мозырского государственного педагогического университета им. И. П. Шамякина, Мозырь, Беларусь, e-mail: dubodelvp@tut.by

² К. т. н., доцент, доцент кафедры физики Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь, e-mail: zlotnikov@gstu.by

³ Д. т. н., профессор, зав. отделом ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ», Гомель, Беларусь, e-mail: v.shapovalov@tut.by

Реферат

Модифицирование битумов полимерами является одним из наиболее распространённых способов повышения их свойств, но и самым дорогостоящим.

В статье изучено влияние вторичных полимеров и их смесей на свойства нефтяных битумов. Разработаны битумно-полимерные композиционные материалы с улучшенными физико-механическими свойствами и технико-экономическими показателями.

Исследованы температура размягчения разработанных битумно-полимерных композиций и их адгезия к бетону в зависимости от типа полимерной добавки.

Проведенные исследования показали, что введение в нефтяные битумы вторичных полимеров позволяет улучшить их механические свойства и теплостойкость, а также значительно снизить стоимость получаемых битумно-полимерных композиций. Повышение некоторых свойств от введения вторичных полимеров в ряде случаев может быть даже выше, чем при использовании первичных.

Ключевые слова: нефтяной битум, полимеры, вторичные полимеры, битумно-полимерные композиции, теплостойкость, адгезия.

DEVELOPMENT EXPERIENCE FOR PRODUCTION OF WATER PROOF BITUMEN- POLYMER MATERIALS WHERE THE MIXTURES OF RECYCLED POLYMER WERE USED

V. P. Dubodel, I. I. Zlotnikov, V. M. Shapovalov

Abstract

Modification of bitumen with polymers is one of the most common ways to improve their properties and costliness.

The article is devoted to the investigation of the effect which is achieved by the secondary polymers and their mixtures on the properties of petroleum bitumen. Bitumen-polymer composite materials with improved physical and mechanical properties and technical and economic indicators have been developed.

The softening temperature of the developed bitumen-polymer compositions and their adhesion to concrete were investigated taking into account the type of polymer additive.

The research has shown that if petroleum bitumen of recycled polymers has been used, mechanical characteristics and thermal integrity get better. It influences directly on the price of bitumen-polymer materials, because it reduces. Several characteristics of the material get higher when the recycled polymers are used.

Keywords: petroleum bitumen, polymers, recycled polymers, bitum-polymer compound, heat resistance, adhesion.

Введение

Современная строительная индустрия требует разработки новых строительных материалов с высокими эксплуатационными и технико-экономическими показателями, обеспечивающими долговечность зданий и сооружений при различных неблагоприятных воздействиях. Битумные материалы – самые распространённые для обустройства кровельных и гидроизоляционных работ, где они подвержены воздействию осадков, солнечного излучения, перепадов температур и других атмосферных факторов. Для улучшения свойств битумов и повышения их долговечности, проводят их модифицирование различными добавками и реагентами, обеспечивающими требуемую долговечность получаемых композиционных материалов.

В настоящее время модифицирование битумов полимерами является одним из наиболее распространённых способов повышения их свойств, однако, и самым дорогостоящим. Введение в битум небольшого количества модификатора (2–10 %) приближает его свойства к свойствам полимера, но повышает стоимость примерно в 2 раза. Наиболее распространёнными полимерными добавками в настоящее время являются атактический полипропилен, полиэтилен, этиленпропиленбутен, поливинилхлорид и некоторые другие [1, 2]. Так, например, известно битумное вяжущее, включающее, мас. %: битум 90,0–99,0; низкоокисленный атактический полипропилен 0,5–5,0 и этерифицированный кремнезем 0,5–5,0, обладающее повышенными прочностными характеристиками, водостойкостью, стойкостью к сезонным температурным перепадам [3]. А битумно-

полимерная мастика, содержащая, мас. %: битум 86–40; атактический полипропилен 2–10; этилсиликат 2–10 и золу-унос обладает повышенной теплостойкостью и морозостойкостью и успешно используется в строительстве для гидроизоляции и герметизации элементов конструкций и сооружений [4].

Как уже отмечалось выше, недостатком таких битумно-полимерных композиций является их высокая стоимость по сравнению с обычными битумами. Поэтому интенсивно изучается возможность использования в битумно-полимерных композициях отходов различных полимеров. Например, согласно изобретению [5] известно битумно-полимерное вяжущее, включающее, мас. %: смесь битума с отходами полиэтилена при содержании последних в смеси 2–5 мас. % – 90,0–99,7 и окисленный атактический полипропилен 0,3–10,0. Такое битумно-полимерное вяжущее обладает высокими адгезионными свойствами к бетону, стали и минеральным наполнителям, повышенными теплостойкостью и стойкостью к термоокислительному старению, но содержит малое количество отходов полиэтилена, что приводит к его высокой стоимости и не позволяет утилизировать отходы различных полимеров в заметных объемах.

Таким образом, модифицирование битумов полимерами способствует улучшению таких свойств битумов, как пластичность, морозостойкость, температура размягчения (стеклования) и адгезионные свойства. Однако введение сравнительно больших количеств полимеров приводит как к удорожанию композиций, так и к технологическим трудностям их переработки, что связано в первую очередь

с тем, что полимеры в битуме образуют сравнительно грубодисперсную структуру, склонную к расслаиванию. Это объясняется тем, что молекулярная масса полимеров в десятки и сотни раз превышает молекулярную массу нефтяных битумов. В то же время вторичные полимеры имеют меньшую молекулярную массу по сравнению с исходными полимерами, что связано с протеканием деструкционных процессов при переработке, что предполагает получение более однородных битумно-полимерных композиций. Кроме того, вторичные полимеры имеют значительно меньшую стоимость.

В связи с этим, целью данного исследования является изучение влияния вторичных полимеров и их смесей на свойства битума и разработка битумно-полимерных композиционных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами и технико-экономическими показателями.

Материалы и методы исследования

В качестве основы использовали битум нефтяной строительный марки БН 70/30 по ГОСТ 6617-76. С целью улучшения физико-механических свойств разрабатываемых защитных и гидроизоляционных композиционных материалов в битум вводили добавки вторичных полимеров: полиэтилен высокого давления (ПЭВД) – измельченная пленка по ГОСТ 10354-85 и полиэтилен низкого давления (ПЭНД) по ТУ РБ 800017526.003-2004. Для повышения механических свойств и теплостойкости в состав битумно-полимерных композиций вводили ультрадисперсный диоксид кремния марки «Ковелос».

Модельные композиции готовили следующим образом. В металлическую емкость, снабженную обогревом и мешалкой, загружали вторичный полимер и разогревали до температуры 160–180 °С. Затем в полученный расплав вводили битум и перемешивали смесь в течение 10–15 минут до полной гомогенизации. После этого в смесь вводили диоксид кремния и перемешивали еще около 5 мин. Готовую композицию использовали для приготовления образцов, которые получали методом свободной заливки горячего расплава в кюветы, изготовленные из алюминиевой фольги.

Для полученных образцов проводили определение следующих параметров: глубину проникновения иглы при 25 °С, температуру размягчения по ГОСТ 11506-73, растяжимость при 25 °С и прочность сцепления композиции с бетонным и металлическим основанием. Прочность сцепления определяли на разрывной машине методом нормального отрыва металлических и бетонных прямоугольных образцов, склеенных расплавами композиций, после 3 суток выдержки при температуре 20±5 °С.

Результаты исследований и их обсуждение

На рисунке 1 приведена зависимость температуры размягчения битумно-полимерной композиции от содержания некоторых вторичных полимеров.

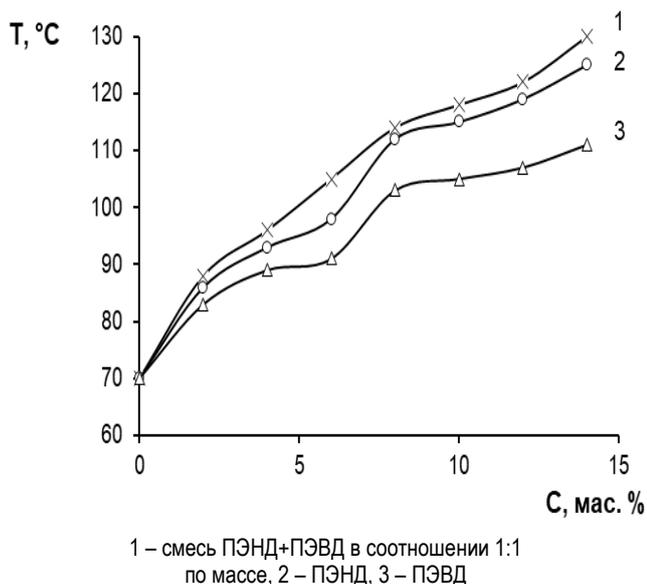


Рисунок 1 – Зависимость температуры размягчения битумно-полимерной композиции от содержания вторичных полимеров

Как следует из представленных данных, введение вторичных ПЭНД и ПЭВД значительно повышает температуру размягчения битума, причём использование их смесей позволяет получать дополнительный эффект повышения теплостойкости.

На рисунке 2 приведена зависимость адгезии к бетону тех же битумно-полимерных композиций от содержания вторичных ПЭНД и ПЭВД.

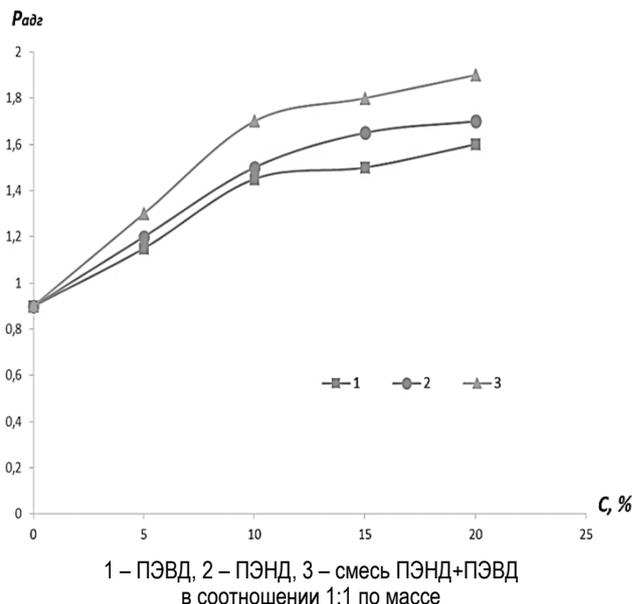


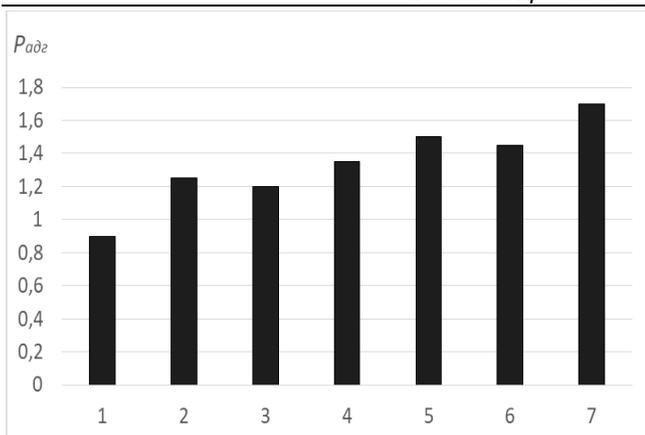
Рисунок 2 – Зависимость адгезии к бетону битумно-полимерной композиции от содержания вторичных полимеров

Из рисунка 2 следует, что добавки вторичных ПЭНД и ПЭВД повышают адгезию битума к бетону, причём при использовании смесей этих полиолефинов эффект увеличения адгезии более выражен. Проведенные исследования показали, что оптимальным содержанием вторичных полимеров в битуме является 15–20 мас.%. Введение большего количества полимеров хотя и увеличивает показатели температуры размягчения и адгезии, но приводит к технологическим трудностям. Во-первых, для получения однородной битумно-полимерной смеси требуется значительно большее время перемешивания и более высокие температуры, что приводит к увеличению энергозатрат, а во-вторых, полученные расплавы характеризуются значительно большей вязкостью, чем исходный битум, что затрудняет их использование.

Для сравнения были проведены аналогичные исследования с первичными полимерами. Рисунок 3 иллюстрирует сравнительное влияние добавок первичных и вторичных полимеров, введенных в количестве 10 мас.%, на адгезию битума к бетону.

Тот факт, что использование вторичных полимеров приводит к большему увеличению адгезии, можно объяснить исходя из следующих соображений.

Используемые полиолефины начинают плавиться в интервале температур 105–140 °С и при этих температурах достаточно хорошо растворяются в нефтяных битумах. Если их добавлять в разогретые до температуры 160–180 °С битумы, то при перемешивании компонентов будет происходить термоокислительная деструкция высокомолекулярных соединений, что уменьшит их молекулярную массу и приблизит ее к молекулярной массе компонентов битума. Изменение химической структуры начинается уже в процессе первичной переработки полимеров, в особенности при экструзии, когда полимер подвергается значительным термоокислительным и механохимическим воздействиям. Для вторичных полимеров этот процесс выражен значительно сильнее, так как термоокислительные процессы в них начали протекать еще на стадии первичной переработки. Это может способствовать улучшению адгезии, когезии и снижению хрупкости битумно-полимерных композиций, увеличивая однородность их структуры в сравнении с битумами, к которым добавлены исходные (первичные) полимеры.



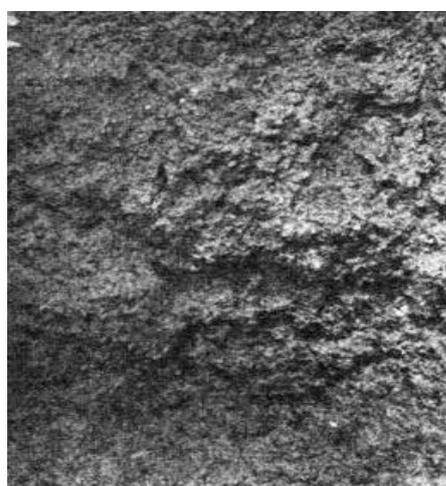
1 – битум без добавки, 2 – ПЭНД первичный, 3 – ПЭВД первичный, 4 – ПЭНД+ПЭВД первичные (1:1), 5 – ПЭНД вторичный, 6 – ПЭВД вторичный, 7 – ПЭНД+ПЭВД вторичные (1:1)

Рисунок 3 – Величина адгезии к бетону битумно-полимерной композиции в зависимости от типа полимерной добавки (10 мас.%)

Косвенным подтверждением такого механизма являются фотографии поверхности разрушения образцов, представленные на рисунке 4. Хорошо видно, что если для чистого битума характерно хрупкое разрушение, то при модифицировании битума 10 мас.% ПЭНД наблюдаются явные признаки пластичного разрушения.



а



б

Рисунок 4 – Вид поверхности разрушения битумных (а) и битумнополимерных (10 мас.% вторичного ПЭНД) (б) образцов

Кроме того, многие исследования структурных изменений полиолефинов при термодеструкции на воздухе или атмосфере кислорода при 150-210 °С показывают, что при этом образуются гидроксильные, перекисные, карбонильные и эфирные группы [6,7]. Появление таких групп и приводит к увеличению адгезии вторичных полимеров к различным поверхностям, в частности к бетону.

Для повышения механических свойств и стойкости к воздействию атмосферных факторов в состав битумных и битумно-полимерных композиций целесообразно вводить дисперсные минеральные наполнители: мел, известняк, каолин, асбест, тальк, технический углерод, сажу и др. [1, 2]. В связи с этим в состав битумно-полимерных композиций вводили ультрадисперсный диоксид кремния. Предполагалось, что частицы диоксида кремния повысят прочность и теплостойкость композиции, а кроме того, как показали ранее проведенные исследования [8], улучшат совместимость макромолекул вторичных полимеров.

Проведенные исследования послужили основой для разработки гидроизоляционной битумно-полимерной композиции, которая может быть использована в строительной индустрии для защиты бетонных, металлических и других конструкций, а также для проведения кровельных работ. Были испытаны следующие составы битумно-полимерной композиции, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы битумно-полимерной композиции, мас.%

| Компонент | Номер образца | | | |
|---|---------------|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| ПЭВД – измельченная пленка по ГОСТ 10354-85 | 5 | 8 | 10 | 15 |
| ПЭНД вторичный, ТУ РБ 800017526.003-2004 | 5 | 8 | 10 | 15 |
| Диоксид кремния марки «Ковелос» | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Битум марки БН 70/30 | 89 | 82 | 77 | 66 |

Диоксид кремния вводили в битумно-полимерную смесь в последнюю очередь. Свойства разработанной битумно-полимерной композиции приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства битумно-полимерной композиции

| Свойства | Номер образца | | | |
|------------------------------------|---------------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Температура размягчения, °С | 119 | 124 | 126 | 130 |
| Прочность сцепления с бетоном, МПа | 1,5 | 1,7 | 1,7 | 1,6 |

Как следует из таблицы 2, разработанные битумно-полимерные композиции имеют высокую температуру размягчения и адгезию к бетонным основаниям, что делает их перспективными строительными материалами. Кроме того, они содержат в своем составе вторичные полимеры, количество которых в сумме составляет от 10 % до 30 %. Это значительно снижает стоимость композиции и способствует частичному решению проблемы утилизации вторичных полимеров.

Закключение

На основании изложенного можно сделать следующее заключение: введение в нефтяные битумы вторичных полимеров позволяет улучшить их механические свойства и теплостойкость, а также значительно снизить стоимость получаемых битумно-полимерных композиций. Повышение свойств от введения вторичных полимеров может быть даже выше, чем при использовании первичных. Это объясняется тем, что вторичные полимеры имеют среднюю молекулярную массу меньшую, чем у первичных полимеров, а поэтому более близкую к молекулярной массе компонентов битума, что увеличивает их совместимость. Кроме того, у макромолекул вторичных полимеров вследствие протекания термодеструкционных и механохимических процессов появляется большое количество гидроксильных, перекисных, карбонильных и эфирных групп, что повышает адгезию вторичных полимеров к различным поверхностям, в частности к бетону.

Список цитированных источников

1. Кисина, А. М. Полимербитумные кровельные и гидроизоляционные материалы / А. М. Кисина, В. И. Куценко. – М. : Стройиздат, 1996. – 134 с.
2. Ярцев, В. П. Битумные композиты : учеб. пособие для студентов / В. П. Ярцев, А. В. Ерофеев. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2014. – 80 с.
3. Битумное вяжущее: пат. 2448994 Рос. Федерация : МПК C08L 95/00, C08L 23/20. / И. А. Абдуллин, А. И. Абдуллин, Н. Е. Тимофеев, Е. А. Емельянычева; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технологический университет. – № 2010115525/05; заявл. 19.04.2010; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. – 8 с.
4. Битумополимерная мастика: пат. 2489463 Рос. Федерация : МПК C08L 95/00, C09D 195/00, C08L 23/12. / Г. В. Васильевская, В. А. Шевченко; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – № 2012104959/05; заявл. 13.02.2012; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22. – 7 с.
5. Битумно-полимерное вяжущее: пат. 2181733 Рос. Федерация : МПК C08L 95/00, C08L 23/20. / В. П. Нехорошев, Е. А. Попов, А. В. Нехорошева; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет. – № 2000108065/04; заявл. 03.04.2000; опубл. 27.04.2002, Бюл. № 12. – 8 с.
6. Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов : учеб. пособие / А. С. Клинов [и др.]. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2010. – 100 с.
7. Термическая деструкция вторичного полиэтилена и получение анионного поверхностно-активного вещества / А. В. Нехорошева [и др.] // Пластические массы. – 2017. – № 9–10. – С. 50–53.
8. Тимошенко, В. В. Влияние степени диспергирования аморфного диоксида кремния на физико-механические свойства композитов на основе отходов полиолефинов / В. В. Тимошенко, В. М. Шаповалов, И. И. Злотников // Материалы, технологии, инструменты. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 48–52.

References

1. Kisina, A. M. Polimerbitumnye krovельnye i gidroizolyacionnye materialy / A. M. Kisina, V. I. Kucenko. – M. : Strojizdat, 1996. – 134 s.
2. Yarcev, V. P. Bitumnye kompozity : ucheb. posobie dlya studentov / V. P. Yarcev, A. V. Erofeev. – Tambov : Izd-vo TGTU, 2014. – 80 s.
3. Bitumnoe vyazhushchee: pat. 2448994 Ros. Federaciya : MPK C08L 95/00, C08L 23/20. / I. A. Abdullin, A. I. Abdullin, N. E. Timofeev, E. A. Emel'yanycheva; zayavitel' i patentoobladatel' Kazanskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet. – № 2010115525/05; zayavl. 19.04.2010; opubl. 27.04.2012, Byul. № 12. – 8 s.
4. Bitumopolimernaya mastika: pat. 2489463 Ros. Federaciya : MPK C08L 95/00, C09D 195/00, C08L 23/12. / G. V. Vasilovskaya, V. A. Shevchenko; zayavitel' i patentoobladatel' Sibirskij federal'nyj universitet. – № 2012104959/05; zayavl. 13.02.2012; opubl. 10.08.2013, Byul. № 22. – 7 s.
5. Bitumno-polimernoe vyazhushchee: pat. 2181733 Ros. Federaciya : MPK C08L 95/00, C08L 23/20. / V. P. Nekhoroshev, E. A. Popov, A. V. Nekhorosheva; zayavitel' i patentoobladatel' Tomskij gosudarstvennyj universitet. – № 2000108065/04; zayavl. 03.04.2000; opubl. 27.04.2002, Byul. № 12. – 8 s.
6. Utilizaciya i vtorichnaya pererabotka tary i upakovki iz polimernyh materialov : ucheb. posobie / A. S. Klinkov [i dr.]. – Tambov : Izd-vo TGTU, 2010. – 100 s.
7. Termicheskaya destrukciya vtorichnogo polietilena i poluchenie anionnogo poverhnostno-aktivnogo veshchestva / A. V. Nekhorosheva [i dr.] // Plasticheskie massy. – 2017. – № 9/10. – S. 50–53.
8. Timoshenko, V. V. Vliyanie stepeni dispergirovaniya amorfnogo dioksida kremniya na fiziko-mekhanicheskie svojstva kompozitov na osnove othodov poliolefinov / V. V. Timoshenko, V. M. SHapovalov, I. I. Zlotnikov // Materialy, tekhnologii, instrumenty. – 2009. – T. 14, № 3. – S. 48–52.

Материал поступил в редакцию 20.12.2021

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСЦВЕЧИВАНИЯ ГУМУСОВО-ГИДРОКАРБОНАТНО-КАЛЬЦИЕВЫХ ВОД КОАГУЛИРОВАНИЕМ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ОКИСЛЕНИЕМ ПЕРОКСИДОМ ВОДОРОДА В ПРИСУТСТВИИ МЕТАЛЛОВ ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТИ

Б. Н. Житенёв¹, А. Д. Гуринович²

¹К. т. н., профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охрана водных ресурсов Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: gitenev@tut.by

²Д. т. н., профессор кафедры водоснабжения и канализации Белостокского технического университета, Белосток, Польша, e-mail: a.gurinowicz@pd.edu.pl

Реферат

В республике имеются достаточные запасы поверхностных вод, которые по сравнению с подземными, более доступны для использования и являются более мягкими и слабоминерализованными. Широкому их применению препятствует наличие в них загрязнений природного и техногенного происхождения. С учетом исходного качества воды поверхностных источников и требований к технической воде рекомендовано окисление пероксидом водорода в присутствии Fe^{2+} , коагуляцию, напорную флотацию или фильтрацию в качестве основных технологических способов очистки от органических и неорганических соединений природного и антропогенного характера. В статье обоснована возможность применения пероксида водорода для интенсификации очистки поверхностных вод улучшенной окислительной технологией для технического водоснабжения, приведены технологические схемы очистки воды.

Ключевые слова: поверхностные воды, загрязнения природного и техногенного происхождения, пероксид водорода, техническое водоснабжение.

TECHNOLOGY OF COLORING HUMIC-HYDROCARBONATE-CALCIUM WATERS BY COAGULATION WITH PRELIMINARY OXIDATION WITH HYDROGEN PEROXIDE IN THE PRESENCE OF METALS OF VARIABLE VALENCE

B. N. Zhytsianiou, A. D. Hurynovich

Abstract

The republic has sufficient reserves of surface water, which, in comparison with groundwater, are more accessible for use and are softer and less mineralized. Their widespread use is hindered by the presence of natural and man-made pollution in them. Taking into account the initial water quality of surface sources and the requirements for industrial water, oxidation with hydrogen peroxide in the presence of Fe^{2+} , coagulation, pressure flotation or filtration are recommended as the main technological methods of purification from organic and inorganic compounds of natural and anthropogenic nature. The article substantiates the possibility of using hydrogen peroxide to intensify the purification of surface water by an improved oxidizing technology for technical water supply, and provides technological schemes for water purification.

Keywords: surface waters, pollution of natural and technogenic origin, hydrogen peroxide, technical water supply.

Введение

В Республике Беларусь прослеживается тенденция увеличения использования воды питьевого качества для производственных целей. Величина забора воды из поверхностных источников настоящее время по сравнению с 1990 годом уменьшилась в 3,2 раза и составила в 2017 году 560 млн м³ (рисунок 1). В Брестской, Минской областях и городе Минске более 60 % воды, используемой на производственные нужды, – вода питьевого качества (рисунок 2).

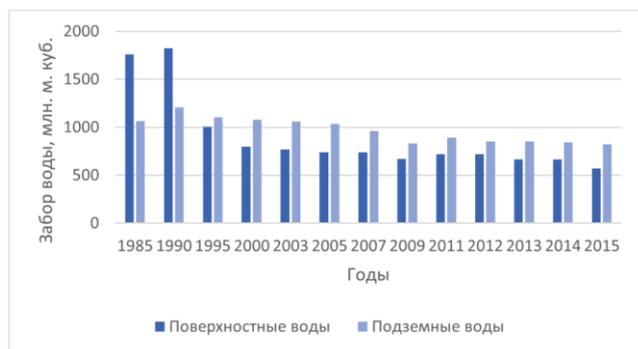


Рисунок 1 – Динамика забора воды из природных источников [1]

В целом по республике этот показатель составляет около 40 % и с 2003 года он растет.

Такое нерациональное потребление подземных вод ведет к снижению их эксплуатационных запасов, значительным затратам и удорожанию продукции, выпускаемой предприятиями. Альтернативой является использование поверхностных вод. Поверхностные воды более доступны, к тому же они являются более мягкими и слабоминерализованными по сравнению с подземными. Это выгодно

отличает их при употреблении для технических целей, для которых накладывается ограничения на жесткость и солесодержание.

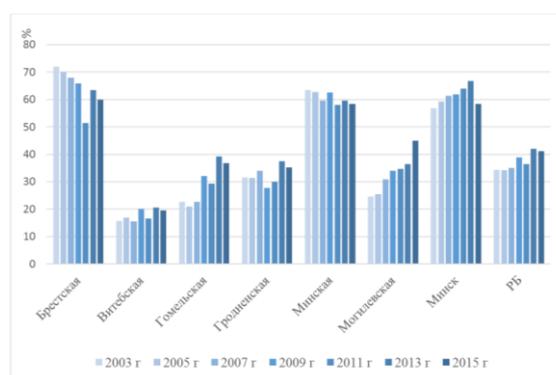


Рисунок 2 – Использование воды питьевого качества для производственных целей за период 2003–2015 годов [1]

Широкому использованию поверхностных вод для производственного водоснабжения препятствуют присутствующие в них органические и минеральные загрязнения. Поверхностные воды западной части Республики Беларусь относятся к гумусово-гидрокарбонатно-кальциевым.

Органические вещества, содержащиеся в большинстве поверхностных природных вод, представлены гуминовыми и фульвокислотами, а также их металлоорганическими комплексами, которые осложняют процессы водоподготовки (рисунок 3). Разработка эффективного метода очистки природных вод от устойчивых к разрушению органических соединений позволит шире использовать природные поверхностные воды для производственных процессов.

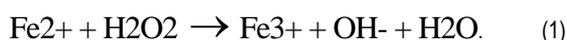


Рисунок 3 – Влияние гуминовых и фульвовых кислот на водоподготовку ионным обменом

Перспективным направлением интенсификации процессов очистки воды от органических примесей является использование окислительных систем с образованием радикалов ОН. В литературе эти процессы получили названия: «улучшенные окислительные технологии», «передовые окислительные процессы», «продвинутое окисление», «глубокое окисление». Радикалы ОН имеют более высокий окислительный потенциал. Примерами таких окислительных процессов могут служить: УФ, О₃, УФ/ТiО₂, О₃/Fe²⁺, О₃/H₂O₂, О₃/УФ, УФ/ H₂O₂, H₂O₂/Fe²⁺, H₂O₂/Fe²⁺/O₃, УФ/ H₂O₂/O₃, H₂O₂/Fe²⁺/УФ и О₃/УФ / H₂O₂/Fe²⁺.

Гумусовые кислоты в поверхностных водах находятся в растворенном, взвешенном и коллоидном состояниях, соотношения между которыми определяются химическим составом вод, pH, биологической ситуацией в водоеме и другими факторами.

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. 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 [2, 3, 4]. В последнее время возрастает интерес к использованию в качестве окислителя пероксида водорода. В нормальных условиях пероксид водорода мало реакционноспособен, но в присутствии катализаторов активируется. На механизм разложения H₂O₂ наибольшее влияние оказывают pH реакционной среды и присутствие ионов металлов переменной валентности (железо, марганец, медь и др.).



Эти катализаторы оказывают активирующее воздействие на процесс разрушения пероксида водорода с образованием свободных радикалов (окислительный потенциал 2,87 В), которые являются сильными окисляющими агентами, способными разрушать многие органические вещества. В работах [5–10] приводятся результаты исследований по очистке воды от органических примесей, в том числе гуминовых и фульвокислот улучшенными окислительными технологиями. Известно, что разложение пероксида водорода интенсифицируется под воздействием солнечного света или УФ-излучения. Кванты света с длиной волны 200–300 нм интенсивно

поглощаются пероксидом водорода. В результате чего образуются радикалы, обладающие высокой окислительной способностью. Это позволяет обезвреживать сточные воды, содержащие лекарственные препараты [11–14], красители [15–20], гербициды [21–23], пестициды [24–29].

Основная часть

Для разработки метода обесцвечивания гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод заболоченных районов Беларуси с улучшенной окислительной технологией было произведено исследование по совместному влиянию массовых концентраций пероксида водорода, сульфата железа (II) и алюминия гидроксид хлорида на процесс удаления органических загрязнений природных вод.

Эффективное снижение цветности воды объясняется тем, что пероксид водорода в присутствии Fe²⁺ разлагается по реакции, в соответствии с уравнением (1).

При этом образующиеся в результате реакции Фентона гидроксидные радикалы окисляют гидрофильные органические соединения, стабилизирующие дисперсные примеси воды, и облегчают условия протекания коагуляции.

После введения АГХ, диссоциирует в водном растворе на ионы, его гидролиз может быть представлен следующей реакцией:



Коллоидные частицы гидроксида алюминия в нейтральной и слабокислой среде вследствие сорбции катионов водорода и алюминия имеют положительные заряды. Поэтому процесс коагуляции этих коллоидов улучшается при увеличении концентрации в воде поливалентных анионов, в частности SO₄²⁻, которые для положительно заряженных коллоидов являются против ионами. Повышение концентрации в воде одновалентных анионов, например Cl⁻, в значительно меньшей степени стимулируют коагуляцию. Однако в результате совместного введения сульфата железа проявляется синергетический эффект [30]. Введение около 45 мг/л пероксида водорода позволяет снизить дозу АГХ для достижения остаточной цветности 20 градусов с 20 до 10 мг/л. Введение около 17 мг/л сульфата железа (II) позволяет уменьшить остаточную цветность с 30 до 15 градусов при дозе АГХ 10 мг/л, т. е. эффект обесцвечивания увеличивается в два раза при той же дозе коагулянта.

На основании выполненных исследований разработаны технологические схемы обесцвечивания и осветления гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод коагуляцией и флотацией с предварительным

окислением пероксидом водорода в присутствии ионов Fe^{2+} (рисунки 4, 5).

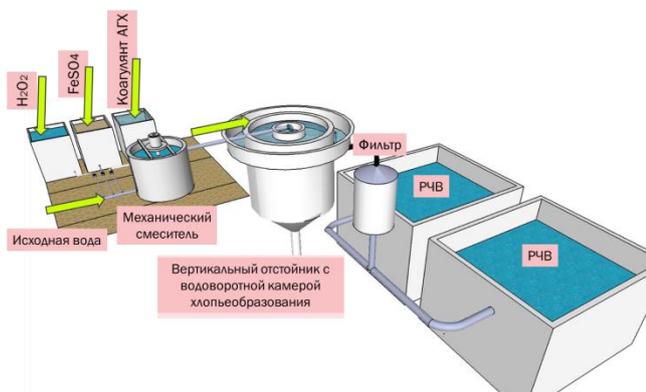


Рисунок 4 – Технологическая схема обесцвечивания и осветления гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод коагуляцией с предварительным окислением пероксидом водорода в присутствии ионов Fe^{2+}

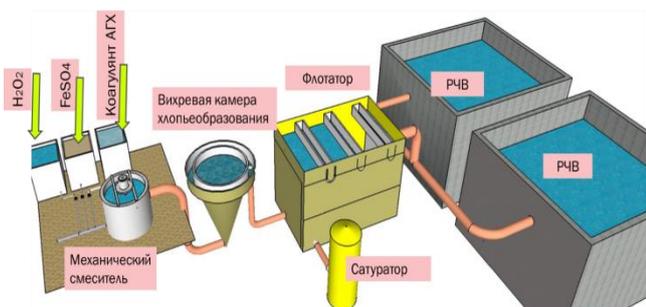


Рисунок 5 – Технологическая схема обесцвечивания и осветления гумусово-гидрокарбонатно-кальциевых вод напорной реагентной флотацией с предварительным окислением пероксидом водорода в присутствии ионов Fe^{2+} .

Заключение

1. В республике имеются достаточные запасы поверхностных вод, которые по сравнению с подземными, более доступны для использования и являются более мягкими и слабоминерализованными. Широкому их применению препятствует наличие в них загрязнений природного и техногенного происхождения.
2. С учетом исходного качества воды поверхностных источников и требований к технической воде рекомендовано окисление пероксидом водорода в присутствии Fe^{2+} , коагуляцию, напорную флотацию или фильтрацию в качестве основных технологических способов очистки от органических и неорганических соединений природного и антропогенного характера.
3. Обоснована возможность применения пероксида водорода для интенсификации очистки поверхностных вод улучшенной окислительной технологией для технического водоснабжения.
4. Установлено, что применение пероксида водорода позволяет интенсифицировать процесс коагуляции. Введение около 45 мг/л пероксида водорода позволяет снизить дозу АГХ для достижения остаточной цветности 20 градусов с 20 до 10 мг/л.

Список цитированных источников

1. Состояние природной среды Беларуси. Экол. бюл. 2003–2015 гг. / Под ред. В. Ф. Логинова. – Минск: Минсктиппроект, 2004–2016 г.
2. Перминова, И. Гуминовые вещества / И. Перминова // Элементы [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://elementy.ru/lib/430559>. – Дата доступа: 10.10.2010.
3. Гуминовые вещества в контексте зеленой химии / И. В. Перминова [и др.] // Зеленая химия в России. Том В. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. – С. 146–162.
4. Перминова, И. В. Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века / И. В. Перминова // Химия и жизнь. – М., 2008. – №1. – С. 143–150.

5. Fukushima, Masami. Характеристики распада гуминовых кислот в процессе фотореакции Фентона. Degradation characteristics of humic acid during photo-fenton processes / M. Fukushima, K. Tatsumi, S. Nagao // Environ. Sci. and Technol. – 2001. – V. 35, N 18. – С. 3683–3690.
6. Wang Gen-Shuh. Фоторазложение гуминовых кислот в присутствии пероксида водорода. Photodegradation of humic acids in the presence of hydrogen peroxide / G.-S. Wang, C.-H. Liao, F.-J. Wu // Chemosphere. – 2001. – V. 42, N 4. – С. 3790–387.
7. Anielak, A. M. Влияние ионов хлора на формирование хлорорганических соединений при окислении фульвокислот. Wplyw chlorkow na powstawanie substancji chloroorganicznych w procesie utleniania kwasow fulwowych / A. M. Anielak, M. Grzegorzczuk, R. Schmidt // Przem. chem. – 2008. – V. 87, N 5. – С. 404–407.
8. Оценка характеристик адсорбции и коагуляции гуминовых кислот, подвергнутых обработке с использованием передовых окислительных технологий / Uyguner Ceyda Senem, Suphandag Serif Altan, Kerc Aslihan, Bekbolet Miray // Вода и экол.: пробл. и решения. – 2007, N 1. – С. 39–51, 84–85.
9. Perchuc, M. Удаление окрашенности воды при ее подготовке. Badania skutecnosci wybranych procesow technologicznych w oczyszczaniu wody o duzej intensywnosci barwy / M. Perchuc, M. Jaroszewska // Ochr. sred. – 2007, N 3. – С. 29–33.
10. Kim, Hyun-Chul, Влияние гуминовых субстанций природных вод на формирование побочных продуктов обеззараживания при подготовке воды повышенного качества. Characterization of aquatic humic substances to DBPs formation in advanced treatment processes for conventionally treated water / H.-C. Kim, M.-J. Yu // J. Hazardous Mater. – 2007. – V. 143, N 1–2. – С. 486–493.
11. Huber Marc M. Oxidation of pharmaceuticals during ozonation and advanced oxidation processes. / M. Huber Marc, S. Canonica, G.-Y. Park, U. Von Gunten // Environ. Sci. and Technol. – 2003. – V. 37, N 5. – С. 1016–1024.
12. Очистка сточных вод от госпиталей с использованием окислительных процессов. Application of advanced oxidation process (AOP) for degradation of hazardous pharmaceuticals in hospital waste water. 27 International Exhibition-Congress on Chemical Engineering, Environmental Protection and Biotechnology, Frankfurt am Main, 19-24 May, 2003: AICHEM 2003: Abstracts of the Lecture Groups: Sensors for Water Systems, Sustainable Water Management, Contaminants in Groundwater, Wastewater and Sludge, Waste Gas, Adsorption Technology for Waste Gas, Airborne Particles, Gas Sensors, Waste Management / Turk Jochen, Ploger Jorg, Kiffmeyer Thekla K., Kabasci Stephan, Becker Bettina, Schmidt Klaus Gerhard, Kuss Heinz-Martin // Frankfurt/Main: DECHEMA, 2003. – С. 60.
13. Окисление фармацевтического препарата диклофенака УФ-облучением/пероксидом водорода и озоном. Advanced oxidation of the pharmaceutical drug diclofenac with UV/H₂O₂ and ozone. / D. Vogna, R. Marotta, A. Napolitano, R. Andreozzi, M. d'Ischia // Water Res. – 2004. – V. 38, N 2. – С. 414–422.
14. Очистка сточных вод от госпиталей с использованием окислительных процессов. Application of advanced oxidation process (AOP) for degradation of hazardous pharmaceuticals in hospital waste water. 27 International Exhibition-Congress on Chemical Engineering, Environmental Protection and Biotechnology, Frankfurt am Main, 19-24 May, 2003: AICHEM 2003: Abstracts of the Lecture Groups: Sensors for Water Systems, Sustainable Water Management, Contaminants in Groundwater, Wastewater and Sludge, Waste Gas, Adsorption Technology for Waste Gas, Airborne Particles, Gas Sensors, Waste Management / J. Turk, J. Ploger, K. Kiffmeyer Thekla, S. Kabasci, B. Becker, G. Schmidt Klaus, H.-M. Kuss // Frankfurt/Main: DECHEMA. – 2003. – С. 60.
15. Perez, M. Очистка сточных вод в процессах Фентона. Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents / M. Perez, F. Torrades, X. Domenech, J. Peral // Water Res. – 2002. – V. 36, N 11. – С. 2703–2710.
16. Удаление из сточных вод красителя кислого красного в процессе фотодеструкции. Photooxidative degradation of Acid Red 27 (AR27): modeling of reactin kinetic and influence of operational parameters / N. Daneshvar, M. Rabbani, N. Modirshahla, M.-A. Behnajady // J. Environ. Sci. and Health. A. – 2004. – V. 39, N 9. – С. 2319–2332.

17. Li, L.-z. Исследование разложения метилоранжа в воде ультразвуковой обработкой и химической окислением. *Yingyong huagong=Appl / L.-z. Li, J.-q. Li // Chem. Ind.* – 2006. – V. 35, N 6. – С. 428–430.
18. Деструкция азокрасителя в процессе фотоокисления. Enhancement of UV-assisted photo-Fenton degradation of reactive orange 4 using TiO₂-P25 nanoparticles / K. Selvam, M. Muruganandham, N. Sobana, M. Swaminathan // *Separ. and Purif. Technol.* – 2007. – V. 54, N 2. – С. 241–247.
19. Riga, A. Деструкция красителей в комбинированном процессе. Effect of system parameters and of inorganic salts on the decolorization and degradation of Procion H-exl dyes. Comparison of H₂O₂/UV, Fenton, UV/Fenton, TiO₂/UV and TiO₂/UV/H₂O₂ processes. / A. Riga, K. Soutsas, K. Ntampogliotis, V. Karayannis, G. Papapolymerou // *Desalination.* – 2007. – V. 211, N 1–3. – С. 72–86.
20. Chang, M.-C. Процесс комбинированной очистки окрашенных сточных вод. An integrated technique using zero-valent iron and UV/H₂O₂ sequential process for complete decolorization and mineralization of C. I. Acid Black 24 wastewater / M.-C. Chang, H.-Y. Shu, H.-H. Yu. // *J. Hazardous Mater.* – 2006. – V. 138, N 3. – С. 574–581.
21. Chu W. Моделирование квантовых выходов разложения гербицида 2,4-D при обработке УФ/H₂O₂. Modeling the quantum yields of herbicide 2,4-D decay in UV/H₂O₂ process / W. Chu // *Chemosphere.* – 2001. V. 44, N 5. – С. 935–941.
22. Wang, Q. Деструкция метрибазина в модифицированном процессе Фентона. Metribuzin degradation by membrane anodic Fenton treatment and its interaction with ferric ion / Q. Wang, M. Scherer Emily, T. Lemley Ann // *Environ. Sci. and Technol.* – 2004. – V. 38, N 4. – С. 1221–1227.
23. Kwan, C. Y. Фотодеструкция 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты с использованием ионов железа. Photodegradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in various iron-mediated oxidation systems / C. Y. Kwan, W. Chu // *Water Res.* – 2003. – V. 37, N 18. – С. 4405–4412.
24. Wong, C. C. Фотокаталитическая деструкция алахлора с использованием диоксида титана и пероксида водорода. The hydrogen peroxide-assisted photocatalytic degradation of alachlor in TiO₂ suspensions / C. C. Wong, W. Chu // *Environ. Sci. and Technol.* – 2003. – V. 37, N 10. – С. 2310–2316.
25. Деструкция пестицидов с применением пероксида водорода и ультрафиолетового излучения. Oxidation of MCPA and 2,4-D by UV radiation, ozone, and the combinations UV/H₂O₂ and O₃/H₂O₂. / Benitez F. Javier, L. Acero Juan, J. Real Francisco, S. Roman // *J. Environ. Sci. and Health. B.* – 2004. – V. 39, N 3. – С. 393–409.
26. Генерирование реактива Фентона в электрохимическом процессе и пример деструкции атразина. Electrochemical generation of the Fenton's reagent: application to atrazine degradation / A. Ventura, G. Jacquet, A. Bermond, V. Camel // *Water Res.* – 2002. – V. 36, N 14. – С. 3517–3522.
27. Деструкция атразина в водных средах. Wet peroxide degradation of atrazine / M. Rodriguez Eva, M. Alvarez Pedro, F. Rivas Javier, J. Beltran Fernando // *Chemosphere.* – 2004. – V. 54, N 1. – С. 71–78.
28. Деструкция линурона в водных средах с использованием реакции Фентона. Degradation of linuron in aqueous solution by the photo-Fenton reaction / H. Katsumata, S. Kaneco, T. Suzuki, K. Ohta, Y. Yobiko // *Chem. Eng. J.* – 2005. – V. 108, N 3. – С. 269–276.
29. Devipriya Suja. Фотокаталитическая деструкция пестицидов в природных водах. Photocatalytic degradation of pesticide contaminants in water / S. Devipriya, S. Yesodharan // *Sol. Energy Mater. and Sol. Cells.* – 2005. – V. 86, N 3. – С. 309–348.
30. Круглов, А. И. Перспективные методы очистки природных и сточных вод смешанными коагулянтами / А. И. Круглов, С. В. Гетманцев, А. В. Сычев // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2006. – № 8. – С. 33–38.
31. Guminovye veshchestva v kontekste zelenoj himii / I. V Perminova [i dr.] // *Zelenaya himiya v Rossii. Tom V.* – M. : Izd-vo Mosk. un-ta, 2004. – С. 146–162.
32. Perminova, I. V. Guminovye veshchestva – vyzov himikam XXI veka / I. V. Perminova // *Himiya i zhizn'.* – M., 2008. – №1. – С. 143–150.
33. Fukushima, Masami. Charakteristiki raspada guminovyh kislot v processe fotoreakcii Fentona. Degradation characteristics of humic acid during photo-fenton processes / M. Fukushima, K. Tatsumi, S. Nagao // *Environ. Sci. and Technol.* – 2001. – V. 35, N 18. – С. 3683–3690.
34. Wang Gen-Shuh. Fotorazlozhenie guminovyh kislot v prisutstvii peroksida vodoroda. Photodegradation of humic acids in the presence of hydrogen peroxide / G.-S. Wang, C.-H. Liao, F.-J. Wu // *Chemosphere.* – 2001. – V. 42, N 4. – С. 3790–387.
35. Anielak, A. M. Vliyanie ionov hlora na formirovanie hlороrganicheskikh soedinenij pri oksigenii ful'vokislot. Wplyw chlorkow na powstawanie substancji chlороrganicznych w procesie utleniaania kwasow ful'wowych / A. M. Anielak, M. Grzegorzczuk, R. Schmidt // *Przem. chem.* – 2008. – V. 87, N 5. – С. 404–407.
36. Ocenka charakteristik adsorbicii i koagulyacii guminovyh kislot, podvergnutyh obrabotke s ispol'zovaniem peredovyh oksislitel'nyh tekhnologij / Uyguner Ceyda Senem, Suphandag Serif Altan, Kerc Aslihan, Bekbolet Miray // *Voda i ekol.: probl. i resheniya.* – 2007, N 1. – С. 39–51, 84–85.
37. Perchuc, M. Uдалenie okrashennosti vody pri ee podgotovke. Bada-nia skuteczznosci wybranych procesow technologicznych w oczyszczaniu wody o duzej intensywnosci barwy / M. Perchuc, M. Jaroszewska // *Ochr. srod.* – 2007, N 3. – С. 29–33.
38. Kim, Hyun-Chul, Vliyanie guminovyh substancij prirodnyh vod na formirovanie pobocznyh produktov obezrazhivaniya pri podgotovke vody povyshennogo kachestva. Characterization of aquatic humic substances to DBPs formation in advanced treatment processes for conventionally treated water / H.-C. Kim, M.-J. Yu // *J. Hazardous Mater.* – 2007. – V. 143, N 1–2. – С. 486–493.
39. Huber Marc M. Oxidation of pharmaceuticals during ozonation and advanced oxidation processes. / M. Huber Marc, S. Canonica, G.-Y. Park, U. Von Gunten // *Environ. Sci. and Technol.* – 2003. – V. 37, N 5. – С. 1016–1024.
40. Ochistka stochnyh vod ot gospitalей s ispol'zovaniem oksislitel'nyh processov. Application of advanced oxidation process (AOP) for degradation of hazardous pharmaceuticals in hospital waste water. 27 International Exhibition-Congress on Chemical Engineering, Environmental Protection and Bio-technology, Frankfurt am Main, 19-24 May, 2003: AICHEMA 2003: Abstracts of the Lecture Groups: Sensors for Water Systems, Sustainable Water Management, Contaminants in Groundwater, Wastewater and Sludge, Waste Gas, Adsorption Technology for Waste Gas, Airborne Particles, Gas Sensors, Waste Management / Turk Jochen, Ploger Jorg, Kiffmeyer Thekla K., Kabasci Stephan, Becker Bettina, Schmidt Klaus Gerhard, Kuss Heinz-Martin // *Frankfurt/Main: DECHEMA, 2003.* – С. 60.
41. Okislenie farmaceuticheskogo preparata diklofenaka UF-oblučeniem/peroksidom vodoroda i ozonom. Advanced oxidation of the pharmaceutical drug diclofenac with UV/H₂O₂ and ozone. / D. Vogna, R. Marotta, A. Napolitano, R. Andreozzi, M. d'Ischia // *Water Res.* – 2004. – V. 38, N 2, – С. 414–422.
42. Ochistka stochnyh vod ot gospitalей s ispol'zovaniem oksilitel'nyh processov. Application of advanced oxidation process (AOP) for degradation of hazardous pharmaceuticals in hospital waste water. 27 International Exhibition-Congress on Chemical Engineering, Environmental Protection and Biotechnology, Frankfurt am Main, 19-24 May, 2003: AICHEMA 2003: Abstracts of the Lecture Groups: Sensors for Water Systems, Sustainable Water Management, Contaminants in Groundwater, Wastewater and Sludge, Waste Gas, Adsorption Technology for Waste Gas, Airborne Particles, Gas Sensors, Waste Management / J. Turk, J. Ploger, K. Kiffmeyer Thekla, S. Kabasci, B. Becker, G. Schmidt Klaus, H.-M. Kuss // *Frankfurt/Main: DECHEMA.* – 2003. – С. 60.
43. Perez, M. Oчistka stochnyh vod v processah Fentona. Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents / M. Perez, F. Torrades, X. Domenech, J. Peral // *Water Res.* – 2002. – V. 36, N 11. – С. 2703–2710.

References

1. Sostoyanie prirodnoj sredy Belarusi. Ekol. byul. 2003–2015 gg. / Pod red. V. F. Loginova. – Minsk : Minsktipproekt, 2004–2016 g.
2. Perminova, I. Guminovye veshchestva / I. Perminova // *Elementy [Elektronnyj resurs].* – 2008. – Rezhim dostupa: <http://elementy.ru/lib/430559>. – Data dostupa: 10.10.2010.

16. Udalenie iz stochnyh vod krasitelya kislogo krasnogo v pro-cesse fotodestrukcii. Photooxidative degradation of Acid Red 27 (AR27): modeling of reaction kinetic and influence of operational parameters / N. Daneshvar, M. Rabbani, N. Modirshahla, M.-A. Behnajady // J. Environ. Sci. and Health. A. – 2004. – V. 39, N 9. – С. 2319–2332.
17. Li, L.-z. Issledovanie razlozheniya metiloranžha v vode ul'trazvukovoj obrabotkoj i himicheskoj oksisleniem. Yingyong huagong=Appl / L.-z. Li, J.-q. Li // Chem. Ind. – 2006. – V. 35, N 6. – С. 428–430.
18. Destrukciya azokrasitelya v processe fotookisleniya. Enhancement of UV-assisted photo-Fenton degradation of reactive orange 4 using TiO₂-P25 nanoparticles / K. Selvam, M. Muruganandham, N. Sobana, M. Swaminathan // Separ. and Purif. Technol. – 2007. – V. 54, N 2. – С. 241–247.
19. Riga, A. Destrukciya krasitelej v kombinirovannom processe. Effect of system parameters and of inorganic salts on the decolorization and degradation of Procion H-exl dyes. Comparison of H₂O₂/UV, Fenton, UV/Fenton, TiO₂/UV and TiO₂/UV/H₂O₂ processes. / A. Riga, K. Soutsas, K. Ntampeglitis, V. Karayannis, G. Papapolymerou // Desalination. – 2007. – V. 211, N 1–3. – С. 72–86.
20. Chang, M.-C. Process kombinirovannoj oчитki okrashennyh stochnyh vod. An integrated technique using zero-valent iron and UV/H₂O₂ sequential process for complete decolorization and mineralization of C. I. Acid Black 24 wastewater / M.-C. Chang, H.-Y. Shu, H.-H. Yu. // J. Hazardous Mater. – 2006. – V. 138, N 3. – С. 574–581.
21. Chu W. Modelirovanie kvantovyh vyhodov razlozheniya gerbicide 2,4-D pri obrabotke UF/H₂O₂. Modeling the quantum yields of herbicide 2,4-D decay in UV/H₂O₂ process / W. Chu // Chemosphere. – 2001. V. 44, N 5. – С. 935-941.
22. Wang, Q. Destrukciya metribazina v modifitsirovannom processe Fentona. Metribuzin degradation by membrane anodic Fenton treatment and its interaction with ferric ion / Q. Wang, M. Scherer Emily, T. Lemley Ann // Environ. Sci. and Technol. – 2004. – V. 38, N 4. – С. 1221–1227.
23. Kwan, C. Y. Fotodestrukciya 2,4-dihlorfenoksiusnoj kisloty s ispol'zovaniem ionov zheleza. Photodegradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in various iron-mediated oxidation systems / C. Y. Kwan, W. Chu // Water Res. – 2003. – V. 37, N 18. – С. 4405–4412.
24. Wong, C. C. Fotokataliticheskaya destrukciya alahloro s ispol'zovaniem dioksida titana i peroksida vodoroda. The hydrogen peroxide-assisted photocatalytic degradation of alachlor in TiO₂ suspensions / C. C. Wong, W. Chu // Environ. Sci. and Technol. – 2003. – V. 37, N 10. – С. 2310–2316.
25. Destrukciya pesticidov s primeneniem peroksida vodoroda i ul'trafiol'etovogo izlucheniya. Oxidation of MCPA and 2,4-D by UV radiation, ozone, and the combinations UV/H₂O₂ and O₃/H₂O₂. / Benitez F. Javier, L. Acero Juan, J. Real Francisco, S. Roman // J. Environ. Sci. and Health. B. – 2004. – V. 39, N 3. – С. 393–409.
26. Generirovanie reaktiva Fentona v elektrohimicheskom processe i primer destrukcii atrazina. Electrochemical generation of the Fenton's reagent: application to atrazine degradation / A. Ventura, G. Jacquet, A. Bermond, V. Camel // Water Res. – 2002. – V. 36, N 14. – С. 3517–3522.
27. Destrukciya atrazina v vodnyh sredah. Wet peroxide degradation of atrazine / M. Rodriguez Eva, M. Alvarez Pedro, F. Rivas Javier, J. Beltran Fernando // Chemosphere. – 2004. – V. 54, N 1. – С. 71–78.
28. Destrukciya linurona v vodnyh sredah s ispol'zovaniem reakcii Fentona. Degradation of linuron in aqueous solution by the photo-Fenton reaction / H. Katsumata, S. Kaneco, T. Suzuki, K. Ohta, Y. Yobiko // Chem. Eng. J. – 2005. – V. 108, N 3. – С. 269-276.
29. Devipriya Suja. Fotokataliticheskaya destrukciya pesticidov v prirodnyh vodah. Photocatalytic degradation of pesticide contaminants in water / S. Devipriya, S. Yesodharan // Sol. Energy Mater. and Sol. Cells. – 2005. – V. 86, N 3. – С. 309–348.
30. Kruglov, A. I. Perspektivnye metody oчитki prirodnyh i stochnyh vod smeshannymi koagulyantami / A. I. Kruglov, S. V. Getmancev, A. V. Sychev // Vodospabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2006. – № 8. – С. 33–38.

Материал поступил в редакцию 26.01.2022

ТЕХНОЛОГИЯ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ КАДМИЯ, СВИНЦА И МЕДИ ГРАНУЛИРОВАННЫМ ТОРФОМ

Б. Н. Житенёв¹, А. Д. Гуринович², Д. Д. Сенчук³

¹ К. т. н., профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: gitenev@tut.by

² Д. т. н., профессор кафедры водоснабжения и канализации

Белостокского технического университета, Белосток, Польша, e-mail: a.giurinovwicz@pd.edu.pl

³ Магистр технических наук, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: senchuk.d.d@mail.ru

Реферат

Рассмотрены вопросы загрязнения пресных водоемов производственными сточными водами содержащими ионы кадмия Cd^{+2} , свинца Pb^{+2} и меди Cu^{+2} , на основании проведенных исследований установлено: эффективность сорбции снижается с увеличением крупности зерен брикетированного торфа. Наиболее эффективно процесс сорбции ионов брикетированным торфом протекает в течении 5 минут контакта, затем он замедляется. В течении 5 минут удаляется до 91 % ионов Cd^{+2} , 98 % ионов Pb^{+2} , 90 % ионов меди Cu^{+2} , сорбционная емкость при насыщении составила: по Cd^{+2} – 0,0778 ммоль/г (8,75 мг/г), по Pb^{+2} – 0,8205 ммоль/г (170,00 мг/г), по Cu^{+2} – 2,707 ммоль/г (172 мг/г). Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности использования брикетированного торфа в качестве эффективного сорбента для очистки сточных. На основании проведенных исследований разработана технология очистки воды от ионов кадмия, свинца, меди.

Ключевые слова: очистка производственных сточных вод, ионы Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} , сорбция, гранулированный торф, фильтр.

TECHNOLOGY OF SORPTION PURIFICATION OF WASTE WATER FROM CADMIUM IONS, LEAD AND COPPER WITH GRANULATED PEAT

B. N. Zhytsianiou, A. D. Hurynovich, D. D. Sianchuk

Abstract

The issues of pollution of fresh water bodies with industrial wastewater containing cadmium ions Cd^{+2} , lead Pb^{+2} and copper Cu^{+2} are considered, on the basis of the studies it has been established: the sorption efficiency decreases with an increase in the grain size of briquetted peat; The most efficient process of sorption of ions by briquetted peat proceeds within 5 minutes of contact, then it slows down. Within 5 minutes, up to 91% of Cd^{+2} ions, 98% of Pb^{+2} ions, 90% of copper ions Cu^{+2} are removed, the sorption capacity at saturation was: for Cd^{+2} - 0.0778 mMol / g (8.75 mg / g), for Pb^{+2} - 0.8205 mMol / g (170.00 mg / g), for Cu^{+2} - 2.707 mMol / g (172 mg / g). The obtained research results indicate the possibility of using briquetted peat as an effective sorbent for wastewater treatment. On the basis of the research carried out, a technology has been developed for water purification from cadmium, lead, and copper ions.

Keywords: industrial wastewater treatment, ions Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} , sorption, granular peat, filter.

Введение

В настоящее время ведутся активные исследования по методам очистки сточных вод от таких токсичных металлов, как кадмий, свинец, медь и др. Соединения кадмия в воде считаются высокотоксичными веществами. Им присвоен 2 класс опасности. При попадании в организм человека кадмий связывает серосодержащие аминокислоты и ферменты. Его растворимые соединения при проникновении в кровь оказывают влияние на ЦНС, почки и печень, нарушают обмен кальция. Хроническое отравление кадмием приводит к разрушению костной ткани и малокровию. Большая часть соединений этого металла рассеяна в сульфидах цинка, меди и ртути. Минерал с наиболее высоким содержанием кадмия (от 0,3 до 5 %) – сфалерит, или цинковая обманка. Сфалерит, медные и полиметаллические руды – основной природный источник кадмия в воде. Его растворимые соединения попадают в подземные и поверхностные воды в результате выщелачивания горных пород и разложения тканей живых организмов. Грибы, некоторые виды бактерий, морские животные и растения способны накапливать кадмий в больших количествах.

Загрязнение питьевой воды кадмием наносит непоправимый вред всей экосистеме. Элемент относится к кумулятивным ядам, то есть имеет свойство накапливаться в организме. Период его полувыведения составляет 13–40 лет. Скорость выведения снижается при недостатке кальция, железа, селена и цинка [1].

Свинец – один из важнейших видов минерального сырья и в то же время – глобальный загрязнитель окружающей среды. В природе самородный металл встречается редко, однако содержится в большом количестве минеральных отложений и руд. В естественные водоёмы соединения свинца попадают с атмосферными осадками, из-за вымывания пород и почв. Но самый большой вклад в загрязнение водных источников вносит деятельность человека. Огромное

количество свинца поступает в воду со стоками промышленных и горно-обогатительных предприятий. Использование тетраэтилсвинца в автомобильном топливе, бытовые отходы, сжигание угля – также одни из самых распространённых способов попадания тяжёлых металлов в грунтовые и открытые воды. Нередки случаи присутствия свинца в централизованном водоснабжении. Во многих домах старого образца ещё остались свинцовые трубы или элементы трубопровода, частицы которых в процессе коррозии их поверхности попадают прямо в квартиры. По требованиям СанПиН концентрация соединений свинца в питьевой воде не должна превышать 0,03 мг/л. Однако это вещество крайне токсично и имеет свойство накапливаться в организме, что при регулярном употреблении даже микроскопических доз способно вызывать тяжёлые отравления как в острой, так и в хронической формах [2].

Методы очистки

Для извлечения из водных растворов кадмия, меди, никеля, цинка [3] использовался композиционный сорбент. Приготовление проводилось по методике, сутью которой являлось образование в порах катионита Dowex Marathon C в Na-форме (аналог универсального катионита КУ-2х8) сорбционно активной фазы гидроксида железа. Тем самым достигалось создание высокоразвитой поверхности сорбента. В качестве исходных для сорбции служили 0,01 н. растворы $CuSO_4$, $NiSO_4$, $CdSO_4$, $ZnSO_4$. По возрастанию сорбируемости в растворах с pH 5,4–5,7 металлы расположены в ряд: Cd, Zn, Ni, Cu. В [4] отмечается, что методы сорбции тяжелых металлов на ионообменных смолах широко используются в технологиях водоподготовки. В [5] констатируется, что кадмий находит применение в различных изделиях, например, он используется в производстве аккумуляторов и в различных технологиях, при этом образуются хлорсодержащие системы, в состав которых входит также

кадмий, в приводимом примере это $CdCl_2$, данные комплексы отличаются высокой стойкостью. Предлагается экстрагировать из этих систем кадмий с использованием гидрофобных никотинамидов, в данном случае это N,N-дигексилпиридин-3-карбоксамид (I). В приводимом примере содержание (I) составляло 1-50 ммоль и HCl 0,1-2,5 моль, в оптимальном варианте содержание Cd^{2+} в органической фазе достигало 640 мг/моль. В работе [6] предлагается метод осаждения кадмия, железа, урана, меди, хрома, никеля, цинка, кобальта, который состоит в том, что в воду дозируют органическое соединение никотинамидадениндинуклеотид в качестве донора электронов, при его участии сульфатредуцирующие бактерии восстанавливают сульфаты до сульфидов, далее в последовательности реакций происходит образование нерастворимых сульфидов металлов, например, это CdS. Сообщается об успешном применении метода. В лабораторных условиях [7] исследовалась возможность удаления из донных отложений (ДО) тяжелых металлов методом электролиза. Реальные ДО содержали медь, цинк, свинец и кадмий в концентрациях 634, 1192, 478 и 16,6 мг/кг сухой массы. В оптимальном варианте эффективность удаления по этим компонентам составила 88, 98, 94 и 99 % соответственно. В ходе экспериментов [8] исследовалась возможность сорбционного удаления ТМ (свинец 3,8-4,9 мг/л, кадмий 5,0-5,3 мг/л, цинк 47,5-49,1 мг/л, железо до 600 мг/л и кальций до 448 мг/л) из дренажных шахтных вод с использованием природных цеолитов (ЦЛ), обладавших ионообменными свойствами, этот выбор обусловлен в том числе устойчивостью ЦЛ в кислых средах, их разрушение наблюдается только при pH ниже 2. В лабораторных экспериментах при pH 2,24 и дозе ЦЛ 20 г/л (гранулят 1-2,5 мм) свинец удалялся полностью, с наименьшей эффективностью удалялось железо, присутствие ионов кальция ингибировало процессы сорбции ТМ. В [9] приведены результаты лабораторных экспериментов по удалению из СВ ионов кадмия путем перевода их в форму оксалата кадмия в ходе воздействия на модельные СВ щавелевой кислотой. Сообщается, что оксалат кадмия обладает чрезвычайно низкой растворимостью, в экспериментах содержание Cd^{2+} в СВ составляло 5-6 г/л, при дозе щавелевой кислоты, в 2 раза превышающей концентрацию насыщения, кадмий удалялся с эффективностью более 99 % при pH не ниже 4,5. В работе [10] сообщается, что при производстве сахара с использованием в качестве сырья сахарной свеклы на стадии варки пульпы выделялись СВ, содержавшие галактуроновую кислоту 20 %, соединения, включавшие карбоновые группы 0,466 мг/л, также тяжелые металлы. Для первичной обработки этих СВ применялся дешевый сорбент, изготовленный из отходов от производства сахара, основной целью являлось удаление тяжелых металлов. Установлено, что при сорбции тяжелых металлов их сорбство к сорбенту уменьшалось в следующем порядке: Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , для приведенного порядка металлов сорбционная емкость сорбента изменялась от 0,202 до 0,356 ммоль/г. СВ с сорбентами находились в реакторе 1 л, включенном в контур циркуляции с мембраной для микрофльтрации, тяжелые металлы удалялись с эффективностью не ниже 90 %, кадмий и свинец на 100 % в течение 10 ч. Для удаления тяжелых металлов чаще всего применяются сорбенты, коммерческие марки которых имеют весьма высокую стоимость. В лабораторных экспериментах в качестве альтернативных сорбентов применялась зола от сжигания древесины (ЗД) и известь. Модельными ТМ являлись Cd, Cu, Pb и Zn в концентрациях от 25 до 1500 мг/л. Установлено, что ЗД как сорбент более эффективна, чем известь, с ее применением наиболее эффективно удаляется свинец (сорбционная емкость 101 мг Pb/г ЗД), затем следуют медь (6,92 мг/г), кадмий (5,03 мг/г) и цинк (4,12 мг/г). При дозе ЗД 20 г/л и содержании ТМ 100 мг/л эффективность их удаления составляла от 92 до 100 % [11]. В исследованиях [12] указывается, что при обработке осадков и СВ, содержащих тяжелые металлы, достаточно широко используются методы биосорбции, при которых удаление тяжелых металлов осуществляется аккумуляцией биомассой растений, при этом известны виды растений, способных к так называемой гипераккумуляции. Проблемой при этом является накопление биомассы, загрязненной тяжелыми металлами, в лабораторных экспериментах исследовалась возможность сжигания массы растений с переводом металлов в золу. Использовались растения 4 видов, определен вид, обладающий наибольшей эффективностью, при этом зола от его сжигания содержала цинк 9326 мг/кг сухой массы, свинец 18 мг/кг, кадмий 224 мг/кг и т. д.

Таким образом, исследования по удалению из сточных вод таких токсичных металлов, как кадмий, свинец, медь и др., ведутся

в следующих направлениях: разработка новых композиционных сорбентов, совершенствовании ионообменной очистки, осаждение, например, в виде сульфидов или оксалатов, сорбция золой от сжигания древесины, биосорбция растениями [3-12]. В работах [13-31] приведены результаты исследований по очистке сточных вод от ионов тяжелых металлов путем использования модификаций природного торфа.

Обзор литературных данных позволяет сделать вывод о том, что разработка усовершенствованных технологий сорбционной очистки сточных вод с использованием торфа является весьма перспективным направлением. В литературе отсутствуют достаточно полные данные об использовании брикетированного торфа в качестве сорбента таких токсичных металлов как кадмий, свинец, медь. В Республике Беларусь имеются значительные запасы торфа, масштабные производства торфобрикетов, это создает реальные предпосылки для выпуска дешевых, экологически безопасных сорбентов на основе модифицированного брикетированного торфа. Настоящая работа посвящена разработке технологии очистки производственных сточных вод ионов кадмия, свинца и меди гранулированным брикетированным торфом.

Экспериментальная часть

Материалы и методы исследований

В процессе исследований использовались физико-химические, технологические, математические методы. Эксперименты производились с использованием торфобрикетов производства торфобрикетного завода "Гатча-Осовское", расположенного в Жабинковском районе Брестской области. Брикет механическим способом гранулировали, затем рассеивали через набор сит калибром 1,00-2,00-3,25-3,75-4,50-5,50 мм. В результате были получены образцы крупностью < 1 мм, 1,00-2,00 мм, 2,00-3,25 мм, 3,25-3,75 мм, 3,75-4,50 мм, 4,50-5,50 мм. Исследовалось сорбция ионов кадмия Cd^{2+} , свинца Pb^{2+} , меди Cu^{2+} . В стакан помещали 100 мл раствора и добавляли 10 г гранул торфа. Затем суспензию перемешивали с помощью механических мешалок в течении 3, 5, 10, 20, 40, 60 минут. Растворы фильтровали через бумажный фильтр и определяли остаточное содержание ионов кадмия Cd^{2+} , свинца Pb^{2+} , меди Cu^{2+} . Анализ пробы модельного раствора на содержание Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} выполняли с помощью анализатора вольтамперометрического АВА-3 (рисунок 1). На рисунке 2 приведен пример анодных вольтамперных кривых, зарегистрированных на индикаторном электроде при анализе пробы модельного раствора на содержание Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} .

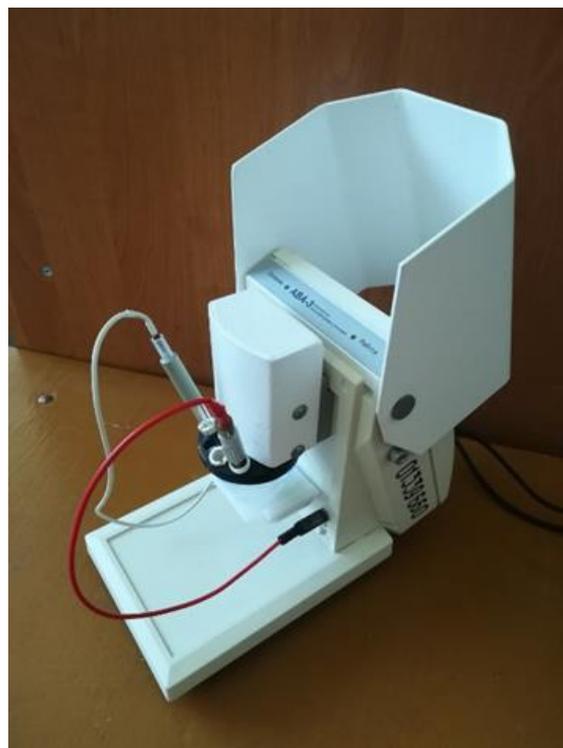
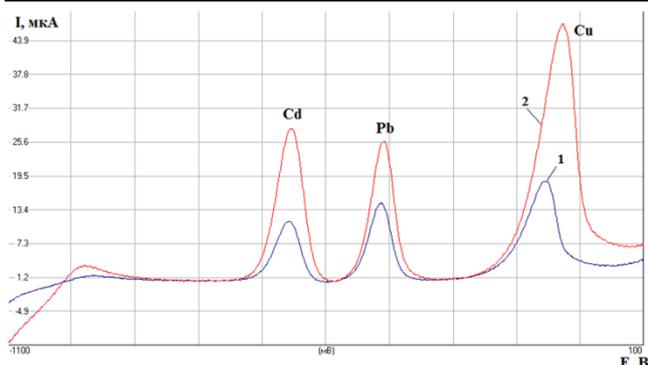


Рисунок 1 – Анализатор вольтамперометрический АВА-3



1 – пробы модельного раствора и фонового электролита (фон хлоридный), 2 – пробы модельного раствора с добавкой стандартного раствора, содержащего 2мг/дм³ Cd+2, Pb+2, Cu+2 и фонового электролита

Рисунок 2 – Анодные вольтамперные кривые разности

Результаты и их обсуждение

Эффект очистки воды от ионов Cd²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ рассчитывался по формуле:

$$\Xi = ((C_1 - C_2) / C_1) \cdot 100, \% \quad (1)$$

где C₁, C₂ – соответственно массовая концентрация ионов до и после опыта.

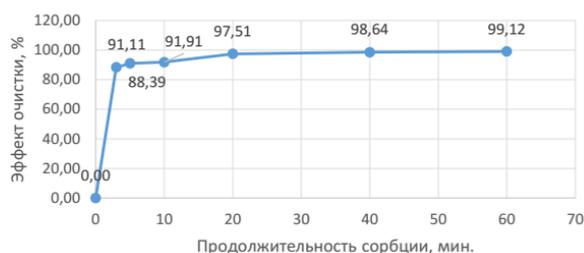


Рисунок 3 – Зависимость эффекта сорбции ионов Cd²⁺ от продолжительности контакта, мин



Рисунок 4 – Зависимость эффекта сорбции ионов Pb²⁺ от продолжительности контакта

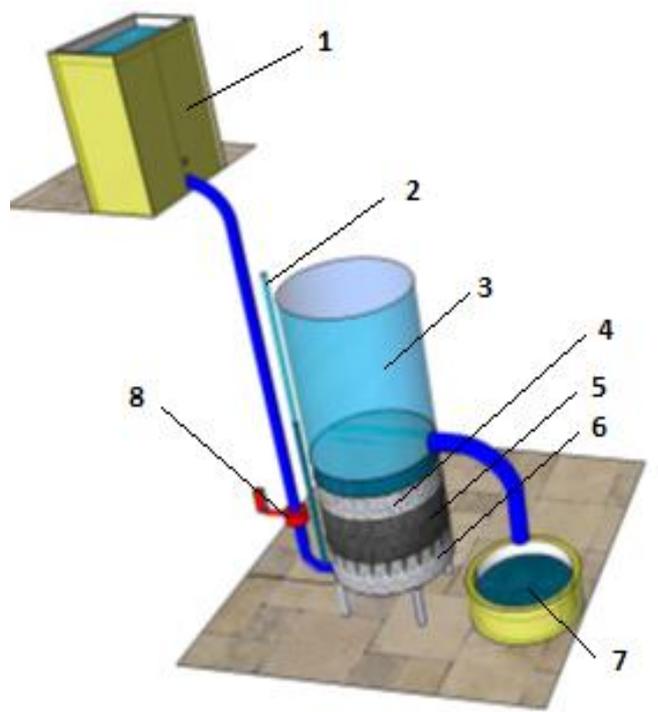


Рисунок 5 – Зависимость эффекта сорбции ионов Cu²⁺ от продолжительности контакта

Наиболее эффективно процесс сорбции ионов брикетированным торфом протекает в течении 5 минут контакта, затем он замедляется. В течении 5 минут удаляется до 91 % ионов Cd²⁺, 98 % ионов Pb²⁺, 90 % ионов меди Cu²⁺ (рис. 3, 4, 5) [31]. Исследования сорбции ионов в процессе динамического фильтрования выполнялись на установке, состоящей из емкости с имитатором сточной воды, пьезометра, фильтровальной колонки, верхнего слоя щебня, гранул торфобрикета, нижний слой гравия, приемной емкости, крана для регулировки расхода (рисунки 6, 7).

Имитатор сточной воды готовился на водопроводной воде путем добавления солей. Содержаний ионов определялось с помощью анализатора АВА-3. Скорость фильтрования (время пребывания) имитатора в загрузке фильтра регулировалось краном. Для измерения потерь напора в загрузке использовался пьезометр. На основании проведенных исследований разработана технология очистки воды от ионов кадмия, свинца, меди, включающая следующие операции (рисунок 8):

1. Грануляция торфобрикетов:
 - измельчение в молотковой дробилке;
 - рассевание на фракции во вращающихся барабанных ситах.
2. Подготовка фильтрующих кассет:
 - загрузка гранул в кассеты (фильтрующие мешки, помещенные в сетчатые цилиндры);
 - замачивание кассет.
3. Загрузка кассет в фильтры.
4. Фильтр-цикл до достижения в фильтрате ПДК, установленной для извлекаемого иона.
5. Извлечение кассет из фильтров, транспортировка на площадки для подсушивания.
6. Сжигание торфа (способ сжигания должен исключать улетучивание извлеченных загрязнений).
7. Утилизация золы с извлечением металлов.



1 – емкость с имитатором сточной воды; 2 – пьезометр; 3 – фильтровальная колонка; 4 – верхний слой щебня; 5 – гранулы торфобрикета; 6 – нижний слой гравия; 7 – приемная емкость; 8 – кран для регулировки расхода

Рисунок 6 – Схема установки для исследования сорбционной емкости брикетированного торфа в динамических условиях



Рисунок 7 – Общий вид установки для исследования сорбционной емкости брикетированного торфа в динамических условиях

Заключение

Проведенные исследования процессов сорбции брикетированным торфом ионов кадмия Cd^{+2} , свинца Pb^{+2} и меди Cu^{+2} позволили установить следующее:

1. Эффективность сорбции снижается с увеличением крупности зерен брикетированного торфа.
2. Сорбционная емкость при насыщении составляет:
 - по Cd^{+2} – 0,0778 мМоль/г (8,75 мг/г);
 - по Pb^{+2} – 0,8205 мМоль/г (170,00 мг/г);
 - по Cu^{+2} – 2,707 мМоль/г (172 мг/г).
3. Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности использования брикетированного торфа в качестве эффективного сорбента для очистки сточных вод от ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} и Cu^{+2} .
4. На основании проведенных исследований разработана технология очистки воды от ионов кадмия, свинца, меди гранулами из брикетированного торфа.

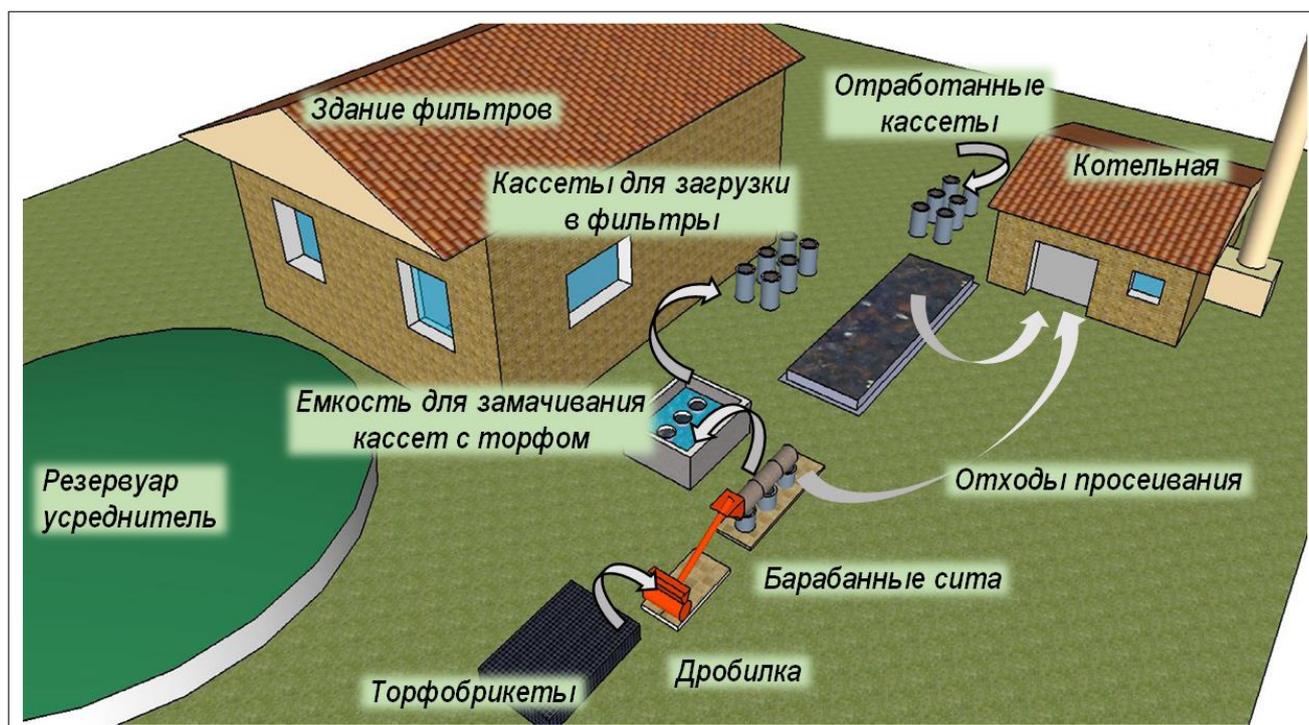


Рисунок 8 – Технология очистки воды от ионов кадмия, свинца, меди гранулами из брикетированного торфа

Список цитированных источников

1. <https://fb.ru/article/272329/kadmiy-vliyanie-na-organizm-cheloveka-otравlenie-tyajelyimi-metallami>, дата доступа 16.04.2020.
2. info@kr-company.ru, дата доступа 14.04.2021
3. Использование композиционного сорбента для извлечения из водных растворов меди, никеля, цинка, кадмия / В. Ф. Марков [и др.] // Экологические проблемы промышленных регионов: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 2006. – Екатеринбург: АМБ, 2006. – С. 224.
4. Silva, D. L. Десорбция тяжелых металлов из ионообменной смолы с использованием воды и диоксида углерода. Desorption of heavy metals from ion exchange resin with water and carbon dioxide / D. L. Silva, G. Brunner // Braz. J. Chem. Eng. – 2006. – V. 23, N 2. – С. 213–218.
5. M. Tomaszewska, A. Jeschke, A. Borowiak-Resterna, R. Cierpiszewski, K. Prochaska. Экстракция Cd(II) из хлорсодержащих систем с использованием гидрофобных никотинамидов. Studies on the rate of extraction of Cd(II) from chlorides systems with hydrophobic nicotinamide derivatives / M. Tomaszewska // Przem. chem. – 2006. – V. 85, N 8–9. – С. 668–670.
6. Удаление из воды тяжелых металлов / In situ immobilization of metals within density variant bodies of water. – Пат. 7011756 США, МПК⁸ C 02 F 1/62, C 02 F 3/28. Harrington Joseph G. N 10/398703; Заявл. 03.10.2001; Оpubл. 14.03.2006; НПК 210/603. Англ.
7. Удаление тяжелых металлов из донных отложений. Electrolytic removal of Cu, Zn, Pb, and Cd from harbor sediment: influence of changing experimental conditions // Environ. Sci. and Technol. – 2005. – V. 39, N 8. – С. 2906–2911.
8. Gavris, G. Процесс очистки сточных вод с удалением ионов кадмия. Study of the cleaning process with cadmium ions from residual waters / G. Gavris, G. Burtica, A. Iovi // Bul. sti. Univ. "Politehn." Timisoara. Ser. Chim. si ing. med. – 2005. – V. 50, N 1–2. – С. 163–165.
9. Gavris, G. Процесс очистки сточных вод с удалением ионов кадмия. Study of the cleaning process with cadmium ions from residual waters / G. Gavris, G. Burtica, A. Iovi // Bul. sti. Univ. "Politehn." Timisoara. Ser. Chim. si ing. med. – 2005. – V. 50, N 1–2. – С. 163–165.
10. Reddad, Z. Очистка сточных вод от производства сахара. Valorisation d'un sous-produit de l'industrie sucriere: mise en uvre dans un procede de traitement d'eaux usees industrielles / Z. Reddad, C. Gerente, Y. Andres, P. Le Cloirec // Dechets: sci. et techn. – 2005, N 39, С. 9–14.
11. Chirenje, T. Удаление из сточных вод кадмия, меди, свинца и цинка. Retention of Cd, Cu, Pb and Zn by wool ash, lime and fume dust / T. Chirenje, Q. Ma Lena, L. Lu // Water, Air, and Soil Pollut. – 2006. – V. 171, N 1–4. С. 301–314.
12. Лиштван, И. И. Очистка сточных вод от металлов-экотоксикантов торфяными препаратами / И. И. Лиштван [и др.] // Химия и технол. воды. – 2007. – V. 29, N 1. – С. 67–74.
13. Богуш, А. А. Применение природных материалов для очистки техногенных вод / А. А. Богуш [и др.] // Экол. пром. пр-ва. – 2007, N 2. – С. 63–69.
14. Богуш, А. А. Применение торфо-гуминовых веществ для снижения техногенного влияния отходов на окружающую среду / А. А. Богуш, А. Н. Трофимов // Хим. пром-сть. – 2005. – V. 82, N 3, – С. 153–158.
15. Арканова, И. А. Новые фильтрующие материалы для очистки природных вод / И. А. Арканова, Д. М. Китаев, Ю. Д. Луценко // Материалы 46 Международной научно-технической конференции "Достижения науки - агропромышленному производству", Челябинск, 2007. Челябинск: Челяб. гос. агроинж. ун-т, 2007. – Ч. 3. – С. 164–169.
16. Ulmanu, M. Удаление хрома(VI), кадмия и свинца из водных растворов сорбцией торфом. Batch chromium(VI), cadmium(II) and lead(II) removal from aqueous solutions by horticultural peat / M. Ulmanu, I. Anger, Y. Fernandez, L. Castrillon, E. Maranon // Water, Air, and Soil Pollut. – 2008. – V. 194, N 1–4. – С. 209–216.
17. Косов, В. И. Сорбционно-фильтровальная нагрузка для очистки воды и способ ее производства / В. И. Косов, Э. В. Баженова. – Пат. 2174439 Россия, МПК⁷ В 01J 20/28, 20/24, 20/30. Твер. гос. техн. ун-т. N 2000116957/12; Заявл. 26.06.2000; Оpubл. 10.10.2001.
18. Косов, В. И. Исследования сорбентов на природной основе для очистки промстоков от цинка / В. И. Косов, Э. В. Баженова // Международная научно-практическая конференция "Проблемы инженерного обеспечения и экологии городов, Пенза, дек., 1999: Сборник материалов. – Пенза: Приволж. дома знаний, 1999. – С. 130–133.
19. Косов, В. И. Очистка промстоков от ионов цинка с применением гранулированного торфа / В. И. Косов, Э. В. Баженова, Ф. Ф. Чаусов // Хим. и нефтегаз. машиностр. – 2001, N 7. – С. 38–40.
20. Янг-Тсе Ханг, Ло Говард Г. Очистка сточных вод производства по переработке картофеля с использованием адсорбции торфом и глиной и биопрепаратов / Янг-Тсе Ханг, Ло Говард Г. // Исследование проблем водоснабжения, водоотведения и подготовки специалистов: Межвузовский сборник научных трудов. Казан. гос. архит.-строит. акад. – Казань: Изд-во КГАСА, 1999. – С. 129–132.
21. Способ приготовления сорбента для очистки сточных вод / Method of processing peat for use in contaminated water treatment. Пат. 6429171 США, МПК⁷ В 01 J 20/22. Environmental Filtration, Inc., Clemenson Lyle J. N 09/514197; Заявл. 25.02.2000; Оpubл. 06.08.2002; НПК 502/404. Англ. US
22. Sun Qing-ye. Удаление хрома из водных растворов модифицированным торфом / Sun Qing-ye, Yang Lin-zhang // Chengshi huanjing yu chengshi shengtai=Urban Environ. and Urban Ecol. 2002. – V.15, N 3. – С. 5–8
23. Баженова, Э. В. Экспериментальное обоснование способов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов торфяными модификациями: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Э. В. Баженова; Твер. гос. техн. ун-т. – Тверь, 2002. – 22 с.
24. Перспективы использования торфа для решения комплексной проблемы охраны окружающей среды. Физика и химия торфа в решении проблем экологии: Тезисы докладов Международного симпозиума, Минск, 3–7 нояб., 2002 / А. Томсон [и др.]. – Минск: Тонлик, 2002. – С. 158–160.
25. зованием природных материалов и отходов производства / Е. И. Вялкова, А. А. Большаков // Актуальные проблемы современного строительства: сборник научных трудов 32 Всероссийской научно-технической конференции, Пенза, 25–27 марта, 2003. – Пенза: Изд-во ПГАСА, 2003. – Ч. 1 : Строительные материалы и изделия. – С. 194–198.
26. Ma, W. Удаление из сточных вод тяжелых металлов методом биосорбции. Development of multimetal binding model and application to binary metal biosorption onto peat biomass / W. Ma, J. M. Tobin // Water Res. – 2003. – V. 37, N 16. – С. 3967–3977.
27. Ho Y. S., McKay G. Сорбция Cu(2+) из водных растворов торфом. Sorption of copper (II) from aqueous solution by peat. Water, Air, and Soil Pollut. 2004. 158, N 1–4, с. 77–97. Библ. 62. Англ. NL. ISSN 0049-6979
28. Sun, Q. Y. Адсорбция свинца и меди из водных растворов модифицированным торфом. The adsorption of lead and copper from aqueous solution on modified peat-resin particles / Q. Y. Sun, P. Lu, L. Z. Yang // Environ. Geochem. and Health. – 2004. – V. 26, N 2. – С. 311–317.
29. Дремичева, Е. С. Изучение кинетики сорбции на торфе ионов железа(III) и меди(II) из сточных вод / Е. С. Дремичева // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. – 2017. – Т. 58. – № 4.
30. Житенёв, Б. Н. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Б. Н. Житенёв, Д. Д. Сенчук // Вестник БрГТУ. – 2019. – № 2 (104) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. – С. 61–65.
31. Житенев, Б. Н. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди / Б. Н. Житенев, А. Д. Гуринович, Д. Д. Сенчук // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, Вып. 11. – С. 1534–1545.

References

1. <https://fb.ru/article/272329/kadmiy-vliyanie-na-organizm-cheloveka-otравlenie-tyajelyimi-metallami>, data dostupa 16.04.2020.
2. info@kr-company.ru, data dostupa 14.04.2021
3. Ispol'zovanie kompozitsionnogo sorbenta dlya izvlecheniya iz vodnyh rastvorov medi, nikelya, cinka, kadmiya / V. F. Markov [i dr.] // Ekologicheskie problemy promyshlennyh regionov: materialy VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferen-cii, Ekaterinburg, 2006. – Ekaterinburg: AMB, 2006. – S. 224.

4. Silva, D. L. Desorbciya tyazhelyh metallov iz ionoobmennoj smoly s ispol'zovaniem vody i dioksida ugleroda. Desorption of heavy metals from ion exchange resin with water and carbon dioxide / D. L. Silva, G. Brunner // Braz. J. Chem. Eng. – 2006. – V. 23, N 2. – С. 213–218.
5. M. Tomaszewska, A. Jeschke, A. Borowiak-Resterna, R. Cierpiszewski, K. Prochaska. Ekstrakciya Cd(II) iz hlorsoderzhashchih sistem s ispol'zovaniem gidrofobnyh nikotinamidov. Studies on the rate of extraction of Cd(II) from chloride systems with hydrophobic nicotinamide derivatives / M. Tomaszewska // Przem. chem. – 2006. – V. 85, N 8–9. – С. 668–670.
6. Udalenie iz vody tyazhelyh metallov / In situ immobilization of metals within density variant bodies of water. – Pat. 7011756 SSHA, MPK 8 C 02 F 1/62, C 02 F 3/28. Harrington Joseph G. N 10/398703; Zayavl. 03.10.2001; Opubl. 14.03.2006; NPK 210/603. Angl.
7. Udalenie tyazhelyh metallov iz donnyh otlozhenij. Electrolytic removal of Cu, Zn, Pb, and Cd from harbor sediment: influence of changing experimental conditions // Environ. Sci. and Technol. – 2005. – V. 39, N 8. – С. 2906–2911.
8. Gavis, G. Process ochistki stochnyh vod s udalением ионов кадмия. Study of the cleaning process with cadmium ions from residual waters / G. Gavis, G. Burtica, A. Iovi // Bul. sti. Univ. "Politehn." Timisoara. Ser. Chim. si ing. med. – 2005. – V. 50, N 1–2. – С. 163–165.
9. Gavis, G. Process ochistki stochnyh vod s udalением ионов кадмия. Study of the cleaning process with cadmium ions from residual waters / G. Gavis, G. Burtica, A. Iovi // Bul. sti. Univ. "Politehn." Timisoara. Ser. Chim. si ing. med. – 2005. – V. 50, N 1–2. – С. 163–165.
10. Reddad, Z. Ochistka stochnyh vod ot proizvodstva sahara. Valorisation d'un sous-produit de l'industrie sucriere: mise en uvre dans un procede de traitement d'eaux usees industrielles / Z. Reddad, C. Gerente, Y. Andres, P. Le Cloirec // Dechets: sci. et techn. – 2005, N 39, S. 9–14.
11. Chirenje, T. Udalenie iz stochnyh vod кадмия, меди, свинца и цинка. Retention of Cd, Cu, Pb and Zn by wool ash, lime and fume dust / T. Chirenje, Q. Ma Lena, L. Lu // Water, Air, and Soil Pollut. – 2006. – V. 171, N 1–4. С. 301–314.
12. Lishtvan, I. I. Ochistka stochnyh vod ot metallov-ekotoksikantov torfyanyimi preparatami / I. I. Lishtvan [i dr.] // Himiya i tekhnol. vody. – 2007. – V. 29, N 1. – С. 67–74.
13. Bogush, A. A. Primenenie prirodnyh materialov dlya ochistki tekhnogenykh vod / A. A. Bogush [i dr.] // Ekol. prom. pr-va. – 2007, N 2. – С. 63–69.
14. Bogush, A. A. Primenenie torfo-guminovyh veshchestv dlya snizheniya tekhnogenogo vliyaniya othodov na okruzhayushchuyu sredu / A. A. Bogush, A. N. Trofimov // Him. prom-st'. – 2005. – V. 82, N 3. – С. 153–158.
15. Arkanova, I. A. Novye fil'truyushchie materialy dlya ochistki prirodnyh vod / I. A. Arkanova, D. M. Kitaev, YU. D. Lucenko // Materialy 46 Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Dostizheniya nauki - agropromyshlennomu proizvodstvu", CHelyabinsk, 2007. CHelyabinsk: CHelyab. gos. agroinz. un-t, 2007. – CH. 3. – С. 164–169.
16. Ulmanu, M. Udalenie hroma(VI), кадмия и свинца из водных растворов сорбцией торфом. Batch chromium(VI), cadmium(II) and lead(II) removal from aqueous solutions by horticultural peat / M. Ulmanu, I. Anger, Y. Fernandez, L. Castrillon, E. Maranon // Water, Air, and Soil Pollut. – 2008. – V. 194, N 1–4. – С. 209–216.
17. Kosov, V. I. Sorbcionno-fil'troval'naya zagruzka dlya ochistki vody i sposob ee proizvodstva / V. I. Kosov, E. V. Bazhenova. – Pat. 2174439 Rossiya, MPK 7 B 01J 20/28, 20/24, 20/30. Tver. gos. tekhn. un-t. N 2000116957/12; Zayavl. 26.06.2000; Opubl. 10.10.2001.
18. Kosov, V. I. Issledovaniya sorbentov na prirodnoj osnove dlya ochistki promstokov ot цинка / V. I. Kosov, E. V. Bazhenova // Mezhdunarodnaya nauchno- prakticheskaya konferenciya "Problemy inzhenerenogo obespecheniya i ekologii gorodov, Penza, dek., 1999: Sbornik materialov. – Penza: Privolzh. doma znaniy, 1999. – С. 130–133.
19. Kosov, V. I. Ochistka promstokov ot ионов цинка s primenением гранулированного торфа / V. I. Kosov, E. V. Bazhenova*, F. F. CHausov // Him. i neftegaz. mashinostr. – 2001, N 7. – С. 38–40.
20. Yang-Tse Hang, Lo Govard G. Ochistka stochnyh vod proizvodstva po pererabotke kartofelya s ispol'zovaniem adsorbции торфом и глиной i biopreparatov / Yang-Tse Hang, Lo Govard G. // Issledovanie problem vodosnabzheniya, vodootvedeniya i podgotovki specialistov: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnyh trudov. Kazan. gos. arhit.-stroit. akad. – Kazan': Izd-vo KGASA, 1999. – С. 129–132.
21. Sposob prigotovleniya sorbenta dlya ochistki stochnyh vod / Method of processing peat for use in contaminated water treatment. Pat. 6429171 SSHA, MPK 7 B 01 J 20/22. Environmental Filtration, Inc., Clemenson Lyle J. N 09/514197; Zayavl. 25.02.2000; Opubl. 06.08.2002; NPK 502/404. Angl. US
22. Sun Qing-ye. Udalenie hroma iz vodnyh rastvorov modifitsirovannym торфом / Sun Qing-ye, Yang Lin-zhang // Chengshi huanjing yu chengshi shengtai=Urban Environ. and Urban Ecol. 2002. – V. 15, N 3. – С. 5–8
23. Bazhenova, E. V. Eksperimental'noe obosnovanie sposobov ochistki stochnyh vod ot ионов tyazhelyh metallov torfyanyimi modifikatsiyami: avtoref. dis. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk / E. V. Bazhenova; Tver. gos. tekhn. un-t. – Tver', 2002. – 22 s.
24. Perspektivy ispol'zovaniya torfa dlya resheniya kompleksnoy problemy ohrana okruzhayushchej sredy. Fizika i himiya torfa v reshenii problem ekologii: Tezisy dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma, Minsk, 3–7 noyab., 2002 / A. Tomson [i dr.]. – Minsk: Tonpik, 2002. – С. 158–160.
25. zovaniem prirodnyh materialov i othodov proizvodstva / E. I. Vyalkova, A. A. Bol'shakov // Aktual'nye problemy sovremennoy stroitel'stva: sbornik nauchnyh trudov 32 Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Penza, 25–27 marta, 2003. – Penza: Izd-vo PGASA, 2003. – CH. 1 : Stroitel'nye materialy i izdeliya. – С. 194–198.
26. Ma, W. Udalenie iz stochnyh vod tyazhelyh metallov metodom biosorbции. Development of multimetal binding model and application to binary metal biosorption onto peat biomass / W. Ma, J. M. Tobin // Water Res. – 2003. – V. 37, N 16. – С. 3967–3977.
27. Ho Y. S., McKay G. Sorbciya Cu(2+) iz vodnyh rastvorov торфом. Sorption of copper (II) from aqueous solution by peat. Water, Air, and Soil Pollut. 2004. 158, N 1–4, s. 77–97. Bibl. 62. Angl. NL. ISSN 0049-6979
28. Sun, Q. Y. Adsorbciya свинца и меди из водных растворов modifitsirovannym торфом. The adsorption of lead and copper from aqueous solution on modified peat-resin particles / Q. Y. Sun, P. Lu, L. Z. Yang // Environ. Geochem. and Health. – 2004. – V. 26, N 2. – С. 311–317.
29. Dremicheva, E. S. Izuchenie kinetiki sorbции на торфе ионов железа(III) и меди(II) из сточных вод / E. S. Dremicheva // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Himiya. – 2017. – T. 58. – № 4.
30. Zhitenyov, B. N. Issledovanie sorbcionnykh svoystv briketirovannogo torfa dlya ochistki stochnyh vod ot ионов tyazhelyh metallov / B. N. Zhitenyov, D. D. Senchuk // Vestnik BrGTU. – 2019. – № 2 (104) : Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, geoekologiya. – С. 61–65.
31. Zhitenyov, B. N. Issledovanie sorbcionnykh svoystv briketirovannogo torfa dlya ochistki stochnyh vod ot ионов кадмия, свинца и меди / B. N. Zhitenyov, A. D. Gurinovich, D. D. Senchuk // Vestnik MGSU. – 2020. – T. 15, Vyp. 11. – С. 1534–1545.

Материал поступил в редакцию 26.01.2022

КРИТЕРИИ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОЗАБОРОВ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ БЕЛАРУСИ И ТАДЖИКИСТАНА

В. Е. Левкевич¹, Ф. Н. Саидов²

¹ Д. т. н., профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения
Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: v.lev2014@mail.ru
² Магистр технических наук, аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения
Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: faromuzsaidov95@gmail.com

Реферат

В условиях водохранилищ как Беларуси, так и Таджикистана, широко используются поверхностные водозаборные сооружения. Условия эксплуатации водозаборов в Беларуси и Таджикистане отличаются в связи с различием гидродинамического режима и динамики процессов разрушения берегов и вдоль берегового перемещения наносов. В статье на основе данных натурных исследований определены критерии для рационального размещения поверхностных водозаборов с учетом гидродинамики водоема и экспериментальных зависимостей по расчету расхода наносов.

Ключевые слова: поверхностный водозабор, водохранилище, гидродинамический режим, расход наносов, зонирование.

CRITERIA FOR RATIONAL SITING OF SURFACE WATER INLETS AT RESERVOIRS OF BELARUS AND TAJIKISTAN

V. E. Levkevich, F. N. Saidov

Abstract

In the conditions of reservoirs in both Belarus and Tajikistan, surface water intake structures are widely used. The operating conditions of water intakes in Belarus and Tajikistan differ due to the difference in the hydrodynamic regime and dynamics of the processes of coastal destruction and alongshore sediment movement. In the article, on the basis of field research data, criteria for the rational placement of surface water intakes, taking into account the hydrodynamics of the reservoir and experimental dependences for calculating sediment discharge, are determined.

Keywords: surface water intake, reservoir, hydrodynamic regime, sediment discharge, zoning.

Введение

В условиях водохранилищ Беларуси и Таджикистана широко применяются поверхностные водозаборы. Использование поверхностных водозаборов позволяет обеспечивать объекты народного хозяйства водой соответствующего качества. Водохранилища предназначены и используются для различных хозяйственных целей: водоснабжения (питьевого и технического), орошения, мелиорации, гидроэнергетики, рыборазведения, транспорта и рекреации. При эксплуатации водозаборов со временем возникают проблемы, связанные с занесением приемных ковшей наносами. Часто эта проблема возникает при неправильном размещении водозабора или с нарушением нормативных требований. В статье на основе совместных данных исследований по водозаборам Беларуси и Таджикистана рассмотрены условия их эксплуатации и предложены критерии рационального размещения поверхностных водозаборов с учетом

гидрологических особенностей водохранилищ Беларуси и Таджикистана.

Общая характеристика поверхностных водозаборов Беларуси и Таджикистана

В зависимости от назначения и потребителя водных ресурсов, а также условий водоотбора, могут использоваться поверхностные водозаборы совмещенного или раздельного типов. В Беларуси и Таджикистане в равнинных условиях применяются поверхностные водозаборы совмещенного и раздельного типа, а в предгорных и горных условиях преимущественно башенного раздельного типа (рисунок 1).

Схема расположения поверхностных водозаборов в бассейне р. Сырдарья (Таджикистан) и водохранилищах приведена ниже на рисунке 2 [1].



Нурекский гидроузел.
Водозабор горный, башенного типа



Кайраккумский гидроузел.
Водозабор равнинный, совмещенного типа

Рисунок 1 – Поверхностные водохранилищные водозаборы Таджикистана

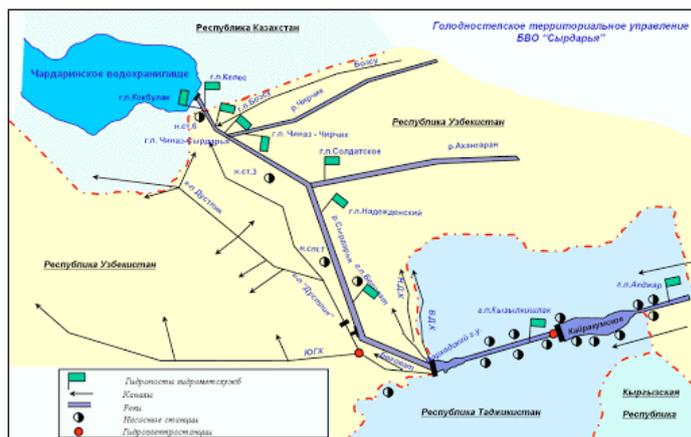


Рисунок 2 – Схема расположения поверхностных водозаборов на территории Таджикистана (бассейн р.Сырдарья)

В общем случае выбор типа водозаборного сооружения и его размещение определяется как гидрологическими, так и геоэкологическими характеристиками поверхностного водоисточника – водохранилища и его морфометрическими параметрами. В соответствии с требованиями проектирования место расположения водозабора в идеальных условиях должно отвечать следующим условиям:

- располагаться на кратчайшем расстоянии от потребителя воды (городской застройки или промпредприятий);
- находиться выше города, промышленных предприятий и других потенциальных источников загрязнения воды;
- находиться на устойчивом (в геодинамическом плане) участке береговой линии водного объекта вне зоны абразии (переработки) берега, образования транзита и аккумуляции наносов;
- обеспечивать возможность устройства зон санитарной охраны водозаборов.

Анализ условий расположения поверхностных водохранилищных водозаборов Беларуси и Таджикистана показал, что: требования 1,2 и 4 как правило соблюдаются практически повсеместно. Что касается требования 3, то оно в ряде случаев не всегда выполняется из-за развития береговых процессов – наличия процесса абразии (переработки) берегов, которая ведет к образованию вдольберегового перемещения наносов. Учитывая, что в русловых водохранилищах, особенно это касается равнинных, независимо от их географического расположения, активная переработка берегов и перемещение наносов происходит именно в приплотинной наиболее широкой части водоема, выполнение пункта 3 в ряде случаев бывает проблематичным. К примеру несоблюдения пункта 3 в условиях Беларуси можно отнести расположение водозабора рыбхоза на Осиповичском водохранилище, который размещен непосредственно рядом с участком переработки берега [2,3].

Большинство созданных на водохранилищах Беларуси водозаборов расположены в приплотинной части водоемов при этом конструктивно все они подразделяются на *раздельные* и *совмещенные* [4]. Такие водозаборы расположены на водохранилищах Любанском, Млынокском, Осиповичском и других (рисунок 3). В Таджикистане такие водозаборы применяются на Кайракумском водохранилище. В этих водозаборах насосная станция подъема конструктивно отделена от берегового колодца.

Береговые же водозаборы совмещенного типа с насосными станциями устраивают, как правило, при больших производительностях и расходах. В качестве характерных примеров привести комплексный водозабор, расположенный на правом берегу водохранилища Дрозды, используемый для водоснабжения г. Минска, а также водозаборы на Жодинском водохранилище, Лукомльской ГРЭС и ряде др. (рисунок 3).

Кроме указанных видов водозаборов существуют поверхностные водозаборы с так называемым «прямым отбором» воды для обеспечения рыбхозов, мелиоративных объектов, а также малых ГЭС. К таким сооружениям относятся водозаборы на водохранилищах: Любанском, Локтыши, Погост, Селец, Дубровском и других. Следует также отметить, что ряд водохранилищ наливного типа (Муровно,

Локтыши, Любашевское Ельское, Большие Орлы, Малые Автюки, Смолевичское) оснащаются насосными станциями (НС) двойного действия, которые в весенний период служат для наполнения водоема, а в период межени – для орошения, обводнения и водоснабжения. Все конструкции насосной станции служат в этом случае в качестве водозабора раздельного типа. Аналогичные технические и технологические решения применяются и в Таджикистане.



Водозабор на Млынокском водохранилище



Водохранилище ТЭЦ-2

Рисунок 3 – Водозаборы совмещенного типа на водохранилищах Беларуси

Ниже в таблице 1 приведена характеристика некоторых эксплуатируемых водозаборов на водохранилищах Беларуси. В таблице 2 даны сведения о водохранилищах Таджикистана, используемых для орошения, ирригации и обводнения, на которых расположены водозаборы.

Таблица 1 – Сведения о существующих водозаборах на водохранилищах Беларуси

| Водохранилище | Водоток | Объем, млн м ³ | | Регулирование | Тип водозабора | Назначение водохранилища* | Год ввода в экспл. |
|-----------------|-------------|---------------------------|--------|---------------|----------------|---------------------------|--------------------|
| | | Полн. | Полез. | | | | |
| Чижовское | р. Свислочь | 5,6 | 2,5 | сезонное | раздельный | Э, В | 1956 |
| Солигорское | р. Случь | 42,0 | 27,2 | многолетнее | совмещен. | И, Э, В, РБ | 1967 |
| Осиповичское | р. Свислочь | 17,5 | 12,0 | суточное | раздельный | Э, РБ | 1954 |
| Млынокское | р. Млынок | 2,3 | 1,9 | сезонное | раздельный | И,Р | 1980 |
| Жодинское | р. Усяжа | 4,40 | 1,2 | сезонное | совмещен. | Э, В | 1967 |
| Дрозды | р. Свислочь | 5,75 | 2,2 | сезонное | совмещен. | Э,В,Р | 1976 |
| Водоохран. ТЭЦ2 | р. Свислочь | 1,2 | 0,4 | суточное | раздельный | Э,В | 1957 |
| Любанское | р. Случь | 39,54 | 21,3 | сезонное | раздельный | РБ,И | 1967 |
| Дубровское | р. Усяжа | 22,4 | 12,0 | сезонное | раздельный | Э,В,Р | 1985 |

Таблица 2 – Сведения о действующих водозаборах и водохранилищах Таджикистана [5]

| Водохранилище | Водоток | Объем млн м ³ | | Регулирование | Тип водозабора | Назначение водохранилища* | Год ввода в экспл. |
|---------------|--------------|--------------------------|---------|---------------|----------------|---------------------------|--------------------|
| | | Полн. | Полезн. | | | | |
| Фархадское | р. Сырдарья | 330 | – | суточное | раздельный | И,Э,Р,В | 1948 |
| Кайракумское | р. Сырдарья | 4160 | 2600 | сезонное | совмещен. | И, Э, Р, | 1956 |
| Каттасайское | р. Каттасай | 55 | 36,6 | сезонное | раздельный | И,С,Р,В | 1966 |
| Нурекское | р. Вахш | 10500 | 4500 | сезонное | раздельный | Э,И,В,Р | 1983 |
| Головное | р. Вахш | 94,5 | 20,0 | суточное | раздельный | И,Э,В,Р | 1962 |
| Муминабадское | р. Обисурх | 31 | 30 | сезонное | раздельный | И,В,Р | 1959 |
| Сельбурское | р. Кызылсу | 20,7 | 17 | сезонное | раздельный | И,В,Р,С | 1966 |
| Байпазинское | р. Вахш | 125 | 87 | сезонное | раздельный | И,В,Р | 1989 |
| Даганасайское | р. Даганасай | 28 | 14 | сезонный | раздельный | И,В,С | 1983 |

Примечание: В – водоснабжение, И – ирригация, Э – энергетика, Р – рекреация, С – селезащита, РБ – рыборазведение. Последние 3 вида использования являются сопутствующими основным.

Комплексные исследования процесса формирования и динамики берегов водохранилищ [2,3] показали, что объемы переработки – разрушения естественных берегов водохранилищ, попадая в прибрежную зону под действием ветрового волнения и вдольбереговых течений, ледовых явлений перемещаются в виде потока наносов, откладываясь и накапливаясь, образуют разнообразные аккумулятивные формы. Наносы, перемещаемые вдоль берега, попадая в приемные ковши водозаборов, снижают производительность насосного оборудования и затрудняют эксплуатацию последних (рисунок 4).



Рисунок 4 – Вдольбереговое перемещение наносов и аккумуляция продуктов абразии. Петровицкое водохранилище (Беларусь) и Кайракумское (Таджикистан) водохранилище

Проведенные натурные исследования режима движения наносов в береговой зоне водохранилищ [2,3,6] позволили установить, что под воздействием ветрового волнения в приустьевой зоне происходит естественная сортировка частиц по крупности и их дифференциация по неоднородности. Ширина зоны вдольберегового перемещения и сортировки наносов в условиях водохранилищ Беларуси

составляет 2,0–10,0 м от границы уреза [2, 3]. Экспериментальные исследования в береговой зоне водохранилищ Таджикистана показали, что на равнинных водохранилищах ширина зоны транспортировки наносов составляет от 10 до 30м (рисунок 4), а в горных условиях соизмерима с масштабом аккумулятивных образований на водохранилищах Беларуси.

Ранее по результатам натурных экспериментов [3] была получена эмпирическая зависимость для расчета суммарного объема стока наносов (ΔQ_{xt}), приведенная к единичной ширине береговой отмели (l_x). Дальнейшие исследования показали, что в нее должна быть внесена поправка, учитывающая уменьшение периода ледостава и увеличение срока воздействия ветрового волнения за счет глобального потепления:

$$\Delta Q_{xt} = 0,137 \cdot 10^{-5} l_x h_{1\%}^2 (Tn + \Delta T n_1), \quad (1)$$

где $h_{1\%}$ – высота волны 1% – ой обеспеченности, м,

Tn – длительность безледного периода, принимаемая для водохранилищ, созданных с 1955 по 2000 годы, сут.,

ΔT – дополнительная длительность безледного периода для водохранилищ, созданных с 2001 по 2021 годы, сут., обусловленные глобальным потеплением и увеличивающимся сроком безледоставного периода,

n – количество лет эксплуатации водохранилища до потепления,

n_1 – количество лет эксплуатации водохранилища при потеплении.

Стационарные наблюдения за ветровым волнением, проведенные на Заславском водохранилище (Республика Беларусь), позволили установить, что характерным для водоемов Беларуси является высокая повторяемость волн высотой 0,1–0,3 м (при длине разгона волны до 2500 м и средней скорости ветра 0,5 м/с). Наиболее интенсивное ветровое волнение развивается в период август–сентябрь. Высота волн $h_{1\%}$ при длине разгона до 5000 м при этом может достигать 1,2 м [2]. Для русловых водохранилищ равнинного типа (например, Заславское), где соблюдается отношение ($h_{1\%} / h_L < 0,1$), высота волны определяется по формуле:

$$h_{1\%} = f(w_{10}^2/g)k_L, \quad (2)$$

где $h_{1\%}$ – 1%-я высота волны в режиме, м;
 h_L – средняя глубина водоема по длине разгона волны, м;
 w_{10} – скорость ветра на высоте 10 м над земной поверхностью, м/с;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 k_L – эмпирический коэффициент, принимаемый в зависимости от длины разгона волны L_p по [2,6,7–10].

Подставляя выражение (2) в (1), имеем:

$$\Delta Q_{xt} = 0,137 \cdot 10^{-5} k_x [(w_{10}^2 / g) k_L]^2 (Tn + \Delta T n_1). \quad (3)$$

Аналогичная эмпирическая зависимость по расчету суммарного объема стока наносов (ΔQ_{xt}) характерна и для водохранилищ Таджикистана. Однако полученный эмпирический коэффициент для условий Средней Азии имеет отличные значения от регионов Беларуси и при этом его значения колеблются для равнинных и предгорных водохранилищ Таджикистана от 0,137 до 0,377 и более для горных.

Полученная зависимость может быть использована при укрупненной оценке заносимости и заиления приемных колодцев водозаборных сооружений для расчетных высот волн до 1,20 м.

Проведенный анализ гидрологического режима водохранилищ Беларуси позволил получить критерии, определяющие внутриводоемные процессы, влияющие на функционирование и эксплуатацию водозаборов.

Агрегирование стандартных морфометрических характеристик позволило получить критерии, устанавливающие особенности водных

объектов Беларуси и Таджикистана, которые в определенной степени влияют на расположения поверхностных водозаборов [2,7–10]:

- критерий, характеризующий удлинненность волохранилища, $k_y = L/B_{cp}$;
- критерий постоянства уровней в водоеме, $k_{\Delta} = \Delta H_{бл}/H_{cp}$;
- критерий глубинности водоема, $k_{\epsilon} = H_{cp} 10^{-3}/B_{cp}$.

где L – длина водохранилища, м; B_{cp} – средняя ширина водохранилища, м; $\Delta H_{бл}$ – средняя величина колебания уровней верхнего бьефа в безледный период, м; H_{cp} – средняя глубина водохранилища, м.

Ниже в таблице 3 приведены расчетные значения критериев для условий Беларуси. Следует отметить, что приведенные соотношения, рекомендуемые в качестве показателей для размещения водозаборов, характерны и для водохранилищ Таджикистана, хотя масштаб и значения коэффициентов в этом регионе более близкие к крупным водохранилищам стран СНГ (таблица 4) [2].

Распределение приведенных критериев по длине руслового водохранилища позволят найти место рационального расположения водозабора, определяемого с одной стороны требованиями водопотребителя, а с другой – особенностями гидрологического режима водоема с учетом развития берегоформирующих условий, динамики берегов и режима перемещения влекомых наносов в береговой зоне.

Таблица 3 – Морфометрические характеристики водохранилищ Беларуси [2]

| Название водохранилища | Полный объем, млн. м | Площадь при НПУ F_n , км ² | Длина L , км | Средняя ширина B_{cp} , км | Средняя глубина H_{cp} , м | Колебания уровня $\Delta H_{бл}$, м | $k_y = L/B_{cp}$ | $k_{\Delta} = \Delta H_{бл}/H_{cp}$ | $k_{\epsilon} = H_{cp} 10^{-3}/B_{cp}$ |
|------------------------|----------------------|---|----------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------------|--|
| Заславское | 108,5 | 31,1 | 10,0 | 3,1 | 3,5 | 1,2 | 3,22 | 0,34 | 1,1 |
| Осиповичское | 17,5 | 11,87 | 47,0 | 0,3 | 1,8 | 0,7 | 17,0 | 0,39 | 6,0 |
| Лепельское | 45,5 | 9,75 | 6,0 | 1,5 | 4,4 | 1,13 | 4,0 | 0,25 | 3,0 |
| Солигорское | 42,0 | 55,0 | 24,0 | 1,0 | 2,5 | 0,95 | 24,0 | 0,38 | 2,5 |
| Красная Слобода | 69,5 | 23,65 | 5,5 | 4,3 | 3,0 | 1,40 | 1,38 | 0,47 | 0,7 |
| Чигиринское | 62,6 | 23,4 | 17,0 | 1,4 | 2,7 | 0,93 | 12,1 | 0,34 | 0,3 |
| Тетеринское | 13,8 | 4,61 | 3,4 | 0,5 | 3,0 | 0,80 | 18,8 | 0,27 | 0,3 |
| Чижовское | 5,6 | 2,8 | 6,1 | 0,5 | 2,0 | 0,36 | 12,2 | 0,18 | 4,0 |
| Любашевское | 2,0 | 0,76 | 1,3 | 0,55 | 2,86 | 0,70 | 2,4 | 0,24 | 5,0 |
| Ключегорское | 7,7 | 5,6 | 1,3 | 0,5 | 1,5 | 0,76 | 4,6 | 0,60 | 3,0 |
| Селявское | 5,6 | 4,7 | 3,5 | 0,7 | 3,3 | 0,80 | 5,0 | 0,24 | 4,7 |
| Дружба народов | 13,7 | 8,7 | 6,1 | 0,5 | 5,4 | 0,4 | 12,2 | 0,10 | 1,1 |
| Петровицкое | 15,0 | 4,8 | 7,8 | 0,4 | 3,2 | 0,7 | 19,5 | 0,22 | 8,0 |
| Дубровское | 22,4 | 3,45 | 6,5 | 0,5 | 6,2 | 1,2 | 13,0 | 0,19 | 12,4 |

Таблица 4 – Морфометрические характеристики равнинных водохранилищ стран СНГ [2]

| Название водохранилища | Полный объем, млн м ³ | Площадь при НПУ F_n , нкм ² | Длина L , км | Средняя ширина B_{cp} , км | Средняя глубина H_{cp} , м | Колебания уровня $\Delta H_{бл}$, м | $k_y = L/B_{cp}$ | $k_{\Delta} = \Delta H_{бл}/H_{cp}$ | $k_{\epsilon} = H_{cp} 10^{-3}/B_{cp}$ |
|-----------------------------|----------------------------------|--|----------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------------|--|
| Рыбинское (Россия) | 25420 | 4550 | 163 | 2,8 | 5,6 | 4,0 | 58,2 | 0,71 | 2,8 |
| Горьковское (Россия) | 8815 | 1591 | 427 | 3,7 | 7,0 | 2,0 | 115,4 | 0,28 | 1,9 |
| Куйбышевское (Россия) | 58000 | 6448 | 650 | 9,9 | 8,9 | 7,5 | 65,6 | 0,84 | 0,9 |
| Волгоградское (Россия) | 32120 | 3309 | 540 | 6,1 | 10,1 | 3,0 | 88,5 | 0,30 | 1,6 |
| Воткинское (Россия) | 9360 | 1120 | 360 | 3,1 | 13,3 | 4,0 | 116,1 | 0,30 | 4,2 |
| Цимлянское (Украина) | 23860 | 2702 | 360 | 7,5 | 8,8 | 5,0 | 48,0 | 0,57 | 1,1 |
| Днепродзержинское (Украина) | 2450 | 567 | 114 | 4,0 | 4,5 | 0,5 | 28,5 | 0,11 | 1,1 |
| Кременчугское (Украина) | 13500 | 2252 | 185 | 3,1 | 6,0 | 5,2 | 59,7 | 0,87 | 1,9 |
| Днепровское (Украина) | 3300 | 410 | 129 | 3,2 | 8,1 | 2,9 | 40,3 | 0,40 | 2,5 |
| Каховское (Украина) | 18200 | 2155 | 230 | 9,4 | 8,5 | 3,3 | 24,5 | 0,40 | 0,9 |
| Новосибирское (Россия) | 8800 | 1070 | 238 | 4,5 | 8,3 | 5,0 | 53,0 | 0,60 | 1,8 |
| Павловское (Россия) | 1410 | 117 | 150 | 0,8 | 12,0 | 11,5 | 187,5 | 0,96 | 15,0 |
| Дубоссарское (Молдова) | 486 | 70 | 128 | 0,5 | 65,0 | 3,8 | 256,0 | 0,55 | 13,8 |
| Каунасское (Литва) | 462 | 63 | 83 | 0,8 | 7,2 | 4,0 | 103,7 | 0,55 | 9,0 |
| Плявиньское (Латвия) | 630 | 42 | 56 | 0,8 | 15,0 | 5,0 | 70,0 | 0,33 | 18,7 |

Оценка и последующий анализ численных значений предложенных критериев показал, что величина K_y для русловых водохранилищ Беларуси изменяется в пределах 2,4–24,0, тогда как для крупных водохранилищ, в том числе и водохранилищ Таджикистана $K_y = 24,5 - 256,0$. Аналогичные отличия наблюдаются и в соотношениях коэффициентов постоянства уровней: для водоемов Беларуси $k_{\Delta} = 0,18 - 0,60$; для крупных водоемов СНГ $k_{\Delta} = 0,11 - 0,96$, а также: $k_e = 0,30 - 12,4$ для Беларуси, а для больших водохранилищ СНГ $k_e = 0,90 - 18,7$.

Таким образом, было установлено, что предложенные критерии имеют отличия для водохранилищ Беларуси и Таджикистана значения. Эти отличия позволяют говорить об гидролого-морфологических особенностях водохранилищ как Беларуси, так и Таджикистана, которые существенно сказываются на масштабах и динамике переработки берегов и влияют на условия эксплуатации водозаборов.

Полученные критерии позволяют определять в первом приближении места расположения проектируемых водозаборов, для чего используется принцип районирования и зонирования акваторий и побережья водохранилищ с выделением определенных гидрологических зон на акватории водоемов. Выделение зон производится на основе определения соотношения глубин, характерных для каждой из зон.

В публикациях [2,3,7–10] отмечается, что у водоемов руслового типа на акватории ярко выражены три гидродинамические зоны (рисунок 5).

Наблюдения, проведенные авторами как в Беларуси, так и в Таджикистане, показали, что на водохранилищах руслового типа

наибольшая интенсивность и масштабы развития переработки наблюдаются на береговых склонах, сложенных несвязными песчаными грунтами. Деформация и разрушение коренных берегов происходит преимущественно за счет совместного действия ветроволнового и уровневого режимов. Так, общая протяженность разрушаемых склонов в условиях водохранилищ Беларуси составляет приблизительно 25–40 % протяженности всей береговой длины водоема. В условиях же равнинных водохранилищ Таджикистана по примерным оценкам авторов этот показатель выше и составляет более 40 %. В верховьях водохранилищ в некоторых случаях наблюдается проявление русловой эрозии.

Основными критериями рационального расположения проектируемых водозаборов, как в Беларуси, так и в Таджикистане, которые должны учитываться наряду с вышеприведенными K_y , k_{Δ} и k_e , служат критерии, определяющие гидрологические зоны водохранилищ с ответствующим ветро-волновым режимом, динамикой береговых процессов и условиями образования и движения наносов.

Расчетные зависимости для определения гидродинамических зон глубин и схема гидрологического зонирования акватории руслового водохранилища приведены ниже на рисунке 5.

Условные обозначения на рисунке 5 следующие: H_n – глубина водохранилища в приплотинной зоне, м; H_c – глубина в средней переходной зоне, м; H_b – глубина в верховой зоне, м; L – длина водохранилища, м; $\Delta H_{бл}$ – средняя величина колебания уровней верхнего бьефа в безледный период, м; ω_{10} – скорость ветра на высоте 10 м над уровнем водной поверхности.

| Гидрологическая зона | Граница зоны по глубине, м | Схема гидрологического зонирования |
|-----------------------------------|--|------------------------------------|
| Нижняя приплотинная зона (зона А) | $H_n \geq (0,43 + 0,0137L)\omega_{10} + \Delta H_{бл}$ | |
| Средняя переходная зона (зона В) | $H_c \geq (0,43 + 0,0137L) + \Delta H_{бл}$ | |
| Верховая зона (зона С) | $H_b \geq \Delta H_{бл}$ | |

Рисунок 5 – Схема гидрологического зонирования водохранилища руслового типа

Заключение

Выполненные совместные исследования на водохранилищах Беларуси и Таджикистана по оценке влияния береговых процессов на расположение поверхностных водозаборов позволили разработать универсальные критерии, характеризующие гидродинамический режим водоемов и провести зонирование акваторий водоемов, которое совместно с районированием побережья по развитию процессов абразии и аккумуляции позволяют определять места оптимального расположения водозаборов. Полученные эмпирические зависимости по расчету расхода наносов в прибрежной зоне являются универсальными и могут быть распространены на водоемы различных регионов при размещении водозаборов как проектируемых, так и существующих, находящихся в эксплуатации.

Список цитированных источников

1. http://www.icwc-aral.uz/bwoamu_ru.htm.
2. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси: монография / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.
3. Левкевич, В. Е. Динамика формирования берегов малых равнинных водохранилищ: монография / В. Е. Левкевич. – Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 149 с.
4. Оценка сооружений инженерной защиты, систем водоснабжения и водоотведения средствами дистанционной диагностики / В. Е. Левкевич [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1 (124). – С. 96–100.
5. Стратегия развития водного сектора Таджикистана. – Душанбе, 2006. – 58 с.
6. Левкевич, В. Е. Гидро-морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси : монография / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2018. – 143 с.
7. Левкевич, Е. М. Лабораторные исследования переформирования неукрепленных откосов земляных плотин под воздействием волн и фильтрационных сил / Е. М. Левкевич // Известия вузов. Энергетика. – 1971. – № 8. – С. 98–102.
8. Максимчук, В. Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ: монография / В. Л. Максимчук. – Киев : Будівельник, 1981. – 112 с.

9. Бузук, А. В. Критерий устойчивости откосов подпорных сооружений и берегов водохранилищ с деформированным железобетонным креплением / А. В. Бузук // Мелиорация. – 2018. – № 4 (86) – С. 24–30.
10. Левкевич, В. Е. Современные экзогенные инженерно-геологические процессы на водохранилищах и озерах Беларуси: монография / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2021. – 142 с.

References

1. http://www.icwc-aral.uz/bwoamu_ru.htm.
2. Levkevich, V. E. Dinamicheskaya ustojchivost' beregov vodohranilishch Belarusi: monografiya / V. E. Levkevich. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2015. – 307 s.
3. Levkevich, V. E. Dinamika formirovaniya beregov malyh ravninnyh vodohranilishch: monografiya / V. E. Levkevich. – Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 149 s.
4. Ocenka sooruzhenij inzhenernoj zashchity, sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya sredstvami distancionnoj diagnostiki / V. E. Levkevich [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1 (124). – S. 96–100.
5. Strategiya razvitiya vodnogo sektora Tadzjikistana. – Dushanbe, 2006. – 58 s.
6. Levkevich, V. E. Gidro-morfodinamika pribrezhnoj zony vodohranilishch GES Belarusi : monografiya / V. E. Levkevich. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2018. – 143 s.
7. Levkevich, E. M. Laboratornye issledovaniya pereformirovaniya neukreplennyh otcosov zemlyanyh plotin pod vozdejstviem voln i fil'tracionnyh sil / E. M. Levkevich // Izvestiya vuzov. Energetika. – 1971. – № 8. – S. 98–102.
8. Maksimchuk, V. L. Racional'noe ispol'zovanie i ohrana beregov vodohranilishch: monografiya / V. L. Maksimchuk. – Kiev : Budivelnik, 1981. – 112 s.
9. Buzuk, A. V. Kriterij ustojchivosti otcosov podpornykh sooruzhenij i beregov vodohranilishch s deformirovannym zhelezobetonnyim krepлением / A. V. Buzuk // Melioraciya. – 2018. – № 4 (86) – S. 24–30.
10. Levkevich, V. E. Sovremennye ekzogennye inzhenerno-geologicheskie processy na vodohranilishchah i ozerah Belarusi: monografiya / V. E. Levkevich. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2021. – 142 s.

Материал поступил в редакцию 18.01.2022

К ВОПРОСУ ДИНАМИКИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ОСВЕТЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ НА КАРКАСНО-ЗАСЫПНЫХ ФИЛЬТРАХ

В. В. Мороз

*К. т. н., доцент, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru*

Реферат

Проведены исследования по динамике фильтрационного осветления суспензий промышленных сточных на каркасно-засыпных фильтрах (КЗФ). Показано, что при фильтрации каркас играет роль зернистого хлопьеобразователя, что препятствует коагуляции верхнего слоя мелкозернистого материала и повышает динамические характеристики фильтрования, а также КЗФ обладает лучшей кинетикой, но несколько меньшей емкостью, чем фильтр, загруженный только мелкой фракцией загрузки.

Ключевые слова: pH, фильтрация, регенерация, каркас, грязеемкость, осадок, сорбция.

ON THE QUESTION OF THE DYNAMICS OF FILTERING LIGHTING OF SUSPENSIONS ON FRAME-BILLING FILTERS

V. V. Moroz

Abstract

Research has been carried out on the dynamics of filtration clarification of industrial waste suspensions on frame-filling filters. It is shown that during filtration, the frame plays the role of a granular flocculant, which prevents clogging of the upper layer of fine-grained material and increases the dynamic characteristics of filtration, as well as the frame-filling filter has better kinetics, but slightly less capacity than a filter loaded with only a small fraction of the load.

Keywords: pH, filtration, regeneration, framework, dirt capacity, sediment, sorption.

Введение

Любые осветлители непрерывного действия на I ступени не гарантируют от проскоков взвеси и не обеспечивают глубокого осветления. Поэтому вторая ступень осветления посредством фильтрования через пористую среду совершенно необходима. Перед установками для обессоливания желательнее иметь двойное фильтрование.

Аппаратурное оформление фильтрования для получения питьевой или технической воды из природных и сточных вод весьма разнообразно и хорошо специалистам известно. Однако, если исходным материалом являются нейтрализованные и осветлённые промышленные сточные воды предприятий приборо- и машиностроения, выбор фильтровальных установок должен производиться с учётом особенностей состава твёрдой фазы и её концентрации в суспензии. Как известно, характер осадка, образующегося в поровом пространстве фильтрующей среды, отличается от осадка природных вод. Наличие в нём карбонатных соединений приводит к «цементации» зернистого слоя. При фильтровании сверху-вниз это способствует образованию корки на поверхности загрузки, при фильтровании снизу-вверх – зарастанию дренажных систем.

Возможно также обрастание зёрен закристаллизовавшейся массой осадка. Всё это приводит к необратимым изменениям пористой загрузки и снижению эффективности очистки.

Наибольшие трудности возникают при регенерации загрузки. Интенсивность промывки, принятая в водопроводных фильтрах, не обеспечивает качественную отмывку фильтрующего слоя. Энергичная промывка с применением пара, сжатого воздуха, реагентов нарушает дренажные системы и поддерживающие слои.

Эксплуатация водопроводных фильтров в системах доочистки сточных вод выявила неприемлемость принципа достижения максимальной грязеемкости загрузки, поставив на ведущее место удобство и надёжность регенерации фильтрующего слоя. Именно этим соображениям должен быть подчинён выбор материалов и крупности зёрен загрузки, подбор систем для подвода и отвода воды, выбор направления и скорости фильтрования.

Основная часть (Анализ материалов и результаты исследований)

Исследования в этой области, проведённые Б. А. Митиным, показали, что наиболее универсальным решением из материалов

высокой плотности является каркасно-засыпной фильтр (КЗФ) а.с. №1022722 и каркасно-щелевой фильтр (КЩФ) а.с. 829131. Эти исследования были продолжены на базовом объекте ОАО «Брестский электромеханический завод» (ОАО «БЭМЗ»).

Сущность устройства (рис. 1) заключается в объединении крупнозернистой и мелкозернистой фракций для совместного функционирования при фильтровании и регенерации). Диаметры зёрен каркаса и засыпки подобраны таким образом, чтобы мелкая фракция свободно проникала в межзерновое пространство крупной фракции.

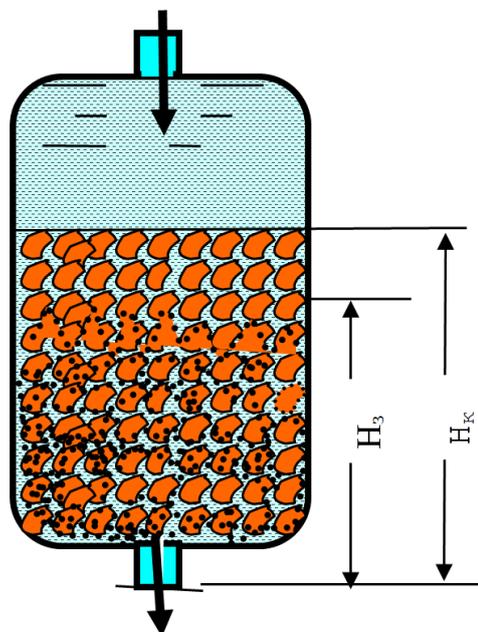


Рисунок 1 – Схема каркасно-засыпного фильтра

Каркас фильтра составляет крупные зерна из тяжелых пород, например, гранита неправильной формы, с размером зерен, в 40–20 раз превышающим размер зерен загрузки, обычно применяемой в коммунальном водоснабжении. В пористом пространстве каркаса

помещается зернистая загрузка с частицами 1–3 мм. Высота каркаса в 1,3–1,5 раз превышает высоту засыпки H_3 , чтобы обеспечить необходимую высоту «кипения» слоя при промывке в неподвижном каркасе.

Такое устройство фильтра обеспечивает более благоприятные условия отмывки осадка, поскольку энергия при соударении зерен загрузки с каркасом выше, чем при соударении частиц друг с другом. Поэтому затраты на отмывку осадка в каркасно-засыпном фильтре оказываются ниже.

При отмывке каркас остаётся неподвижным. Если обозначить через порозность каркаса, то при промывке в каркасно-засыпном фильтре для достижения необходимой скорости для взвешивания зерен засыпной фракции требуется меньшая объёмная скорость, равная $\chi_k \cdot \omega$ по сравнению с ω для традиционных фильтров.

Исходя из феноменологической модели фильтрования, а также решения задачи динамики сорбции для смеси сорбентов, рассмотрим модель динамики сорбции на каркасно-засыпном фильтре и на этой основе остановимся на вопросе об их эффективности и расчёте.

Результаты

Рассмотрим, какое влияние на равновесие и кинетику процесса осветления оказывает наличие каркаса. Каркасно-засыпной фильтр представляет собой типичный пример фильтра, составленного из смеси загрузок с различными фильтрационными свойствами. Допустим, что размеры зёрен засыпной части и каркаса равны d_3 и d_k порозность каркаса χ_k , засыпки внутри каркаса χ_3 .

Положим также, что засыпан в фильтр определенный объем мелкой фракции V , а площадь сечения фильтра – S .

Если мелкая фракция засыпана в фильтр без каркаса, то высота слоя равна

$$l_0 = \frac{V}{S}.$$

При расходе в единицу времени ω линейная скорость $V = \omega/S$. Тогда зависимость коэффициента распределения Γ и кинетического коэффициента β от V и d_3 определяется выражениями

$$\beta_0 = b_0 V^{n_1} d^{n_2}; \quad (1)$$

$$\Gamma = q_0 V^{n_3} d^{n_4}, \quad (2)$$

где $n_1 > 0$, а n_2, n_3, n_4 – отрицательны. Например, для песчаных фильтров

$$n_1 = -0,3, n_2 = -1,7, n_3 = -0,7, n_4 = -0,7.$$

Коэффициенты b_0, q_0 зависят от условий предобработки суспензии и определяются экспериментально, например методом технологического моделирования.

Сравним теперь этот фильтр с каркасно-засыпным, при условии, что объёмная скорость и площадь сечения остаются постоянными.

При пористости каркаса χ_k свободное сечение при засыпке мелкой фракцией с пористостью χ_3 равно $\chi_k \cdot \chi_3$, где V – скорость фильтрации в однородном фильтре. Поскольку $\chi_k < 1$, то свободное сечение в каркасно-засыпном фильтре меньше, чем в однородном фильтре с мелкой загрузкой, и эффективная скорость фильтрации равна

$$V_3 = \frac{V}{\chi_k},$$

где V – скорость фильтрации в однородном фильтре. Следовательно, кинетический коэффициент в засыпке увеличится.

Уровень «проскока» в фильтрате, как известно, определяется по формуле:

$$\frac{C(l)}{C_0} = \exp\left(-\frac{\beta l}{V}\right), \quad (3)$$

где C_0 – концентрация исходной суспензии,
 l – длина фильтра.

Для каркасно-засыпного фильтра $l_3 = l / \chi_k$, а $V_3 = V / \chi_k$. Следовательно, уменьшение проскока происходит за счет увеличения кинетического коэффициента β .

Однако увеличение β в действительности больше, поскольку кроме адгезии внутри засыпки происходит формирование осадка в местах контакта зерен с каркасом. Это дополнительное увеличение кинетического коэффициента β можно оценить по следующей формуле:

$$\beta_3 = \beta_0 \left(1 + \frac{d_3}{d_k}\right) \quad (4)$$

Действительно, относительное увеличение кинетического коэффициента для мелкой фракции (засыпки) пропорционально относительному увеличению удельной поверхности за счет каркаса. Для частиц неправильной формы, из которых сложен каркас, величина $\chi_k \approx 0,5$. По формуле (1) для песчаных загрузок увеличение β примерно составляет ~ 25 %, а с учетом формулы (4) для $d_3/d_k \approx 0,05$ составит ~ 30 %.

Оценим изменение емкости фильтра. Очевидно, что локальная емкость фильтра уменьшится, поскольку в соответствии с формулой (2) частицы каркаса обладают значительно меньшей емкостью, чем частицы засыпки. Кроме того, величина емкости меньше из-за увеличения локальной скорости. В качестве примера оценим вклад загрузки каркаса в грязеемкость фильтра для условий: $d_3/d_k = 10$. Тогда локальная емкость каркаса составит 0,12 от локальной емкости засыпки.

Локальная емкость засыпки также несколько уменьшится, поскольку локальные скорости в каркасе выше. Так, для $\chi_k \approx 0,5$ локальная емкость составит 65 % от исходной.

Таким образом, емкость загрузки в целом составит $(0,12 - 0,65 \chi_k) \approx 0,45 a_0$.

Поскольку высота слоя в каркасе увеличится в χ_k^{-1} раз, то уменьшение полной емкости будет незначительным. Для рассмотренного примера полная емкость фильтра составит 90 % от исходной.

Резюмируя, отметим, что каркасно-засыпной фильтр обладает лучшей кинетикой и несколько меньшей емкостью, чем фильтр, загруженный только мелкой фракцией загрузки.

Это уменьшение грязеемкости легко компенсируется небольшим увеличением высоты фильтрующего слоя (примерно 10–20 % высоты).

Сочетание двух фракций зернистого материала с резко отличающимися размерами зёрен придает фильтрующему слою сумму свойств, которыми по отдельности не обладают ни мелкозернистые ни ультракрупные загрузки.

При фильтровании каркас играет роль зернистого хлопьеобразователя, что препятствует коагуляции верхнего слоя мелкозернистого материала и повышает динамические характеристики фильтрования. При промывке расширение мелкозернистого материала в порах не расширяющейся крупнозернистой загрузки создаёт высокую энергию соударения зёрен «засыпки» с поверхностью каркаса. В результате процессы интенсифицируются при меньших расходах промывной воды.

Повышение грязеемкости фильтра может быть достигнуто за счёт увеличения высоты слоя каркаса, а повышение эффекта осветления – за счёт изменения величины зёрен засыпки. Фильтры такой конструкции, разработанные Б. А. Митиным и изготовленные по чертежам автора работы, использованы в схеме доочистки базового предприятия (рис. 2, рис. 3).

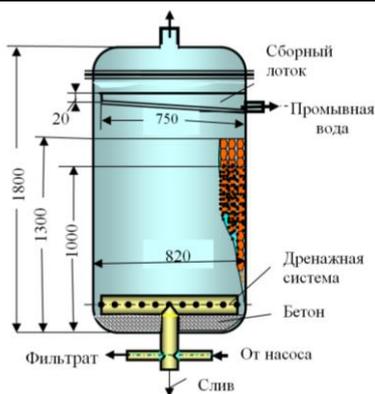


Рисунок 2 – Схема напорного каркасно-засыпного фильтра (КЗФ), смонтированного на базовом предприятии



Рисунок 3 – Фотография напорного каркасно-засыпного фильтра (КЗФ), смонтированного на базовом предприятии

Фильтр изготовлен из ёмкости с эллиптическим дном и съёмной крышкой. Внутри фильтра расположен каркас с крупностью зёрен 40–60 мм. Крупность зёрен «засыпки» 1–2 мм. Высота слоя загрузки 800 мм. В верхней части фильтра в надкаркасном пространстве установлен кольцевой желоб для сбора и отвода промывной воды. К фильтру подключены трубопроводы подачи воздуха, исходной и промывной воды, отвода фильтрата.

Фильтр был выполнен в корпусе, имевшейся на объекте ёмкости, поэтому высота фильтрующего слоя вдвое меньше стандартной.

Для получения фильтрата требуемого качества необходимо соответственно снижать скорость фильтрования. Оценено влияние скорости фильтрования на качество фильтрата (табл. 1).

Таблица 1 – Влияние скорости фильтрования на эффект осветления

| Скорость фильтрования, м/ч, приведённая к стандартной высоте слоя | до 4,0 | до 6,0 | до 8,0 | до 10 | более 10 |
|---|--------|--------|--------|-------|------------|
| Эффект осветления в % по взвешенным веществам | 96,0 | 91,0 | 86,4 | 65,1 | менее 15,0 |
| Эффект осветления в % по железу общему | 76,0 | 70,0 | 56,0 | 32,0 | менее 30,0 |

Таким образом, при подаче на фильтр осветлённой сточной воды с содержанием взвешенных веществ около 30 мг/дм³ железа до 2 мг/дм³ и скорости фильтрования 5–6 м/ч обеспечивалась очистка более чем на 90 % по взвешенным веществам (менее 6 мг/л) и более чем на 70 % по железу (менее 0,5 мг/дм³).

При этом периодические повышения содержания загрязнений в отстоянных сточных водах не оказывало существенного влияния на качество фильтрата.

В большей мере на качество фильтрата влияла длительность межпромывочного периода работы фильтра. В опытах это время колебалось от 5 до 16 ч.

Промывка фильтра осуществлялась обратным током воды из бака фильтрата тем же насосом, что и подача стоков на фильтрование. Наблюдение за ходом промывки загрузки и оценка качества промывки проводились по известным методикам.

На рисунке 4 приведены два характерных графика изменения содержания взвешенных веществ в промывной воде на выходе из фильтра. Для иллюстрации выбраны опыты, проведены опыты с интервалом в 11 месяцев и сопровождавшиеся контрольными промывками.

Анализ кривых показывает, что максимум концентрации загрязнений приходится на конец первой минуты промывки и что около 80 % загрязнений вымывается из загрузки за 2 минуты. За 5 минут промывка практически завершается, о чём свидетельствует низкое загрязнение воды и контрольные промывки.

Петля на восходящей ветви объясняется сходом осадка из промывного желоба, а низкая начальная концентрация загрязнений в промывной воде – определённым объёмом относительно чистой воды над фильтрующей загрузкой. Словом, наблюдалась типовая картина промывки.

По понятным причинам более глубоких исследований данного фильтрата не производилось, в частности не было необходимости вывести его на экономичные режимы по удельному расходу промывной воды. Тем не менее, установлена величина удельного сопротивления расхода промывной воды в зависимости от длительности фильтроцикла: после 10 часов работы – 13 %, 14 часов – 8,4 %, 24 часов – 4 %. Последняя величина лежит в пределах нормы

После года эксплуатации каркасно-засыпного фильтра он был вскрыт для осмотра состояния загрузки и водоотводящих систем. Наблюдались заиливание отводящего кольцевого лотка и пристеночного пространства над лотком. Состояние основной массы загрузки было удовлетворительным. Изменения, внесённые в конструкцию лотка и систему отвода промывной воды, впоследствии предотвратили «заиливание» в «теневых» зёрнах.

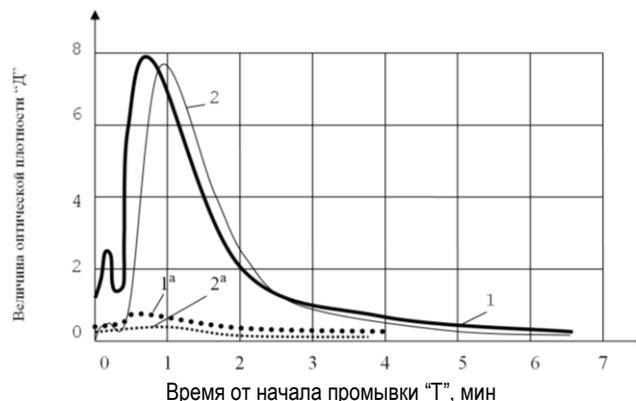


Рисунок 4 – Графики изменения оптической плотности промывной воды основной и контрольной промывок фильтра с каркасно-засыпной загрузкой

1 и 1^а – основная и контрольная промывка (эксперимент 12)
2 и 2^а – основная и контрольная промывка (эксперимент 19)

Есть все основания предполагать, что переоборудование стандартных механических фильтров (например, Таганрогского завода) под каркасно-засыпную загрузку не вызовет осложнений и даст должный эффект при эксплуатации в системах доочистки сточных вод промышленных производств. Фильтрование – завершающий этап осветления сточных вод. Как указывалось ранее, в современных схемах без второй ступени осветления достичь необходимого качества сточных вод невозможно. Наибольшее распространение получили зернистые фильтры, основным элементом которых является фильтрующая загрузка из материалов природных или искусственных.

При выборе фильтрующих материалов предпочтение отдаётся пористым, имеющим развитую фильтрующую поверхность и большее

межзерновое пространство. Пористые материалы, обладающие значительной удельной поверхностью, позволяют повышать производительность фильтров.

Ведущим фактором при выборе загрузки является конструкция и режимы эксплуатации фильтра для очистки промышленных сточных вод, а также удобство и надёжность регенерации, а не максимальная грязеемкость, принятая в водоснабжении.

При очистке промышленных сточных вод и в особенности образующихся на предприятиях приборо- и машиностроения могут применяться и применяются разработанные в своё время Б. А. Митиным каркасно-засыпные фильтры [1]. Эти фильтры монтируются в стандартных фильтрах или любых ёмкостях, соответствующим функциональным требованиям: скорость фильтрования 6–9 м/ч, интенсивность обратной промывки 10–12 дм³/сек на 1 м², продолжительность промывки 8–10 мин, высота загрузки не менее 1,4 м [1, 2].

Особенности процесса фильтрационного осветления суспензий на каркасно-засыпных фильтрах. Каркас фильтра составляет крупные зерна из тяжёлых пород, например, гранита неправильной формы, с размером зерен, в 20–40 раз превышающим размер зерен загрузки, обычно применяемой в коммунальном водоснабжении. В пористом пространстве каркаса помещается зернистая загрузка с частицами 1–3 мм. Высота каркаса в 1,3–1,5 раз превышает высоту засыпки Нз, чтобы обеспечить необходимую высоту «кипения» слоя при промывке в неподвижном каркасе.

Такая структура фильтра обеспечивает более благоприятные условия отмывки осадка, поскольку энергия при соударении зерен загрузки с каркасом выше, чем при соударении частиц друг с другом. Поэтому затраты на отмывку осадка в каркасно-засыпном фильтре оказываются ниже.

При отмывке каркас остаётся неподвижным. Если обозначить через χ_k порозность каркаса, то при промывке в каркасно-засыпном фильтре для достижения необходимой скорости для взвешивания зерен засыпной фракции требуется меньшая объёмная скорость, равная $\chi_k \cdot \omega$, по сравнению с ω для традиционных фильтров.

Исходя из феноменологической модели фильтрования, а также решения задачи динамики сорбции для смеси сорбентов [5], рассмотрим модель динамики сорбции на каркасно-засыпном фильтре и на этой основе остановимся на вопросе об их эффективности и расчёте [4].

Математическая модель динамики фильтрования на каркасно-засыпных фильтрах. Рассмотрим, какое влияние на равновесие и кинетику процесса осветления оказывает каркасно-засыпной фильтр. Как уже указывалось, этот фильтр представляет собой типичный пример фильтра, составленного из смеси загрузок с различными фильтрационными свойствами.

Допустим, что размеры зёрен засыпной части и каркаса равны d_3 и d_k , порозность каркаса χ_k , засыпки внутри каркаса - χ_k .

Предположим также, что засыпан в фильтр определенный объём мелкой фракции V , а площадь сечения фильтра – S .

Если мелкая фракция засыпана в фильтр без каркаса, то высота слоя,

$$t_c = \frac{V}{S}$$

При расходе в единицу времени ω линейная скорость $V = \omega/S$. Тогда зависимость коэффициента распределения Γ в систем сорбент-раствор и кинетического коэффициента β от V и d_3 даётся выражениями (5, 6)

$$\beta_0 = b_0 V^{n_1} d^{n_2}; \quad (5)$$

$$\Gamma = q_0 V^{n_3} d^{n_4}, \quad (6)$$

где $n_1 > 0$, а n_2, n_3, n_4 – отрицательны. Например, для песчаных фильтров $n_1 = 0,3$, $n_2 = -1,7$, $n_3 = -0,7$, $n_4 = -0,7$.

Коэффициенты b_0 и q_0 зависят от условий предобработки суспензии и определяются экспериментально, например методом технологического моделирования.

Сравним теперь этот фильтр с каркасно-засыпным, при условии, что объёмная скорость и площадь сечения остаются постоянными.

При пористости каркаса χ_k свободное сечение при засыпке мелкой фракцией с пористостью χ_3 равно $\chi_k \chi_3$. Поскольку $\chi_k < 1$, то свободное сечение в каркасно-засыпном фильтре меньше, чем в однородном фильтре с мелкой загрузкой, и эффективная скорость фильтрации равна

$$V_3 = \frac{V}{\chi_k},$$

где V – скорость фильтрации в однородном фильтре. Следовательно, кинетический коэффициент в засыпке увеличится.

Уровень «проскока» в фильтрате, как известно, определяется по формуле:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp\left(-\frac{\beta t}{V}\right), \quad (7)$$

где C_0 – концентрация исходной суспензии, l – длина фильтра.

Для каркасно-засыпного фильтра $l_3 = 1 / \chi_k$, а $V_3 = V / \chi_k$. Следовательно, уменьшение проскока происходит за счет увеличения кинетического коэффициента β .

Однако увеличение β в действительности больше, поскольку кроме адгезии внутри засыпки происходит формирование осадка в местах контакта зерен с каркасом. Это дополнительное увеличение кинетического коэффициента β можно оценить по следующей формуле:

$$\beta_3 = \beta_3 \left(1 + \frac{d_3}{d_k}\right) \quad (8)$$

Действительно, относительное увеличение кинетического коэффициента для мелкой фракции (засыпки) пропорционально относительному увеличению удельной поверхности за счет каркаса.

Для частиц неправильной формы, из которых сложен каркас, величина $\chi_k \cong 0,5$. По формуле (5) для песчаных загрузок увеличение β примерно составляет примерно 25 %, а с учетом формулы (8) для $d_3 / d_k \cong 0,05$ составит примерно 30 %.

Оценим изменение емкости фильтра. Очевидно, что локальная емкость фильтра уменьшится, поскольку в соответствии с формулой (6) частицы каркаса обладают значительно меньшей емкостью, чем частицы засыпки. Кроме того, величина емкости меньше из-за увеличения локальной скорости. В качестве примера оценим вклад загрузки каркаса в грязеемкость фильтра для условий: $d_3 / d_k = 10$. Тогда локальная емкость каркаса составит 0,12 от локальной емкости засыпки.

Локальная емкость засыпки также несколько уменьшится, поскольку локальные скорости в каркасе выше. Так, для $\chi_k \cong 0,5$ локальная емкость составит 65 % от исходной.

Таким образом, емкость загрузки в целом составит $(0,12 - 0,65 \chi_k) \cong 0,45 a_0$. Поскольку высота слоя в каркасе увеличится в χ_k^{-1} раз, то уменьшение полной емкости будет незначительным. Для рассмотренного примера полная емкость фильтра составит 90 % от исходной.

Резюмируя, отметим, что каркасно-засыпной фильтр обладает лучшей кинетикой и несколько меньшей емкостью, чем фильтр, загруженный только мелкой фракцией загрузки.

Это уменьшение грязеемкости легко компенсируется небольшим увеличением высоты фильтрующего слоя (примерно 10–20 % высоты).

Заключение

Сочетание двух фракций зернистого материала с резко отличающимися размерами зёрен придаёт фильтрующему слою сумму свойств, которыми по отдельности не обладают ни мелкозернистые, ни ультракрупнозернистые загрузки.

При фильтровании каркас играет роль зернистого хлопьеобразователя, что препятствует коагуляции верхнего слоя мелкозернистого материала и повышает динамические характеристики фильтрования. При промывке расширение мелкозернистого материала в порах нерасширяющейся крупнозернистой загрузки создаёт высокую энергию соударения зёрен «засыпки» с поверхностью каркаса, в результате процессы отмывки интенсифицируются при меньших расходах промывной воды.

Повышение грязеёмкости фильтра может быть достигнуто за счет увеличения высоты слоя каркаса, а повышение эффекта осветления – за счет изменения величины зёрен засыпки.

Список цитированных источников

1. Митин, Б. А. Особенности конструирования и эксплуатации фильтров для очистки промышленных стоков. Реф. сб. № 2. / Б. А. Митин. – М. : ГПИ Сантехпроект, 1975.
2. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий: монография / Е. А. Урецкий. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing Germany, 2014. – 360 с. : ил.
3. Мороз, В. В. Опыт повторного использования сточных вод на предприятии приборо- и машиностроения / Е. А. Урецкий, Л. Д. Субботкин, В. В. Мороз // Сб. науч. трудов – Симферополь : НАПКС, 2018. – № 11 (63) : Строительство и техногенная безопасность. – С. 98–103.
4. Веницианов, Е. В. Математическое описание фильтрационного осветления суспензий / Е. В. Веницианов, М. М. Синявин // Теоретические основы химических технологий. – 1976. – Т. 10, № 4. – С. 584–591.
5. Отчёт. Теоретические исследования сорбционной и фильтрационной очистки сточных вод гальванического производства от растворённых и взвешенных веществ в рамках договора о творческом сотрудничестве БЭМЗ и АН СССР Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, Москва. Брест. 1984.

References

1. Mitin, B. A. Osobennosti konstruirovaniya i ekspluatatsii fil'trov dlya ochildki promyshlennykh stokov. Ref. sb. № 2. / B. A. Mitin. – M. : GPI Santekhproekt, 1975.
2. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozyajstve promyshlennykh predpriyatij: monografiya / E. A. Ureckij. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing Germany, 2014. – 360 с. : il.
3. Moroz, V. V. Opyt povtornogo ispol'zovaniya stochnykh vod na predpriyatii priboro- i mashinostroeniya / E. A. Ureckij, L. D. Subbotkin, V. V. Moroz // Sb. nauch. trudov – Simferopol' : NAPKS, 2018. – № 11 (63) : Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. – S. 98–103.
4. Venicianov, E. V. Matematicheskoe opisanie fil'tracionnogo osvettleniya suspenzij / E. V. Venicianov, M. M. Sinyavin // Teoreticheskie osnovy himicheskikh tekhnologij. – 1976. – T. 10, № 4. – S. 584–591.
5. Otchyot. Teoreticheskie issledovaniya sorbcionnoj i fil'tracionnoj ochildki stochnykh vod gal'vanicheskogo proizvodstva ot rastvoryonnykh i vzveshennykh veshchestv v ramkah dogovora o tvorcheskom sotrudnichestve BEMZ i AN SSSR Institut geohimii i analiticheskoy himii im. V. I. Vernadskogo, Moskva. Brest. 1984.

Материал поступил в редакцию 06.12.2021

ЖЕЛЕЗО-ЛАНТАН-СОДЕРЖАЩИЕ ФОТОКАТАЛИЗАТОРЫ ИЗ ОСАДКОВ ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ ВОД ФИЛЬТРОВ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ

М. В. Пилипенко¹, И. Ю. Козловская², В. И. Романовский³

¹ Аспирант РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», г. Минск, Беларусь, e-mail: marinaby@yandex.by

² К. т. н., старший преподаватель кафедры промышленной экологии Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Беларусь, e-mail: kozlowskaya.inna@yandex.ru

³ К. т. н., старший научный сотрудник Института общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь, e-mail: v.romanovski@yandex.ru

Реферат

В статье представлены результаты синтеза наноразмерных железо-лантан-содержащих порошков с размерами частиц 3,5–8,5 нм. В качестве источника железа был использован осадок очистки промывных вод фильтров обезжелезивания, лантан был выделен из отработанных катализаторов крекинга. Для синтеза выбран метод экзотермического горения в растворах. В качестве восстановителя использовались мочевины, лимонная кислота, глицин и гексаметилентетрамин в стехиометрическом соотношении. Полученные образцы исследованы методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии. Эффективность полученных материалов исследовалась в процессе фотокаталитической деструкции четырех красителей различной природы. Все полученные образцы показали увеличение эффективности деструкции.

Ключевые слова: отход, сточная вода, катализатор.

IRON-LANTANE CONTAINING PHOTOCATALYSTS FROM SEDIMENTS OF WASHING WATER TREATMENT OF DEIRONING FILTERS

M. V. Pilipenka, I. Yu. Kozlovskaya, V. I. Romanovski

Abstract

The article presents the results of the synthesis of nanosized iron-lanthanum-containing photocatalyst with particle sizes of 3.5–8.5 nm. As a source of iron, sediment for washing water from deferrization filters was used. Lanthanum was leached from spent cracking catalysts. For the synthesis, the method of solution combustion synthesis was chosen. As a reducing agent, urea, citric acid, glycine and hexamethylene tetraamine were used in a stoichiometric ratio. The obtained samples were studied by x-ray phase analysis and transmission electron microscopy. The effectiveness of the obtained materials was studied in the process of photocatalytic destruction of four dyes of various nature. All samples obtained showed an increase in destruction efficiency.

Keywords: waste, waste water, catalyst.

Введение

В процессе водоподготовки образуется большое количество неиспользуемых железосодержащих осадков, которые хранятся на шламонакопителях или вывозятся для захоронения на полигоны, что приводит к изъятию земель и воздействию на окружающую среду. Данные отходы имеют практически постоянный элементный состав, поэтому могут рассматриваться как вторичные материальные ресурсы при производстве различных веществ и материалов. Например, получения магнитных сорбентов [1], получения каталитических покрытий на инертных материалах для повышения эффективности обезжелезивания подземных вод [2–9]. Для синтеза материалов во всех этих случаях был выбран метод экзотермического горения в растворах [10]. Отдельный интерес представляет получение каталитических материалов с использованием железосодержащих осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания [11–13].

Известно, что неорганические соединения лантана обладают хорошими каталитическими свойствами. В большинстве статей рассматривается синтез феррита лантана как чистого, так и с другими веществами, и анализируются их фотокаталитические свойства. Так, например, в статье [14] был получен наноразмерный кристаллический порошок феррит лантана LaFeO_3 методом экзотермического горения из раствора. В качестве реагентов использовались нитраты лантана ($\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и железа ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), в качестве топлива – глицин, в стехиометрическом соотношении. Полученный порошок феррита лантана характеризовался высокой пористостью и размером кристаллов 14–30 нм. В работе [15] LaFeO_3 /монтмориллонит нанокомпозит был получен золь-гель методом. Полученные частицы характеризовались размерами 10–15 нм. Фотокаталитическая деструкция красителя Rhodamine B составила 99,34 % в течение 90 мин обработки. В работе [16] авторы получили пористый феррит лантана тоже золь-гель методом. Эффективность его использования для деструкции органических веществ проверяли на растворах фенола и красителя Rhodamine B. В статье [17] отмечается о 95 % деструкции раствора красителя метиленового голубого после

15 минутной обработки с использованием 5 %- $\text{LaFeO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ в присутствии ЭДТА. Получение соединений лантана методом экзотермического горения в растворах показано в статьях [18, 19]. Интерес представляет изучение перспектив использования добавки лантана, регенерированного из отходов катализаторов крекинга [20–22], в каталитические материалы на основе железа.

Методология исследований

В качестве железосодержащих прекурсоров для синтеза использовались растворы азотнокислотного растворения железосодержащих осадков станций обезжелезивания, а также химически чистый нитрат железа. Растворение осадков проводилось 20 % азотной кислотой в течение 60 мин при комнатной температуре и механическом перемешивании с частотой 100 об/мин. Данные параметры были выбраны на основании предварительных исследований.

В качестве источника лантана выступала смесь нитратов лантана и алюминия, полученная из отработанного катализатора крекинга (ОКК) – отход четвертого класса опасности. ОКК удаляется из установки каталитического крекинга в виде мелкодисперсной фракции и улавливается в аппаратах газоочистки, а также образуется при периодической замене катализатора.

Для выщелачивания лантана из ОКК авторы использовали раствор азотной кислоты с концентрацией 7 моль/дм³, продолжительность обработки 2 ч. при температуре – 20 ± 2 °С, массовое соотношение обработки $1 : 10$. Для выделения соединений лантана из азотнокислых растворов в виде твердой фазы проводили выпариванием жидкой фазы с последующим охлаждением остатка до 30–35 °С. Содержание лантана в твердом остатке после выпарки и термической обработки достигает 20,2 %, соотношение $\text{La}_2\text{O}_3 : \text{Al}_2\text{O}_3 - 1 : 6-7$. Смесь нитратов лантана и алюминия вносились в раствор, полученный в результате выщелачивания осадков обезжелезивания, в таком соотношении, чтобы в результате получить массовое соотношение оксида железа к оксиду лантана 9:1. Топливо бралось в стехиометрическом соотношении.

Растворы прекурсоров готовились в дистиллированной воде. Затем смесь подвывпаривалась и помещалась в предварительно разогретую до 400 °С муфельную печь, где и инициировалась экзотермическая реакция с получением целевых наноразмерных материалов.

Морфологию поверхности образцов осуществляли на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-2100F. Обработка изображений была выполнена в программе ImageJ.

Фазовый состав продуктов синтеза определяли на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE фирмы «Bruker». Для идентификации кристаллических фаз использовались международная картотека Joint Comitee on Powder Diffraction Standarts 2003 и программное обеспечение DIFFRACPLUS фирмы «Bruker». Обработка профиля дифрактограмм осуществлялась с применением программного пакета HighScore Plus. Расчет среднего размера кристаллитов синтезированных материалов проводился по формуле Шеррера

$$d = K\lambda/\beta\cos\theta,$$

где $K = 1$,

$\lambda = 0,15418$ nm (Cu $K\alpha$ line),

β – ширина рефлекса на полувысоте,

θ – угол дифракции.

Фотокаталитические свойства полученных образцов исследовали по эффективности деструкции 10 мг/л раствора красителя прямого синего. В модельные сточные воды помещались навески катализатора ($C_{кат} = 500$ мг/л), затем стеклянный стакан с полученным раствором ставился на магнитную мешалку и обрабатывался ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут. Источником ультрафиолетового излучения служила ртутно-кварцевая лампа DRT-400, излучающая в диапазоне 240–320 нм и мощностью лучистой энергии 36 Вт.

Результаты

Рентгенофазовый анализ показал, что в результате синтеза во всех образцах преимущественно образуются фазы $FeAlO_3$. Лантан находится в соединении $La_{1,93}Al_{21,98}Fe_{2,02}O_{38,00}$. В образце с гексаметилентетраамином железо находится в виде гематита (Fe_2O_3). Образец, полученный с использованием лимонной кислоты, показал большой фон, однако на нем могут быть выделены пики $FeAlO_3$. Для образцов с мочевиной и глицином характерны пики для фаз $FeAlO_3$ и Fe_3O_4 . В данных образцах также наблюдается большой фон.

Полученный образец с использованием гексаметилентетраамина в качестве восстановителя был проанализирован на просвечивающем электронном микроскопе (рисунок 1).

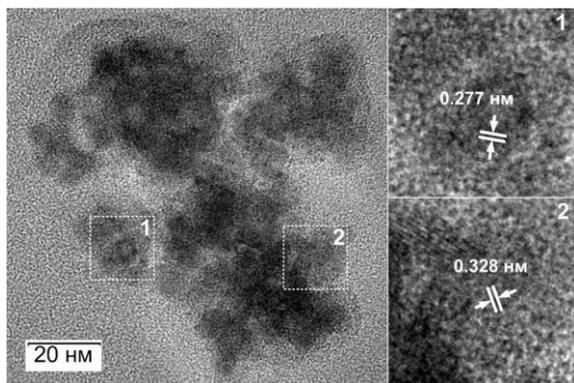


Рисунок 1 – ПЭМ фотография синтезированного образца с использованием гексаметилентетраамина

Измеренные межплоскостные расстояния 0,328 и 0,277 нм соответствуют пикам в районе 27,2 и 32,1 2theta. Данные пики характерны для фазы $FeAlO_3$ (ref. 96-210-1479) и $La_{1,93}Al_{21,98}Fe_{2,02}O_{38,00}$ (ref. 96-100-1417) соответственно.

Из рисунка 2 видно, что образец характеризуется узким распределением частиц по размерам и представляет собой преимущественно частицы 3,5–8,5 нм. Медианный диаметр проанализированных частиц составил 5,9 нм, минимальный диаметр частиц 3,7 нм, а максимальный 8,5 нм. Расчет размера кристаллита по формуле Шеррера для пика 33,06 2theta дает значение равное 74,0 нм при

использовании в качестве топлива гексаметилентетраамина. Данный пик характерен для гематита (ref. 96-101-1268).

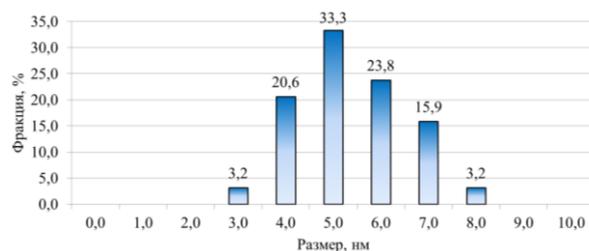
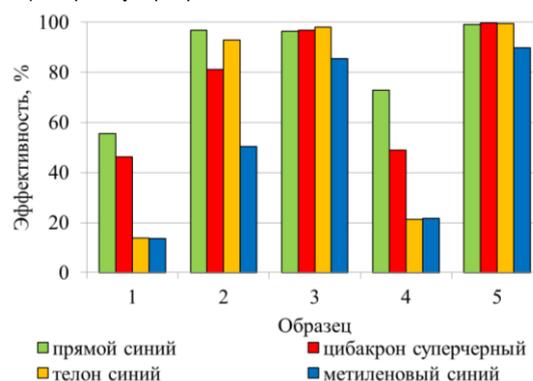


Рисунок 2 – Распределение частиц по размерам

Полученные образцы были использованы для фотокаталитической деструкции красителей различной природы (рисунок 3): прямой синий, цибаكرون суперчерный, телон синий, метиленовый синий.



1 – без катализатора; 2 – образец с глицином; 3 – образец с карбамидом; 4 – образец с лимонной кислотой; 5 – образец с гексаметилентетраамином

Рисунок 3 – Эффективность деструкции различных типов красителей

По данным, представленным на рисунке 3, видно, что все составы показали увеличение эффективности фотокаталитической деструкции. Наибольшей эффективностью отличаются образцы 3 и 5, полученные с использованием карбамида и гексаметилентетраамина. Эффективность деструкции красителя метиленового синего для них составила 85,5 и 89,9 % соответственно. Для остальных красителей эффективность деструкции составила 96,5–99,7 %. Менее эффективным оказался образец 4, полученный с использованием лимонной кислоты в качестве восстановителя. Эффективность деструкции метиленового синего составила 21,7 %, что на 8 % выше, чем при обработке только ультрафиолетом.

Заключение

Основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

- образец, синтезированный с использованием гексаметилентетраамина, характеризуется узким распределением частиц по размерам 3,5–8,5 нм;
- помимо соединений лантана в синтезированных образцах значительную долю занимают $FeAlO_3$;
- все полученные образцы показали высокую эффективность деструкции выбранных красителей;
- наибольшая эффективность деструкции красителей достигается с использованием образца, синтезированного с использованием гексаметилентетраамина, эффективность деструкции с его использованием достигает 99,7 % при дозе катализатора 500 мг/л и времени обработки 45 мин.

Список цитированных источников

1. Романовский, В. И. Магнитные сорбенты для удаления нефтепродуктов из водных сред / В. И. Романовский, О. Н. Горелая, А. А. Хорт // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь,

- Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2018. – Часть 1. – С. 215–216.
2. Modified activated carbon for deironing of underground water / D. Propolsky [et al.] // Environmental Research. – 2020. – Vol. 182. – P. 108996.
 3. Romanovskii, V. I. Modified Anthracites for Deironing of Underground Water / V. I. Romanovskii, A. A. Khort // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2017. – Vol. 39. – Issue 5. – P. 299–304.
 4. Получение каталитических материалов для водоподготовки и очистки сточных вод из отходов станций обезжелезивания / П. А. Клебеко [и др.] // Вода Magazine. – 2017. – № 6 (118). – С. 12–15.
 5. Клебеко, П. А. Очистка подземных вод от железа с использованием модифицированных антрацитов / П. А. Клебеко, В. И. Романовский // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2017. – № 3. – С. 104–109.
 6. Романовский, В. И. Модифицированные антрациты для очистки подземных вод от железа / В. И. Романовский, А. А. Хорт // Химия и технология воды. – 2017. – Т. 39, № 5. – С. 532–543.
 7. Получение каталитических материалов для водоподготовки и очистки сточных вод из отходов станций обезжелезивания / В. И. Романовский [и др.] // Вода magazine. – 2017. – № 6 (118). – С. 12–15.
 8. Романовский, В. И. Модифицированные антрациты для очистки подземных вод от железа / В. И. Романовский, А. А. Хорт // Химия и технология воды. – 2017. – Т. 39, № 5. – С. 532–543.
 9. Romanovskii, V. I. Modified Anthracites for Deironing of Underground Water / V. I. Romanovskii, A. A. Khort // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2017. – Vol. 39, Issue 5. – P. 299–304.
 10. Romanovskiy, V. I. One-step synthesis of polymetallic nanoparticles in air environment / V. I. Romanovski [et al.] // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. – 2018. – Vol. 61, No. 9–10. – P. 43–48.
 11. Железосодержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / В. И. Романовский [и др.] // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2019. – № 4. – С. 18–22.
 12. Романовский, В. И. Железо-цинк-содержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / В. И. Романовский, Д. М. Куличик, М. В. Пилипенко // Водоочистка. – 2019. – № 4 (178). – С. 71–77.
 13. Романовский, В. И. Железо-молибден-содержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / В. И. Романовский, Д. М. Куличик, М. В. Пилипенко // Водоочистка. – 2019. – № 6 (180). – С. 73–78.
 14. Venkaiah, G. Solution Combustion Synthesis and Characterization of Nano crystalline Lanthanum Ferrite using Glycine as a fuel / K. Venkateswara Rao, V. Sessa Sai Kumar / Intern. J. of Mater., Methods and Technologies. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 1–7.
 15. Perovskite LaFeO₃ montmorillonite nanocomposites: synthesis, interface characteristics and enhanced photocatalytic activity / K. Peng [et al.] // Scientific reports, 2016. – T. 6. – P. 19723.
 16. Controllable Synthesis of Pure-Phase LaFeO₃ with Porous Structure and their Catalytic Performance for Pollutants Degradation / M. Humayun [et al.] // SF Journal of Nanochemistry and Nanotechnology. – 2018. – Vol. 1. – Edition 1. – P. 5.
 17. Xu, K. Superior photocatalytic performance of LaFeO₃/gC₃N₄ heterojunction nanocomposites under visible light irradiation / K. Xu, J. Feng // RSC Advances, 2017. – T. 7, No. 72. – P. 45369–45376.
 18. Luminescence of lanthanum oxide obtained by a glycine-based solution combustion method / V. R. Orante Barrón [et al.] // XIV International Symposium on Solid State Dosimetry, Peru, 2014, April 13–16.
 19. Solution Combustion Synthesis and Magnetodielectric Properties of Nanostructured Rare Earth Ferrites / A. A. Saukhimov [et al.] // International Journal of Self-Propagating High Temperature Synthesis. – 2015. – Vol. 24, No. 2. – P. 63–71.
 20. Козловская, И. Ю. Кислотное выщелачивание лантана из отработанного катализатора крекинга / И. Ю. Козловская, В. Н. Марцуль // Журнал прикладной химии. – 2014. – № 12. – С. 24–30.
 21. Kozlowskaya, I. Yu. Acid Leaching of Lanthanum from Spent Cracking Catalyst / I. Yu. Kozlowskaya, V. N. Martsul // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87, No. 12. – P. 1817–1822.
 22. Martsul, V. N. Recovery of lanthanum from acid leaching solutions for leaching of spent cracking catalyst / V. N. Martsul, I. Yu. Kozlowskaya // J. of Appl. Chem. – 2015. – Vol. 88, Issue 10. – P. 1589–1593.
 23. tual'nye voprosy i perspektivy razvitiya transportnogo i stroitel'nogo kompleksov : materialy IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. : v 2 ch. / M-vo transp. i kommunikacij Resp. Belarus', Bel. zh. d., Belarus. gos. un-t transp. ; pod obshch. red. YU. I. Kulazhenko. – Gomeľ : Bel-GUT, 2018. – CHast' 1. – S. 215–216.
 24. Modified activated carbon for deironing of underground water / D. Propolsky [et al.] // Environmental Research. – 2020. – Vol. 182. – P. 108996.
 25. Romanovskii, V. I. Modified Anthracites for Deironing of Under-ground Water / V. I. Romanovskii, A. A. Khort // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2017. – Vol. 39. – Issue 5. – P. 299–304.
 26. Poluchenie kataliticheskikh materialov dlya vodopodgotovki i oshchistki stochnykh vod iz othodov stancij obezhelezivaniya / P. A. Klebeko [i dr.] // Voda Magazine. – 2017. – № 6 (118). – S. 12–15.
 27. Klebeko, P. A. Ochistka podzemnykh vod ot zheleza s ispol'zovaniem modifitsirovannykh antracitov / P. A. Klebeko, V. I. Romanovskij // Vesci Nacyyanal'naj akademii navuk Belarusi. Seryya himichnykh navuk. – 2017. – № 3. – S. 104–109.
 28. Romanovskiy, V. I. Modifitsirovannye antracity dlya oshchistki podzemnykh vod ot zheleza / V. I. Romanovskij, A. A. Hort // Himiya i tekhnologiya vody. – 2017. – T. 39, № 5. – S. 532–543.
 29. Poluchenie kataliticheskikh materialov dlya vodopodgotovki i oshchistki stochnykh vod iz othodov stancij obezhelezivaniya / V. I. Romanovskij [i dr.] // Voda magazine. – 2017. – № 6 (118). – S. 12–15.
 30. Romanovskij, V. I. Modifitsirovannye antracity dlya oshchistki podzemnykh vod ot zheleza / V. I. Romanovskij, A. A. Hort // Himiya i tekhnologiya vody. – 2017. – T. 39, № 5. – S. 532–543.
 31. Romanovskii, V. I. Modified Anthracites for Deironing of Underground Water / V. I. Romanovskii, A. A. Khort // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2017. – Vol. 39, Issue 5. – P. 299–304.
 32. Romanovskiy, V. I. One-step synthesis of polymetallic nano-particles in air environment / V. I. Romanovski [et al.] // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. – 2018. – Vol. 61, No. 9–10. – P. 43–48.
 33. ZHelezosoderzhashchie fotokatalizatory iz osadkov oshchistki promyvnykh vod fil'trov obezhelezivaniya / V. I. Romanovskij [i dr.] // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. – 2019. – № 4 (178). – S. 71–77.
 34. Romanovskij, V. I. ZHelezo-molibden-soderzhashchie fotokatalizatory iz osadkov oshchistki promyvnykh vod fil'trov obezhelezivaniya / V. I. Romanovskij, D. M. Kulichik, M. V. Pilipenko // Vodoochistka. – 2019. – № 6 (180). – S. 73–78.
 35. Venkaiah, G. Solution Combustion Synthesis and Characteri-zation of Nano crystalline Lanthanum Ferrite using Glycine as a fuel / K. Venkateswara Rao, V. Sessa Sai Kumar / Intern. J. of Mater., Methods and Technologies. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 1–7.
 36. Perovskite LaFeO₃ montmorillonite nanocomposites: synthesis, interface characteristics and enhanced photocatalytic activity / K. Peng [et al.] // Scientific reports, 2016. – T. 6. – P. 19723.
 37. Controllable Synthesis of Pure-Phase LaFeO₃ with Porous Structure and their Catalytic Performance for Pollutants Degradation / M. Humayun [et al.] // SF Journal of Nanochemistry and Nanotechnology. – 2018. – Vol. 1. – Edition 1. – P. 5.
 38. Xu, K. Superior photocatalytic performance of LaFeO₃/gC₃N₄ heterojunction nanocomposites under visible light irradiation / K. Xu, J. Feng // RSC Advances, 2017. – T. 7, No. 72. – P. 45369–45376.
 39. Luminescence of lanthanum oxide obtained by a glycine-based solution combustion method / V. R. Orante Barrón [et al.] // XIV International Symposium on Solid State Dosimetry, Peru, 2014, April 13–16.
 40. Solution Combustion Synthesis and Magnetodielectric Properties of Nanostructured Rare Earth Ferrites / A. A. Saukhimov [et al.] // International Journal of Self-Propagating High Temperature Synthesis. – 2015. – Vol. 24, No. 2. – P. 63–71.
 41. Kozlovskaya, I. YU. Kislotoe vyshchelachivanie lantana iz otrabotannogo katalizatora krekinga / I. YU. Kozlovskaya, V. N. Marcul' // ZHurnal prikladnoj himii. – 2014. – № 12. – С. 24–30.
 42. Kozlowskaya, I. Yu. Acid Leaching of Lanthanum from Spent Cracking Catalyst / I. Yu. Kozlowskaya, V. N. Martsul // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87, No. 12. – P. 1817–1822.
 43. Martsul, V. N. Recovery of lanthanum from acid leaching solutions for leaching of spent cracking catalyst / V. N. Martsul, I. Yu. Kozlowskaya // J. of Appl. Chem. – 2015. – Vol. 88, Issue 10. – P. 1589–1593.

References

1. Romanovskij, V. I. Magnitnye sorbenty dlya udaleniya nefte-produktov iz vodnyh sred / V. I. Romanovskij, O. N. Gorelaya, A. A. Hort // Ak-

Материал поступил в редакцию 10.12.2021

УПРАВЛЯЕМОЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ГОРЕНИЕ

В. С. Северянин

Д. т. н., профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь

Аннотация

В статье представлены основные качества высокофорсированного способа сжигания топлив. Показано, что главные затруднения в использовании метода заключаются в сравнительной новизне, когда проявляются не только достоинства, но и недостатки метода. Благодаря имеющимся разработкам способ регулируется, что позволяет рекомендовать использовать его в теплотехнических устройствах.

Ключевые слова: пульсирующее горение.

OPERATED PULSATING COMBUSTION

V. S. Severyanin

Abstract

It is shown that new method of burning fuel has some advantages and defects. Noise and vibrations are obstacles for wide using of pulse combusting in industry. It is proposed some means and equipments for improving of situation.

Keywords: pulsating combustion.

Введение

Особый метод сжигания топлива, так называемое пульсирующее горение, характерен рядом качеств, выделяющих его из общепринятых способов получения теплоты высокотемпературным окислением.

Метод известен и достаточно изучен сравнительно давно [1, 2, 3]. Подчеркивалось резкое повышение плотности тепловыделения, усиление конвективного теплообмена на ограничивающих поверхностях, самонаддув воздухом, очищающее действие на поверхности нагрева, отсутствие недожогов, распыливающее действие на жидкое топливо, широкий диапазон используемого топлива, уменьшение эксергетических потерь. Вместе с тем, проявились два весьма отрицательные действия – вибрации и сильное акустическое излучение. Это обусловило недопущение таких пульсационных режимов в высокофорсированных агрегатах, например в ракетных двигателях. Но существует множество слабонапряженных огневых устройств в энергетике, коммунальном хозяйстве и т. д., где требуется интенсификация рабочих процессов. Состояние метода пульсирующего горения в какой-то мере сравнимо с термоядерными проблемами, где широкое внедрение стопорится практической управляемостью. В связи с этим целесообразно рассмотреть вопросы регулируемости, конструкционной и прикладной диверсификации на базе известных и новых исследований.

Регулируемость процесса

Под регулируемостью понимается получение желаемого результата при определенном заданном воздействии на рабочую систему.

Процесс горения обусловлен подачей топлива, воздуха, удалением продуктов сгорания, поддержанием определенной температуры и давления в зоне реакции. Это обеспечивается конструкцией и действием вспомогательных механизмов и устройств.

Скорость горения зависит от эффективности обдувания топлива, обеспечивающим диффузию кислорода. Относительная скорость обдувания [4] частицы топлива:

$$W = \frac{W'}{2fu\tau} + \frac{z}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

по которой определяется критерий Пекле, $Pe = Wd/\Delta$, при амплитуде колебательной относительной скорости $z = z' \cdot W_{пульс}$,

где $W_{пульс} = P/(\rho c)$,

W' – суммарная скорость газа и начальной скорости частицы,

u – параметр ослабления начальной скорости частицы,

$$z' = \frac{1}{\sqrt{1+A^2}},$$

$$A = k\rho_{\Gamma}v / (\rho_z f d^2),$$

тогда скорость горения K_s тел зависит от обдувания:

$$2\lg K_s / (cD) = \lg Pe + \exp(-5,5\lg Pe) - 1 \quad (2)$$

где P – переменное давление,

A – параметр увлечения частицы газом,

f – частота,

τ – время ослабления начальной скорости,

V – вязкость газа;

ρ_{Γ} , $\rho_{\text{ч}}$ – плотности газа и частицы.

Поэтому очевиден путь регулирования скорости горения – это рост амплитуды переменного давления P . Эта амплитуда переменного давления $P = QG / (4Vf)$ [5],

где Q – теплота сгорания топлива,

G – его расход,

V – объем горения, легко изменяемые параметры.

Одним из трудно предотвращаемых вредных компонентов газообразных выбросов при горении являются окислы азота. Равновесная концентрация NO^P определяется формулой Я. Б. Зельдовича [6]:

$$NO^P = 4,6 \cdot 10^3 \sqrt{C_{N_2} \cdot C_{O_2}} \exp\left(\frac{-10800}{T}\right), \quad (3)$$

т. е. зависит от температуры процесса T при заданных исходных концентрациях азота C_{N_2} и кислорода C_{O_2} . При пульсирующем горении, вследствие затрат внутренней энергии на колебания, температура несколько снижается, и снижение окислов азота может достигнуть нескольких процентов, что дается выражением [6]:

$$NO_x = k \frac{\Delta T}{T_a - T''} Q^{0,5} \cdot \Gamma^{0,5} \cdot \tau \sqrt{C_{N_2} \cdot C_{O_2}} \exp\left(10,5 - \frac{38060}{T}\right), \quad (4)$$

Кроме того, длительность процесса τ сокращается, и при той же адиабатной температуре T_a температура на выхлопе T'' из-за интенсивного теплообмена так же снижается на внешнем периметре Π при заданной зоне реакции ΔT .

Важным свойством пульсирующего горения является возможность совмещения в одном объекте процессов горения и теплоотдачи, т. е. объединения топки и теплообменника. Оказалось [7], что в этом случае развиваются условия возбуждения автоколебаний давления и скорости течения газа в устройстве, т. е. повышается устойчивость рассматриваемого процесса. Это условие выражается следующим образом:

$$\left| \frac{I}{T_1} \cdot \frac{dT_2}{dW} \cdot \frac{W^2}{2} \rho \right| > \left[\zeta + \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right] \left(W\rho + \frac{W^2}{2} \cdot \frac{d\rho}{dW} \right) \quad (5)$$

где T_1, T_2 – температуры газа до и после теплообменника,

W – скорость газа,

ρ – его плотность,

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления теплообменника.

Регулировать частоту пульсаций можно изменением длины резонансной трубы камеры пульсирующего горения [8], это наиболее простой метод изменения в процессе работы устройства частоты.

Частоту можно регулировать также колеблющимися шиберами [9] или периодической подачей воздуха в топку [10].

Вводом в пульсирующую газовую струю различных тел и приспособлений, например - порция воды, дробь, порошок и пр. изменяется не только внутренний процесс, но и воздействие на окружающие предметы [11], или сочетать с другими технологическими процессами (нагрев на вибрирующей плоскости [12]).

Вышеприведенные зависимости (1, 2, 3, 4, 5) и ряд физических указанных особенностей подтверждают высокую регулируемость процесса пульсирующего горения различных топлив.

Конструкционная и прикладная диверсификация

Разнообразие (диверсификация) технической реализации метода пульсирующего горения является следствием управляемости этого высокофорсированного метода, т. е. возможности решения многих практических задач.

Общие зависимости, связывающие конструкционные и режимные характеристики материальной реализации метода, можно дать следующей системой уравнений и физических связей [3]:

$$\begin{aligned} f &= \frac{20\sqrt{T}}{4L} = a \sqrt{\frac{S_0}{V_G}} \\ P &= \frac{L_{AK}}{L_{PT}} \cdot \frac{V_B^\circ \cdot G}{S_{AK}} \\ S_{AK} &= G(V_G^\circ - V_B^\circ) \frac{\rho_B}{\rho_G} \cdot \frac{L_{PT}}{L_{AK}} \cdot \frac{1}{10\sqrt{T}} \\ a &= \lambda f = \lambda / T; \lambda = 4L_{PT} \\ \frac{4df\rho_G a}{P} &= \frac{1}{\sqrt{1+A^2}} \\ A &= k \frac{\rho_G \cdot v}{\rho_G \cdot fd^2} \\ \tau &\leq \frac{L_{PT} \cdot S_{PT}}{V_G^\circ \cdot G \cdot T/273}, \tau = \frac{\rho_A}{2} \int_0^2 \frac{d(d)}{K_S} \\ S_{PT} &= \frac{\tau V_G^\circ \cdot G}{L_{PT}}, S_{AK} = \frac{2G\rho_B L_{PT}}{\rho_G L_{AK} 10\sqrt{T}} \\ L_{AK} &= \frac{2S_{AK} \cdot G \cdot \rho_B \cdot L_{PT}}{\rho_G \cdot 10\sqrt{T}}, L_{PT} = \frac{\tau V_G^\circ G}{S_{PT}} \\ L_{AK} &= 0,04\lambda; S_{AK} = 0,6S_{PT}; L_{PT} \neq d_{PT} > 5 \end{aligned}$$

где L, S – длины сечения резонансных труб и аэродинамических клапанов,

a – скорость звука,

λ – длина волны,

d – диаметр,

V° – удельные объёмы,

V – вязкость газа.

Теоретические выкладки и экспериментальные проверки, опробование в опытных установках и в ряде промышленных приложений показали следующие качества метода пульсирующего горения:

- 1) Видимое отсутствие топки. Высокая интенсификация химических реакций позволяет без опасения недожогов выводить теплоту непосредственно из факела.
- 2) Гибкость компоновочных решений. Кроме малых удельных по мощности габаритов устройства допускают любую ориентацию, изменение формы, различные взаимные компоновки.
- 3) Пониженные требования к топливу. Мощная турбулизация, распыляющее действие колеблющегося газового потока дает возможность подавать на форсунки (горелки) низконапорное слабоочищенное топливо.
- 4) Возможное выделение конденсата. Охлаждение продуктов сгорания при интенсивном теплообмене повышает КПД горения, но требует защиты элементов устройства.
- 5) Снижение расхода энергии на собственные нужды. Реализуемый режим «самовсаса» воздуха объясняется работой аэродинамических клапанов. Поэтому в ряде случаев можно обходиться без дутьевых вентиляторов и дымососов.
- 6) Унификация по топливу. Одно и то же устройство, например в виде камеры пульсирующего горения, обеспечивает режим как на разнообразном жидком, так и газообразном топливе.
- 7) Модульный принцип увеличения мощности теплогенератора с пульсирующим горением. Отдельные автономные агрегаты могут при необходимости группироваться в компактной сборке [13].

Всё это увеличивает управляемость метода, что необходимо для разработки способов воздействия. Однако перечисленные достоинства подчеркивают экологические и механические затруднения – шум и вибрации. Если устранение недопустимых вибраций можно считать решенной проблемой,

то акустическое загрязнение окружающей среды требует особого внимания. Физическая особенность пульсирующего горения – колебательный характер термодинамического состояния рабочего тела – газообразных продуктов сгорания. Подача воздуха и удаление газа определяют открытую связь с внешней средой, и на этой линии необходимы специальные устройства или мероприятия, снижающие акустическое излучение. Если для космических условий можно резко увеличивать амплитуды пульсаций (как в детонационных двигателях), то промышленное применение пульсирующего горения, чтобы оставить достоинства метода, невозможно без акустической защиты. Это не должно снижать управляемость, т. е. широкую применимость высокофорсированного процесса сжигания топлив. Ведущая разработка в этом направлении обнадеживает.

В качестве примера, достаточно простого для использования в коммунальной технике или малой энергетике, можно указать на способ подавления излучаемых акустических колебаний при помощи поглощения энергии колебаний массой воды, разбиваемой пульсирующей воздушной или газовой струей [14]. Эксперимент показал снижение звукового давления со 125 Дб до 102 Дб на объеме воды 30–50 л, расход топлива 20 кг/час. Изменением подачи воды регулировался уровень шума.

Предложено механическое устройство [15], в котором фаза повышенного акустического давления совмещается с перекрытием подачи воздуха, а фаза пониженного давления совмещается с временем подачи воздуха, частота перекрытия и подача воздуха сравнивается с частотой пульсаций в устройстве пульсирующего горения. Так решается задача уменьшения излучения звука в окружающую среду по потоку подаваемого воздуха.

В глушителе по [16] используется крутка пульсирующего газового потока на поглотительных патронах. Таких глушителей устанавливается несколько параллельно для устройств повышенной мощности.

Для уменьшения шума при вибрациях клапанов используются шаровидные мягкие элементы [17], своей формой позволяющие увеличить общий ресурс установки.

Весьма перспективным теплогенератором является устройство пульсирующего горения, скопированное с циклонной топкой [18] в качестве дожигающего элемента, или в качестве механизма наддува [19].

Устройство пульсирующего горения может выполнять роль газовой турбины [20]. Выполнен воздухоподогреватель на этой основе, показавший удобство его использования при строительстве, сушке сельхозпродукции.

Отдельное самостоятельное направление в точечной технике – так называемое слоевое пульсирующее горение [21] с уменьшенной шумностью. Предложена топка [22] для твердого кускового топлива и для жидкого топлива [23, 24].

Снижение акустического загрязнения устройствами пульсирующего горения можно также применением противофазных схем (соответствующая настройка нескольких устройств [25]), применением звуковых экранов, звукопоглощающих покрытий.

Следует указать, что особых требований к материалу конструкций описываемые установки не требуют. Избегать вибраций можно конструктивным путем, а тепловые нагрузки выдерживаются соответствующими материалами.

Регулирование действия устройств пульсирующего горения производится обычными теплотехническими приемами.

Выводы

- 1) Несмотря на сложные физические процессы при пульсирующем горении топлив, промышленное его использование доступно с целью интенсификации многих технологических направлений благодаря ряду положительных качеств метода.
- 2) Имеющиеся и проводимые исследования по пульсирующему горению позволяют выбрать требуемое техническое решение для конкретных применений.
- 3) Акустические недостатки метода имеют пути их преодоления.

Список цитированных источников

1. Раушенбах, Б. В. Вибрационное горение / Б. В. Раушенбах. – М. : Физматгиз, 1961. – 325 с.
2. Подымов, В. Н. Прикладные исследования вибрационного горения / В. Н. Подымов, В. С. Северянин, Я. М. Щелоков. – Казань : Изд.-во Казанского ун-та, 1978. – 215 с.
3. Попов, В. А. Технологическое пульсационное горение / В. А. Попов, В. С. Северянин, А. М. Аввакумов. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 316 с.
4. Северянин, В. С. Горение частицы топлива в пульсирующем потоке / В. С. Северянин // Известия вузов. Серия Энергетика. – 1975. – № 6. – С. 144–147.
5. Северянин, В. С. Оценка амплитуды давления при пульсирующем горении / В. С. Северянин, В. М. Яскевич // Известия вузов. Серия Энергетика. – 1983. – № 2. – С. 89–90.
6. Горбачева, М. Г. О снижении выхода окислов азота при пульсирующем горении / В. С. Северянин, М. Г. Горбачева // Известия вузов. Серия Энергетика. – 1987. – № 1. – С. 77–79.
7. Северянин, В. С. О нагревателях с пульсирующим горением / В. С. Северянин // Известия вузов. Серия Энергетика. – 1974. – № 5. – С. 142–146.
8. Камера пульсирующего горения горением / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 348821, F 23 C 3/02, 1972.
9. Устройство для сжигания топлива горением / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 251742, F 23 D.
10. Способ подачи воздуха в топку : пат. 5867 ВУ : МПК⁷ F 23G 5/00 / Северянин В. С., Черников И. А. (ВУ) ; заявитель и патентообладатель учреждения образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ). – № а 20000961 ; заявл. 25.10.2000 ; опубл. 30.03.04. – 4 с. : ил.
11. Способ очистки наружных поверхностей нагрева / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 362981, F 28 G 1/16, 1972.
12. Способ нагрева жидкостей / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 1813979-A1, F 23 C 11/04, 1992.
13. Северянин, В. С. Котлы с пульсирующим горением / В. С. Северянин // Известия вузов. Серия Энергетика. – 2001. – № 1. – С. 79–86.
14. Северянин, В. С. Способ работы камеры пульсирующего горения / В. С. Северянин, М. Г. Горбачева, Л. Д. Субботкин. Авторское свидетельство СССР № 1192468-A1, F 23 C 11/04, 1983.
15. Способ глушения шума в устройстве пульсирующего горения : пат. 14942 ВУ : МПК F 23C 15/00 (2006.01) / Северянин В. С. (ВУ) ; заявитель и патентообладатель учреждения образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ). – № а 20091082 ; заявл. 17.07.09 ; опубл. 30.10.2011. – 4 с. : ил.
16. Глушитель шума : а. с. 1483059 SU : МКИ⁴ F 01 N 1/08 / В. Н. Донской [и др.] (SU). – № 4320525/25-06 ; заявл. 26.10.87 ; опубл. 30.05.89, Бюл. № 20. – 6 с. : ил.
17. Устройство пульсирующего горения : пат. 5191 ВУ : МПК⁷ F 23C 11/04 / Северянин В. С. (ВУ) ; заявитель и патентообладатель учреждения образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ). – № а 19990978 ; заявл. 01.11.99 ; опубл. 30.06.03. – 3 с. : ил.
18. Способ сжигания топлива / В. В. Лариошин, В. Д. Ельшов, В. С. Северянин. Патент РБ № 3337-C1, F 23 C 11/04, 2000.
19. Циклонная топка : пат. 976 ВУ : МПК⁷ F 23C 11/04 / Северянин В. С. (ВУ) ; заявитель и патентообладатель учреждения образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ). – № а 20020356 ; заявл. 27.11.02 ; опубл. 30.09.03. – 2 с. : ил.
20. Устройство для пульсирующего сжигания топлива : а. с. 870854 SU : М. Кл.³ F 23 C 11/04, F 24 N 3/02 / В. С. Северянин, И. Н. Наливайко (SU). – № 2827708/24-06 ; заявл. 10.10.79 ; опубл. 07.10.81, Бюл. № 37. – 2 с. : ил.
21. Камерная топка / В. С. Северянин, П. Я. Лысков. Авторское свидетельство СССР № 228216, F 23 C 11/01, 1968.
22. Топка ПУЛЬСАР-10 / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 1768869-A1, F 23 D 11/04, 1992.

23. Горелка : пат. 5192 BY : МПК⁷ F 23D 5/00 / Северянин В. С. (BY) ; заявитель и патентообладатель учреждение образования "Брестский государственный технический университет" (BY). – № а 19990996 ; заявл. 10.11.99 ; опубл. 30.06.03. – 3 с. : ил.
24. Горелка : пат. 10751 BY : МПК F 23D 5/00 (2006.01) / Северянин В. С. ; заявитель и патентообладатель учреждение образования "Брестский государственный технический университет" (BY). – № u 20150063 ; заявл. 10.02.15 ; опубл. 30.08.15. – 3 с. : ил.
25. Северянин, В. С. Антифоны в теплотехнике / В. С. Северянин // Инженер-механик. – 2019. – № 4. – С. 4–11.
13. Severyanin, V. S. Kotly s pul'siruyushchim goreniem / V. S. Severyanin // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 2001. – № 1. – С. 79–86.
14. Severyanin, V. S. Sposob raboty kamery pul'siruyushchego goreniya / V. S. Severyanin, M. G. Gorbacheva, L. D. Subbotkin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1192468-A1, F 23 S 11/04, 1983.
15. Sposob glusheniya shuma v ustrojstve pul'siruyushchego goreniya : pat. 14942 BY : МПК F 23C 15/00 (2006.01) / Severyanin V. S. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № а 20091082 ; заявл. 17.07.09 ; опубл. 30.10.2011. – 4 с. : ил.
16. Glushitel' shuma : a. s. 1483059 SU : MKI⁴ F 01 N 1/08 / V. N. Donskoj [i dr.] (SU). – № 4320525/25-06 ; заявл. 26.10.87 ; опубл. 30.05.89, Byul. № 20. – 6 с. : ил.
17. Ustrojstvo pul'siruyushchego goreniya : pat. 5191 BY : МПК⁷ F 23C 11/04 / Severyanin V. S. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № а 19990978 ; заявл. 01.11.99 ; опубл. 30.06.03. – 3 с. : ил.
18. Sposob szhiganiya topliva / V. V. Larioshin, V. D. El'shov, V. S. Severyanin. Patent RB № 3337-S1, F 23 S 11/04, 2000.
19. Ciklonnaya topka : pat. 976 BY : МПК⁷ F 23C 11/04 / Severyanin V. S. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № u 20020356 ; заявл. 27.11.02 ; опубл. 30.09.03. – 2 с. : ил.
20. Ustrojstvo dlya pul'siruyushchego szhiganiya topliva : a. s. 870854 SU : M. Kl.³ F 23 S 11/04, F 24 N 3/02 / V. S. Severyanin, I. N. Nalivajko (SU). – № 2827708/24-06 ; заявл. 10.10.79 ; опубл. 07.10.81, Byul. № 37. – 2 с. : ил.
21. Kamernaya topka / V. S. Severyanin, P. YA. Lyskov. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 228216, F 23 C 11/01, 1968.
22. Topka PUL'SAR-10 / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1768869-A1, F 23 D 11/04, 1992.
23. Gorelka : pat. 5192 BY : МПК⁷ F 23D 5/00 / Severyanin V. S. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № а 19990996 ; заявл. 10.11.99 ; опубл. 30.06.03. – 3 с. : ил.
24. Gorelka : pat. 10751 BY : МПК F 23D 5/00 (2006.01) / Severyanin V. S. ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № u 20150063 ; заявл. 10.02.15 ; опубл. 30.08.15. – 3 с. : ил.
25. Severyanin, V. S. Antifony v teplotekhnike / V. S. Severyanin // Inzhener-mekhanik. – 2019. – № 4. – С. 4–11.

References

1. Raushenbah, B. V. Vibracionnoe gorenie / B. V. Raushenbah. – М. : Fizmatgiz, 1961. – 325 s.
2. Podymov, V. N. Prikladnye issledovaniya vibracionnogo goreniya / V. N. Podymov, V. S. Severyanin, YA. M. SHCHelokov. – Kazan' : Izd.-vo Kazanskogo un-ta, 1978. – 215 s.
3. Popov, V. A. Tekhnologicheskoe pul'sacionnoe gorenie / V. A. Popov, V. S. Severyanin, A. M. Avvakumov. – М. : Energoatomiz-dat, 1993. – 316 s.
4. Severyanin, V. S. Gorenie chasticy topliva v pul'siruyushchem potoke / V. S. Severyanin // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 1975. – № 6. – С. 144–147.
5. Severyanin, V. S. Ocenka amplitudy davleniya pri pul'siruyushchem goreanii / V. S. Severyanin, V. M. YASkevich // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 1983. – № 2. – С. 89–90.
6. Gorbacheva, M. G. O snizhenii vyhoda kislov azota pri pul'siruyushchem goreanii / V. S. Severyanin, M. G. Gorbacheva // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 1987. – № 1. – С. 77–79.
7. Severyanin, V. S. O nagrevatelyah s pul'siruyushchim goreniem / V. S. Severyanin // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 1974. – № 5. – С. 142–146.
8. Kamera pul'siruyushchego goreniya goreniem / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 348821, F 23 S 3/02, 1972.
9. Ustrojstvo dlya szhiganiya topliva goreniem / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 251742, F 23 D.
10. Sposob podachi vozduha v topku : pat. 5867 BY : МПК⁷ F 23G 5/00 / Severyanin V. S., CHernikov I. A. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № а 20000961 ; заявл. 25.10.2000 ; опубл. 30.03.04. – 4 с. : ил.
11. Sposob oчитки naruzhnyh poverhnostej nagreva / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 362981, F 28 G 1/16, 1972.
12. Sposob nagreva zhidkostej / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1813979-A1, F 23 C 11/04, 1992.

Материал поступил в редакцию 06.12.2021

ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПОВЫШЕННОЙ ВОДОСТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ ЗАЩИТЫ БЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Э. А. Тур¹, С. В. Басов²

¹К. т. н., доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: tur.elina@mail.ru

²К. т. н., доцент, доцент кафедры инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: basovs@mail.ru

Реферат

Для бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений Республики Беларусь первостепенное значение имеют условия их эксплуатации в пресной воде. Целью работы являлась разработка рецептур красок на основе полимеров с различными температурами стеклования и различным соотношением метилметакрилата и n-бутилакрилата в полимере, обладающих низким водопоглощением и повышенной устойчивостью с воздействием воды. Это позволило бы использовать их для защиты бетонных и железобетонных гидротехнических сооружений. Лабораторные испытания красок продемонстрировали прямую зависимость физико-механических показателей защитных покрытий на их основе от состава и физико-химических свойств акриловых сополимеров. Правильный выбор проектных и конструкторских решений, совместная работа конструкторов и специалистов по коррозии позволяет максимально снизить коррозионную нагрузку на гидротехнические сооружения.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы, водостойкость, защита бетонных конструкций, гидротехнические сооружения.

PAINTS WITH INCREASED WATER RESISTANCE TO PROTECT CONCRETE BUILDING STRUCTURES OF HYDRAULIC FACILITIES

E. A. Tur, S. V. Basov

Abstract

For concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures of the Republic of Belarus, the conditions of their operation in fresh water are of paramount importance. The aim of the work was to develop formulations of paints based on polymers with different glass transition temperatures and different ratios of methyl methacrylate and n-butyl acrylate in the polymer, which have low water absorption and increased resistance to water. This would allow them to be used to protect concrete and reinforced concrete hydraulic structures. Laboratory tests of paints have shown a direct dependence of the physical and mechanical properties of protective coatings based on them on the composition and physicochemical properties of acrylic copolymers. The correct choice of design and engineering solutions, the joint work of designers and corrosion specialists allows to minimize the corrosion load on hydraulic structures.

Keywords: paints, increased water resistance, protect concrete building structures, hydraulic facilities.

Введение

При разработке новых лакокрасочных материалов (ЛКМ) для защиты бетонных строительных конструкций гидротехнических сооружений, как правило, руководствуются основными факторами, определяющими агрессивность среды, а именно: параметрами климата в месте расположения объекта, условиями эксплуатации конструкции. Для воздушных сред учитывают агрессивность газов в зависимости от их вида и концентрации, наличие солей, аэрозоль и пыли; для водных сред – показатель pH, концентрацию кислорода, суммарную концентрацию сульфатов и хлоридов, жесткость, наличие биологических факторов, скорость потока и наличие в нем абразивных частиц. При учете воздействий по условиям эксплуатации различают воздействие открытой атмосферы (солнечная радиация, атмосферные осадки), постоянное воздействие пресной (речной) воды или ее периодическое воздействие (вода – воздух), воздействие морской воды длительное или периодическое (вода – воздух) [1].

Для бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений Республики Беларусь первостепенное значение имеют условия их эксплуатации в пресной воде. Природные воды имеют различные параметры, влияющие на коррозионные процессы бетонных конструкций и сооружений: жесткость (в частности, содержание гидрокарбонатов), которая зависит от самых разных причин: вида промышленных и бытовых загрязнений, природы подстилающих пород; а также солесодержание.

Основными критериями выбора ЛКМ для защиты бетонных и железобетонных конструкций и сооружений от коррозии являются: соответствие материала условиям эксплуатации, прогнозируемый срок службы до первого ремонта, условия нанесения, требования к подготовке поверхности под окраску, адгезионные свойства, физико-механические свойства, стойкость к воздействию речной воды,

стойкость к ультрафиолетовому облучению, стойкость к воздействию химических веществ; сопротивление истиранию и удару, экологичность, время высыхания при производстве работ, стойкость к воздействию бактерий (биокоррозии), простота текущих ремонтов покрытия; требования к цвету и внешнему виду покрытия, срок годности при хранении, стоимость системы защиты в целом с учетом затрат на подготовку поверхности [2, 3].

Основой любого ЛКМ является плёнкообразующий полимер. Его назначение – образовывать когезионную плёнку на минеральной или металлической подложке, обладающую определённым комплексом свойств, а также связывать все нелетучие компоненты покрытия, в особенности пигменты и наполнители, в единую гармоничную композицию [1]. В настоящее время акриловые сополимеры являются одним из универсальных плёнкообразователей для ЛКМ. Важнейшие физические свойства, обуславливающие область применения акриловых сополимеров, определяются величиной средней молекулярной массы (среднемассовой, среднечисловой), молекулярно-массовым распределением и температурой стеклования [4]. Традиционные ЛКМ для минеральных поверхностей отличаются друг от друга содержанием плёнкообразователя и объёмной концентрацией пигмента (ОКП). Композиции с низким ОКП и высоким содержанием плёнкообразователя обладают, как правило, хорошей водостойкостью.

Основная часть

Целью настоящей работы являлась разработка рецептур ЛКМ на основе полимеров с различными температурами стеклования и различным соотношением метилметакрилата и n-бутилакрилата в полимере, обладающих низким водопоглощением и повышенной устойчивостью с воздействием воды, что позволило бы использовать

ЛКМ для защиты бетонных и железобетонных гидротехнических сооружений, а также хорошими физико-механическими показателями, устойчивостью к ультрафиолетовому облучению и стабильностью при хранении.

В качестве наполнителей были выбраны природный карбонат кальция (мраморный порошок) различного фракционного состава и микротальк для повышения укрывистости лакокрасочного покрытия (ЛКП), в качестве пигмента – диоксид титана рутильной формы, полученный хлоридным методом. Диоксид титана рутильной формы отличается повышенной белизной благодаря поверхностной обработке оксидами алюминия, кремния и соединениями циркония, а также высокой устойчивостью к фотоокислительной деструкции. Более высокий коэффициент преломления обеспечивает пигменту рутильной модификации большую укрывистость, что является его основным преимуществом по сравнению с анатазом [5].

Рецептуры содержали комплекс функциональных добавок: диспергаторы, пластификаторы, агенты реологии, альгидид, обеспечивающий биозащиту ЛКП. Для получения покрытия с эффектом скатывания капель (эффект «лотоса») в композиции была включена гидрофобизирующая добавка. В состав ЛКМ для предотвращения разрушения ЛКП под действием биокоррозии добавляли соединения с альгидидной или фунгицидной активностью. Во избежание образования дефектов покрытия (кратеры, «рыбий глаз», ячейки Бенарда) требуется оптимальный выбор содержания функциональных добавок [6].

Процесс испарения растворителя влияет на образование пленки ЛКМ. В процессе высыхания полимерные частицы сближаются и, по мере испарения растворителя, контактируя друг с другом, образуют гель. На этой стадии резко повышается вязкость материала. При дальнейшем испарении растворителя из пленки адсорбционно-сольватные оболочки на поверхности глобул разрушаются, капиллярное давление и поверхностное натяжение прижимают частицы друг к другу, сильно деформируя их. Частицы теряют шарообразную форму и принимают вид плотно уложенных многогранников; образуется так называемая «псевдопленка». На последней стадии полимерные цепи диффундируют через границы соприкосновения частиц. В результате межфазная граница ликвидируется, полимерные частицы сливаются (коалесцируют) в точках соприкосновения, образуя сплошную пленку [7].

Физико-химические показатели пленкообразователей ЛКМ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические показатели пленкообразователей ЛКМ

| Показатель | Полимер № 1 (Россия) | Полимер № 2 (США) | Полимер № 3 (Нидерланды) | Полимер № 4 (Германия) |
|--|----------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| Температура стеклования (средняя точка, T _g), °С | 60 | 63 | 62 | 61 |
| Среднемассовая молекулярная масса Mw (±2) | 59 000 | 60 000 | 60 000 | 60 000 |
| Содержание метилметакрилата в полимере, % по массе | 23,0 | 33,0 | 28,0 | 26,0 |
| Кислотное число, мг КОН/г 40 %-го раствора полимера в толуоле | 8,2 | 6,2 | 6,3 | 6,9 |
| Твердость свободной пленки полимера по Кёнигу, абс. ед. | 10 | 15 | 14 | 13 |
| Вязкость 40 %-го раствора полимера в толуоле по вискозиметру Брукфилда RV DV-II (шпиндель 2, скорость 60 об/мин, 25 °С), мПа·с | 390 | 425 | 412 | 408 |

Раствор полимера № 1, обладающего более низким содержанием метилметакрилата в полимере, имеет наименьшую динамическую вязкость, что свидетельствует о более низкой молекулярной массе полимера, более высокое кислотное число, что свидетельствует о гораздо большем количестве концевых групп полимерной цепи [8]. Следствием этого явилась самая низкая твердость по Кёнигу свободных пленок полимера № 1. Этот показатель прочности полимерных пленок является крайне важным и входит в технические требования, предъявляемые к лакокрасочным материалам, работающим под нагрузкой.

На основе данных полимеров на лабораторном диссольтвере были изготовлены краски для минеральных поверхностей по идентичным, отработанным и оптимизированным рецептурам. Краски содержали достаточно высокое количество пигментов и наполнителей, равномерно распределённых в полимерной матрице. В состав композиции вошли 12–13 масс.% полимера, 18–19 масс.% толуола, 0,5–0,7 масс.% диспергатора, 2,5–2,7 масс.% пластификатора, 11–12 масс.% диоксида титана рутильной формы, 45–49 масс.% микромраморного наполнителя и комплекс функциональных добавок.

Так как высоконаполненные краски – это многокомпонентные гетерогенные системы с высокоразвитыми поверхностями раздела фаз, механизм формирования покрытий достаточно сложен. Без проведения предварительных лабораторных испытаний проблематично судить о стойкости покрытия как к статическому воздействию воды, так и к воздействию щелочных сред (новые бетонные и железобетонные конструкции и изделия гидротехнических сооружений). Многие эксплуатационные показатели напрямую зависят не только от рецептуры, но и от физико-химических свойств плёнообразующего полимера [9]. Результаты лабораторных испытаний красок, изготовленных на основе акриловых сополимеров и произведенных по стандартным методикам [10, 11], приведены в таблице 2.

Массовую долю нелетучих веществ, коэффициент диффузного отражения, водопоглощение и твердость определяли на стекле для фотографических пластинок размером 90x120x2 мм. Эластичность определяли на пластинках прямоугольной формы из алюминиевых лент размером 150x20 мм, толщиной 0,25–0,32 мм. Для определения коэффициента диффузного отражения, эластичности, времени высыхания краски наносили в один слой толщиной 90–120 мкм. Для определения твердости и адгезии к стеклу краски наносили в два слоя толщиной 200–250 мкм. Продолжительность сушки каждого слоя – 1 ч при температуре (20±2) °С. Для определения адгезии краски наносили на подложку в два слоя кистью или аппликатором. Продолжительность сушки каждого слоя составляла 10 мин. После нанесения второго слоя на краски сразу же накладывали стеклоткань, заранее обезжиренную ацетоном и высушенную, таким образом, чтобы оставшийся свободным участок стеклоткани мог быть отогнут в противоположном направлении на длину, превышающую длину подложки на 20–30 мм. Стеклоткань плотно прижимали кистью к подложке и поверх нее наносили один слой краски толщиной 80–120 мкм, полностью смачивая стеклоткань и удаляя все неровности и пузыри. Общая толщина сухой пленки под стеклотканью 150–200 мкм. Адгезию определяли методом отслаивания. Для определения укрывистости материалы наносили послойно. Толщина мокрого слоя – 20 мкм. Первый и последующие слои сушили в течение 10 мин при температуре (20±2) °С. Количество образцов для испытания каждого показателя – не менее 5 [10].

При определении массовой доли нелетучих веществ навеску краски массой (2,0±0,2) г выдерживали в течение 3 ч в термощкафу при температуре (105±2) °С, после чего взвешивали. Последующее взвешивание осуществляли через каждые 30 мин до достижения постоянной массы. Коэффициент диффузного отражения определяли на приборе ФБ-2 с геометрией 45°/0°. Измерения производили согласно инструкции к прибору. Укрывистость определяли по методу шахматной доски. После полного укрытия окрашенную стеклянную пластинку сушили в течение 1 ч при температуре (20±2) °С и взвешивали с точностью до 0,0002 г.

Стойкость ЛКП к статическому воздействию воды определяли согласно [9], по методу А. В эксикатор с дистиллированной водой на специальных подставках, изготовленных из химически стойкого материала, вертикально помещали образцы на 2/3 высоты или целиком. Расстояние между образцами и стенками эксикатора составляло

не менее 10 мм. После испытания покрытие выдерживали перед осмотром при температуре (20±2) °С в течение 30 мин. Не наблюдалось отслаивания покрытия от подложки, пожелтения, сморщивания, появления мелких и крупных пузырей. Дефекты, обнаруженные на расстоянии менее 10 мм от края покрытия, не учитывали.

Условную светостойкость определяли согласно [10], метод 2. ЛКП облучали ртутно-кварцевой лампой типа ПРК-2 в течение 24 часов. Испытания проводили в течение 8 ч в сутки с максимальными перепадами не более 48 ч.

Таблица 2 – Результаты лабораторных испытаний красок

| Наименование показателя | Величина показателя | | | |
|---|---------------------------|-----------|-----------|----------|
| | Краска на основе полимера | | | |
| | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 |
| Условная вязкость по вискозиметру ВЗ-246 с соплом 4 мм при t = 21 °С, с | 82 | 92 | 90 | 88 |
| Массовая доля нелетучих веществ, % | 77 | 77 | 77 | 77 |
| Время высыхания до степени 2, мин | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Время высыхания до степени 3, мин | 10 | 8 | 9 | 9 |
| Коэффициент диффузного отражения (белизна), % | 85,2 | 85,3 | 85,3 | 85,2 |
| Укрывистость высушенной пленки, г/м ² | 155 | 155 | 155 | 155 |
| Эластичность пленки при изгибе через 48 часов, Ø стержня, мм | 12 | 10 | 12 | 12 |
| Твердость пленки эмали по прибору ТМЛ, маятник А (по Кёнигу) через 48 часов, усл. ед. | 0,23 | 0,27 | 0,25 | 0,23 |
| Адгезия к цементобетону, Н/см, не менее | 9,7 | 9,9 | 9,7 | 9,7 |
| Стойкость покрытия к статическому воздействию воды, ч | более 72 | более 72 | более 72 | более 72 |
| Условная светостойкость (изменение коэффициента диффузного отражения) после 168 ч облучения, % | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 1,1 |
| Устойчивость лакокрасочного покрытия к действию 10%-го водного раствора NaOH в течение 24 часов | нет | устойчиво | устойчиво | нет |

Дополнительно было исследовано водопоглощение ЛКМ на различных пленкообразователях в нескольких комбинациях пленкообразователя, пигментов, наполнителей и функциональных добавок.

Водопоглощение определяли на стеклянных подложках. Толщина сухого слоя составляла 370-380 мкм. Полученные покрытия сушили 24 ч при температуре (20±2) °С, погружали в дистиллированную воду и выдерживали в термостате 24 ч при (20±2) °С. После извлечения из воды стеклянные пластинки с покрытиями осушали фильтровальной бумагой и взвешивали с точностью до 0,001 г. Водопоглощение W(%) рассчитывали по формуле (1):

$$W = (m_2 - m_1) \cdot 100 / (m_1 - m_0), \quad (1)$$

где m₀ – масса чистой пластинки, г;

m₁ – масса пластинки с покрытием до испытания, г;

m₂ – масса пластинки с покрытием после испытания, г.

За результат принимали среднее арифметическое трёх параллельных измерений, округлённых до 0,1 г. Допускаемое расхождение между измерениями не превышало 10 % относительно среднего результата.

Результаты определения водопоглощения ЛКП приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения водопоглощения ЛКП

| Исследуемое ЛКП | Водопоглощение, %, через | | | |
|---|--------------------------|-------|-------|-------|
| | 1 сут | 2 сут | 3 сут | 7 сут |
| Полимер № 1 (Россия), Рецептура № 1 | 0,36 | 0,50 | 0,53 | 0,73 |
| Полимер № 1 (Россия), Рецептура № 2 | 0,45 | 0,64 | 0,716 | 0,94 |
| Полимер № 1 (Россия), Рецептура № 1 | 0,37 | 0,49 | 0,51 | 0,66 |
| Полимер № 2 (США), Рецептура № 1 | 0,23 | 0,3 | 0,24 | 0,34 |
| Полимер № 2 (США), Рецептура № 2 | 0,27 | 0,38 | 0,38 | 0,5 |
| Полимер № 2 (США), Рецептура № 3 | 0,208 | 0,301 | 0,315 | 0,45 |
| Полимер № 3 (Нидерланды), Рецептура № 1 | 0,23 | 0,34 | 0,32 | 0,54 |
| Полимер № 3 (Нидерланды), Рецептура № 2 | 0,265 | 0,38 | 0,38 | 0,58 |
| Полимер № 3 (Нидерланды), Рецептура № 3 | 0,21 | 0,4 | 0,48 | 0,68 |
| Полимер № 4 (Германия), Рецептура № 1 | 0,35 | 0,485 | 0,57 | 0,86 |
| Полимер № 4 (Германия), Рецептура № 2 | 0,368 | 0,53 | 0,58 | 0,86 |
| Полимер № 4 (Германия), Рецептура № 3 | 0,364 | 0,53 | 0,59 | 0,895 |

Стабильность краски при хранении определяли ускоренным методом. Образец краски помещали в металлическую тару объёмом 0,5 л и плотно закупоривали. Степень заполнения тары составляла около 80 % её объёма. Затем образец ставили в термощаф и выдерживали при температуре (60±2) °С в течение 120 ч. Перед осмотром материал охлаждали до температуры (20±2) °С в течение 2–3 ч. Аккуратно открывали крышку, осторожно погружали шпатель в ёмкость с краской до дна, визуально оценивали наличие расслоения, образования осадка и/или других отклонений по сравнению с контрольным образцом, хранившимся при температуре (20±2) °С в течение 120 ч. Оценку производили в баллах [11]. Критерии оценки состояния материала при визуальном осмотре приведены в таблице 4. Материалы, получившие оценку ниже 3 баллов, считали не выдержавшим испытание.

Таблица 4 – Критерии оценки стабильности при хранении

| Баллы | Описание состояния образца краски |
|-------|---|
| 6 | Идеальная композиция. Состояние материала не изменилось по сравнению с контрольным образцом. |
| 5 | Незначительное уменьшение вязкости материала в поверхностном слое, незначительное явление синерезиса. Отсутствие осадка. Материал легко перемешивается до первоначального состояния. |
| 4 | Незначительное явление синерезиса в поверхностном слое. Незначительное образование мягкого, легко размешиваемого осадка. Материал без труда перемешивается до первоначального состояния. |
| 3 | Явление синерезиса в поверхностном слое. Образование размешиваемого осадка. Материал перемешивается до первоначального состояния с незначительными усилиями. |
| 2 | Явление синерезиса в поверхностном слое, разделение пигментов в материале, выбеливание на поверхности материала. Образование твёрдого трудноразмешиваемого осадка. Перемешивание до однородной массы возможно с большим трудом. |
| 1 | Образование твёрдого или резиноподобного, не размешиваемого осадка. Невозможно перемешивание до однородной массы. |

Все исследованные успешно выдержали испытания на тест «стабильность при хранении».

Исследование твердости полимерных плёнок (по Кёнигу) выявили значительные различия между сополимерами, применяемыми в качестве пленкообразователя. Плёнка сополимера с более высокой температурой стеклования и, соответственно, с более высоким содержанием метилметакрилата, показала самую высокую твердость.

Определяющими показателями при лабораторных испытаниях красок и ЛКП явились не только твердость, но и адгезия отвержденного покрытия к подложке и водопоглощение [12, 13]. Согласно данным таблицы 3, несомненно, лучшими физико-механическими показателями обладает ЛКП на основе полимера № 2, имеющего большее содержание метилметакрилата. Его полимерная плёнка обладает более высокой твердостью и адгезией к подложке по сравнению с другими композициями. Низкое водопоглощение данной плёнки свидетельствует о более высокой её сплошности, низкой пористости и в сочетании с высокой светостойкостью (низким изменением коэффициента диффузного отражения) даёт возможность предположить, что при эксплуатации такой материал для бетонных и железобетонных конструкций и сооружений будет обладать также и более высокой долговечностью.

Заключение

Отличительной особенностью ЛКП на основе полимера с более высоким содержанием метилметакрилата и меньшим количеством концевых групп полимерной цепи (№ 2) является низкое водопоглощение в сочетании с высокими физико-механическими показателями. Кроме того, лучшая из красок (на основе полимера № 2) показала устойчивость ЛКП к действию 10 %-го водного раствора NaOH в течение 24 часов, что является крайне важным при нанесении материалов на свежий бетон и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений, постоянно работающих с водой под напором и склонных к коррозии бетона I вида (по Москвину) – коррозии выщелачивания. Высокая светостойкость ЛКП, которая является важнейшим показателем, характеризует устойчивость ЛКП к атмосферным воздействиям (воздействию ультрафиолетового излучения, атмосферного кислорода, кислотных дождей, колебаний температуры).

Правильный выбор проектных и конструкторских решений, совместная работа конструкторов и специалистов по коррозии позволяет максимально снизить коррозионную нагрузку на гидротехнические сооружения.

Список цитированных источников

1. Брок, Т. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям / Т. Брок, М. Гротеклаус, П. Мишке. – М. : Пэйнт-Медиа, 2004. – 548 с.
2. Сарачук, М. Д. Лакокрасочные материалы на защите гидротехнических сооружений / М. Д. Сарачук // Гидротехника. – 2014. – № 2. – С. 64–66.
3. Тур, Э. А. Защита от коррозии строительных конструкций, используемых в водохозяйственном строительстве / Э. А. Тур, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2018. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 111–114.
4. Зотова, Н. С. Применение акриловых смол при производстве лакокрасочных материалов / Н. С. Зотова // Лакокрасочная промышленность. – 2008. – № 9. – С. 20–21.
5. Скороходова, О. Н. Неорганические пигменты и их применение в лакокрасочных материалах / О. Н. Скороходова, Е. Е. Казакова. – М. : Пэйнт-Медиа, 2005. – 264 с.
6. Крыжановский, В. К. Технические свойства полимерных материалов / В. К. Крыжановский. – СПб.: Профессия, 2003. – 203 с.
7. Стойе, Д. Краски, покрытия и растворители / Д. Стойе, В. Фрейтаг. – СПб.: Профессия, 2007. – 528 с.
8. Ростиашвили, В. К. Стеклование полимеров / В. Г. Ростиашвили, В. И. Иржак, Б. А. Розенберг. – Л.: Химия, 1987. – 192 с.
9. Привалко, В. П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В. П. Привалко. – Л. : Химия, 1986. – 240 с.
10. Карякина, М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Карякина. – М. : Химия, 1988. – 272 с.

11. Европейское руководство по качеству / под ред. У. Цорллы ; пер. с англ. под ред. проф. Л. Н. Машляковского. – М. : Пэйнт-Медиа, 2004. – 578 с.
12. Тур, Э. А. Влияние состава акриловых сополимеров на физико-механические, технологические и эксплуатационные показатели экологических разметочных материалов / Э. А. Тур, Н. М. Голуб // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 125–129.
13. Тур, Э. А. Влияние физико-химических свойств акриловых сополимеров на эксплуатационные показатели защитных покрытий, применяемых в водохозяйственном строительстве / Э. А. Тур // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2017. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 68–74.

References

1. Brok, T. Evropejskoe rukovodstvo po lakokrasochnym materia-lam i pokrytiyam / T. Brok, M. Groteklau, P. Mishke. – M. : Pejnt-Media, 2004. – 548 s.
2. Sarachuk, M. D. Lakokrasochnye materialy na zashchite gidrotekhnicheskikh sooruzhenij / M. D. Sarachuk // Gidrotekhnika. – 2014. – № 2. – S. 64–66.
3. Tur, E. A. Zashchita ot korrozii stroitel'nykh konstrukcij, ispol'zuemyh v vodohozyajstvennom stroitel'stve / E. A. Tur, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – № 2: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geokologiya. – S. 111–114.
4. Zotova, N. S. Primenenie akrilovykh smol pri proizvodstve lakokrasochnykh materialov / N. S. Zotova // Lakokrasochnaya promyshlennost'. – 2008. – № 9. – S. 20–21.
5. Skorohodova, O. N. Neorganicheskie pigmenty i ih primene-nie v lakokrasochnykh materialah / O. N. Skorohodova, E. E. Kazakova. – M. : Pejnt-Media, 2005. – 264 s.
6. Kryzhanovskij, V. K. Tekhnicheskie svojstva polimernykh materialov / V. K. Kryzhanovskij. – SPb.: Professiya, 2003. – 203 s.
7. Stojе, D. Kraski, pokrytiya i rastvoriteli / D. Stojе, V. Frejtag. – SPb. : Professiya, 2007. – 528 s.
8. Rostiashevili, V. K. Steklovaniye polimerov / V. G. Rostiashevili, V. I. Irzhak, B. A. Rozenberg. – L.: Himiya, 1987. – 192 s.
9. Privalko, V. P. Molekulyarnoe stroenie i svojstva polime-rov / V. P. Privalko. – L. : Himiya, 1986. – 240 s.
10. Karyakina, M. I. Ispytanie lakokrasochnykh materialov i pokrytij / M. I. Karyakina. – M. : Himiya, 1988. – 272 s.
11. Evropejskoe rukovodstvo po kachestvu / pod red. U. Corlly ; per. s angl. pod red. prof. L. N. Mashlyakovskogo. – M. : Pejnt-Media, 2004. – 578 s.
12. Tur, E. A. Vliyaniye sostava akrilovykh sopolimerov na fi-ziko-mekhanicheskie, tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye pokazateli ekologichnykh razmetochnykh materialov / E. A. Tur, N. M. Golub // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2014. – № 2: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geokologiya. – S. 125–129.
13. Tur, E. A. Vliyaniye fiziko-himicheskikh svojstv akrilovykh sopolimerov na ekspluatatsionnye pokazateli zashchitnykh pokrytij, primenyaemyh v vodohozyajstvennom stroitel'stve / E. A. Tur // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – № 2: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoko-logiya. – S. 68–74.

Материал поступил в редакцию 25.01.2022

МИРОВОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ НОРМИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Н. Н. Шалобьта¹, О. А. Акулова², Е. Н. Шалобьта³

¹ К. т. н., доцент, проректор по научной работе

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

² К. т. н., заведующий кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики

Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: akulovabrest@gmail.com

³ Студентка Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: enshalobyta@stud.etu.ru

Реферат

Новые подходы к инженерной деятельности в области строительства требуют интенсивного развития технологий информационного моделирования, в основе которых заложены понятия моделей отдельных или целых объектов, опирающиеся на принципы 3D-моделирования, параметризации и автоматического создания документации для их полного жизненного цикла. В большом числе западных стран к настоящему времени технологии информационного моделирования стали уже неотъемлемой частью процесса инженерного проектирования, в то время как в странах СНГ в общем, и в Республике Беларусь в частности, наблюдается заметное отставание в этой области. Одной из основных причин этого является отсутствие в Республике Беларусь национальных стандартов по информационному моделированию. Тем не менее данные технологии в последние годы вызывают все больший интерес промышленности и поддержку государства, и поэтому использование опыта в области регулирования информационного проектирования и применения BIM-технологий в строительной индустрии для разработки национальных стандартов является важным и перспективным направлением исследований.

В приведенной статье рассмотрены нормативные документы в области BIM-проектирования стран-лидеров в этой области, основные тенденции в разработке отечественных BIM-стандартов, а также возможные сценарии внедрения информационного моделирования в строительную отрасль Республики Беларусь.

Ключевые слова: строительная отрасль, информационное моделирование зданий и сооружений, BIM-технологии, BIM-стандарты.

WORLD AND DOMESTIC EXPERIENCE IN THE FIELD OF BUILDING INFORMATION MODELING

N. N. Shalobyta, O. A. Akulova, E. N. Shalobyta

Abstract

New approaches to engineering activities in the field of construction require the intensive development of information modeling technologies, which are based on the concepts of models of individual or entire objects based on the principles of 3D modeling, parameterization and automatic creation of documentation for their full life cycle. In a large number of Western countries, information modeling technologies have already become an integral part of the engineering design process, while in the CIS countries in general, and in the Republic of Belarus in particular, there is a noticeable lag in this area. One of the main reasons for this is the lack of national information modeling standards in the Republic of Belarus. Nevertheless, these technologies in recent years have aroused increasing interest in industry and government support, and therefore the use of experience in the field of information design regulation and the use of BIM technologies in the construction industry for the development of national standards is an important and promising area of research.

This article discusses the regulatory documents in the field of BIM design developed by the leading countries in this area, the main trends in the development of the national BIM standard, as well as possible scenarios for the information modeling introduction in the construction industry of the Republic of Belarus.

Keywords: construction industry, Building Information Modeling (BIM), BIM-technologies, BIM-standards.

Введение

Рассматривая информационное моделирование, необходимо выделить уже сложившиеся модели, применяемые как в промышленности (машиностроение, авиастроение и т. д.), так и в строительстве [1]:

- **PLM** (сокр. от англ. *Product Lifecycle Management*) – технология управления жизненным циклом изделий, представляющая организационно-техническую систему, обеспечивающую управление всей информацией об изделии и связанных с ним процессах на протяжении всего его жизненного цикла, начиная с проектирования и производства до снятия с эксплуатации.
- **BIM** (сокр. от англ. *Building Information Modeling* или *Building Information Model*) – информационное моделирование здания или информационная модель здания, включающая в себя совершенно новый подход к возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации и ремонту здания (управлению жизненным циклом объекта), который предполагает сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми ее взаимосвязями и зависимостями, когда здание и все, что имеет к нему отношение, рассматриваются как единый объект.

В строительной отрасли BIM-технологии представляют собой совершенно новую идеологию в проектировании, которая вносит существенные изменения в архитектурную и строительную отрасли. Появившаяся в 1975 г. изначально под другим именем, идея информационного моделирования зданий (Building Information Modeling, BIM) в результате эволюционного развития теории архитектурных САПР [2, 3] как единая технология начала активно применяться примерно с 2000 г., благодаря широкому внедрению базовых принципов BIM в программном обеспечении ведущих разработчиков архитектурных систем (Autodesk, Inc. и др.).

Несмотря на то, что область применения BIM-технологий неуклонно расширяется, стандартизация и нормотворчество значительно отстают от возможностей и нужд строительной отрасли. В первую очередь это связано с необходимостью создания единого, методологически и терминологически согласованного комплекса документов, требующего широкомасштабных научных исследований. Одним из важных вопросов является разработка требований к геометрическим параметрам, уровням геометрической и атрибутивной проработки компонентов информационной модели, графическому отображению, визуализации, форматам и др.

Анализ стандартов и нормативных документов в области BIM-технологий

С 2000 годов начали появляться первые национальные нормативные документы (Австралия, Великобритания, Гонконг, Дания, Испания, Нидерланды, Норвегия, Сингапур, США, Финляндия), регламентирующие общие правила для процесса информационного моделирования зданий [1, 2, 3]. В результате обобщения многолетнего опыта применения САПР в строительстве стали создаваться международные стандарты. В настоящее время International Standard Organization (ISO) имеется два технических комитета, которые имеют прямое отношение к BIM [1, 2, 3]:

- **технический комитет ISO/TC 184** – Automation systems and integration (Системы промышленной автоматизации и интеграции), подкомитет ISC 4 – Industrial Data (Промышленные данные). В данном подкомитете на основе разработки IFC 4 международного консорциума buildingSMART разработан стандарт ISO 16739:2018 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries, по сути являющийся стандартом на описание форматов обмена данными между BIM-системами;
- **технический комитет ISO/TC 59** – Buildings and civil engineering works (Строительство зданий), подкомитет SC 13 – Organization of information about construction works (Организация информации о строительных работах), который разработал к настоящему времени базовых 7 стандартов, направленных на управление проектированием и строительством зданий на основе BIM-моделей:
- ISO 12006-2:2001 Building construction – Organization of information about construction works – Part 2: Framework for classification of information;
- ISO 12006-3:2007 Building construction – Organization of information about construction works – Part 3: Framework for object-oriented information;
- ISO/TS 12911:2012 Framework for building information modelling (BIM) guidance;
- ISO 16354:2013 Guidelines for knowledge libraries and object libraries;
- ISO 22263:2008 Organization of information about construction works – Framework for management of project information;

- ISO 29481-1:2010 Building information modelling – Information delivery manual – Part 1: Methodology and format;
- ISO 29481-2:2012 Building information models – Information delivery manual – Part 2: Interaction framework.

Несмотря на разработку базовых международных документов, многие стороны реальной работы, заложенной в основу методологии BIM, к настоящему времени только формируются, и на практике применяются (если имеются) различные национальные стандарты, стандарты консорциума buildingSMART (США), BIM Task Group (Великобритания), а также стандарты де-факто отдельных фирм – разработчиков программного обеспечения [1, 2, 4, 5, 6, 7]. Так, согласно разработанному специалистами от промышленности, государственного сектора и различных научных институтов в компании BIM Task Group базовому стандарту PAS 1192-2:2013 [8] и в соответствии с определением, введенным М. Бью [9] (рисунок 1), в настоящее время выделяют 4 уровня применения BIM-технологий: уровень 0 (Level 0), начальный или всем известное, в первую очередь, ручное двухмерное черчение, но с использованием отдельных инструментов САПР; уровень 1 (Level 1), при котором некоторые элементы двухмерного черчения трансформируются путем использования САПР в 3D-модели; уровень 2 (Level 2), на котором с помощью САПР к полноценным 2D- и 3D-моделям добавляется общая среда данных (система инженерного документооборота) с получением в автоматическом режиме документации непосредственно из информационной модели, при этом модель должна также содержать 4D- (календарные графики реализации проектов) и 5D-описания (стоимостные показатели) и уровень 3 (Level 3) как единую интегрированную систему полного цикла жизненного цикла объекта от момента проектирования до эксплуатации и утилизации. Конечно, в настоящее время в большинстве стран мира при внедрении термина «BIM-технологии» речь идет о повсеместном внедрении 2 уровня, и только отдельные компании-лидеры в строительной индустрии имеют возможность при разработке уникальных проектов внедрять элементы 3 уровня.

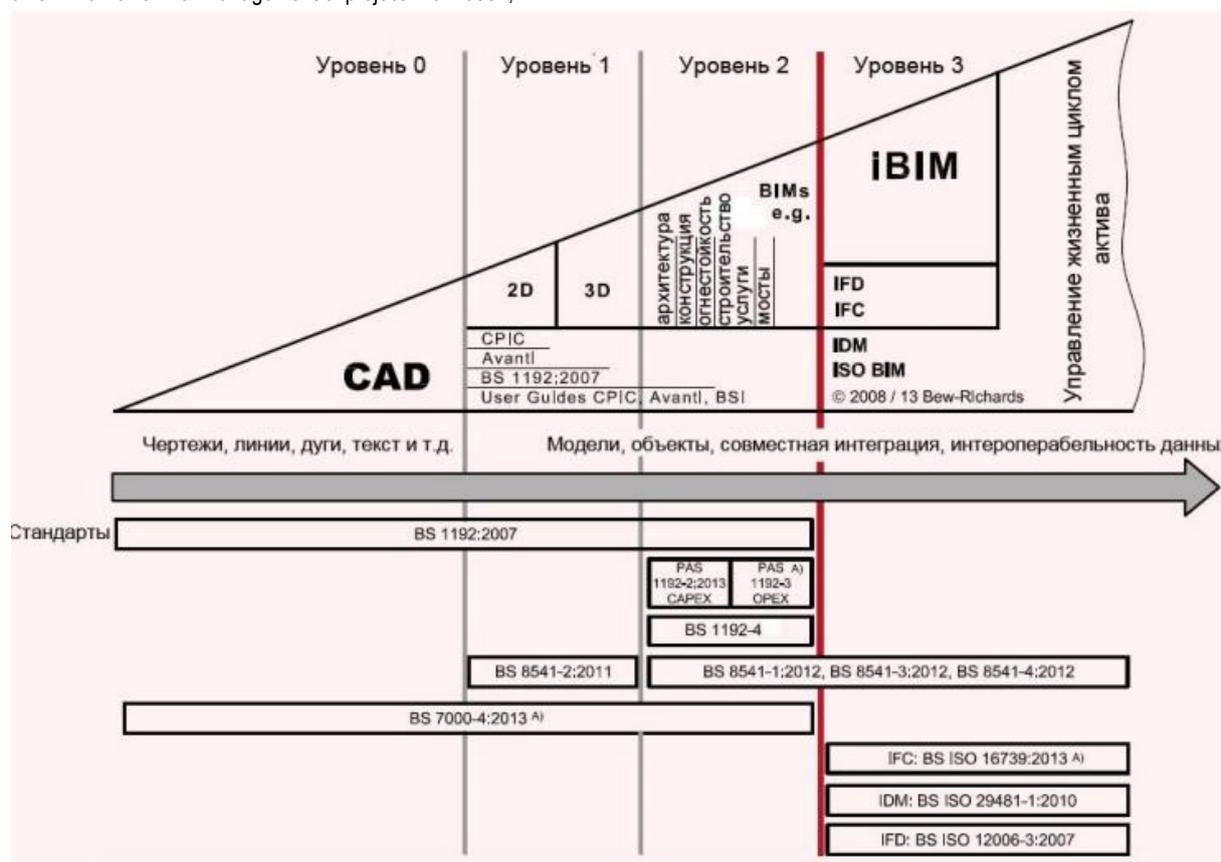


Рисунок 1 – Классификация уровней развития BIM-технологий и связанные с их развитием стандарты PAS 1192-2:2013 [8, 40]

Международный опыт нормирования в области информационного моделирования

ВIM-стандарты Великобритании. Несмотря на то, что Великобритания не является первой страной, применившей технологии информационного моделирования, в настоящее время она является одним из лидеров по внедрению стандартов ВIM-технологий [15, 18, 22, 23, 24]. В 2007 году разработан первый британский стандарт BS 1192 [10], который расширялся и дорабатывался более 10 лет и в настоящее время все еще имеет потенциал развития. Великобритания одна из первых стран в мире инициировала регулирование ВIM на государственном уровне. Так, в 2011 году кабинет министров Великобритании подготовил «Правительственную стратегию развития строительства». Существенный толчок в этой области стал возможен, в первую очередь, в результате подготовки к проведению в 2012 году Олимпийских игр в Лондоне. Организаторы строительства олимпийских объектов своевременно поняли важность и перспективность унификации и автоматизации информационного взаимодействия между подрядчиками.

Британские стандарты можно разделить на две группы: BS (British Standard) – непосредственно стандарты и PAS (Publicly Available Specification) – проекты стандартов, не требующие длительного согласования и утверждения и оперативно обеспечивающие удовлетворение потребностей строительной отрасли.

- Основные британские ВIM-стандарты включают [11]:
- BS 1192:2007+A2:2016. Collaborative production of architectural, engineering and construction information – Code of practice (Британский стандарт. Совместное производство архитектурной, инженерной и строительной информации. Свод правил);
 - PAS 1192-2:2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling (Проект стандарта для управления информацией на этапе капитального строительства с использованием информационного моделирования);
 - PAS 1192-3:2014. Specification for information management for the operational phase of assets using building information modelling

(Проект стандарта для управления информацией на этапе эксплуатации объекта с использованием информационного моделирования);

- BS 1192-4:2014. Collaborative production of information – Part 4: Fulfilling employer’s information exchange requirements using COBie – Code of practice (Британский стандарт. Совместное производство информации. Выполнение требований заказчика к информационному обмену с использованием COBie. Свод правил);
- PAS 1192-5:2015. Specification for security-minded building information modelling, digital built environments and smart asset management (Проект стандарта по информационной безопасности для информационного моделирования, цифровой среды общих данных и умного управления активами);
- BS 8536-1:2015. Briefing for design and construction – Part 1: Code of practice for facilities management (Buildings infrastructure) (Британский стандарт. Инструкция для проектирования и строительства. Свод правил для управления объектами (строительная инфраструктура));
- BS 8536-2:2016 Briefing for design and construction – Part 2: Code of practice for asset management (Linear and geographical infrastructure) (Британский стандарт. Инструкция для проектирования и строительства. Свод правил для управления объектами (линейная и географическая инфраструктура)).

С практической точки зрения наибольший интерес представляют PAS 1192-2:2013 [8], который посвящен процессу реализации проектной информационной модели PIM (Project Information Model), завершающегося созданием эксплуатационной информационной модели AIM (Asset Information Model), которая и передается заказчику, а также PAS 1192-3:2014 [25], который определяет требования к информационному управлению для достижения 2-го уровня зрелости информационного моделирования, включающего эксплуатацию и техническое обслуживание (рисунки 2 и 3 соответственно).

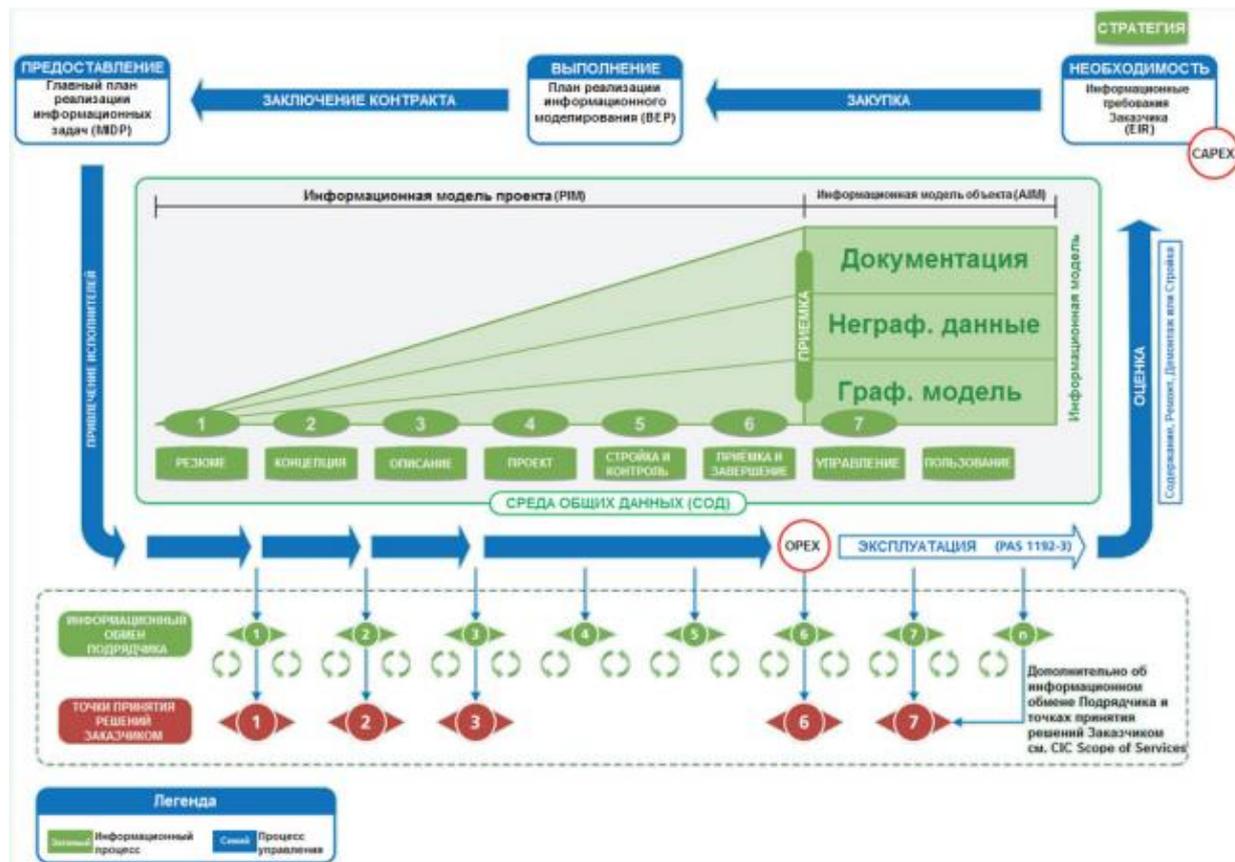


Рисунок 2 – Требования к процессу создания проектной информации для достижения 2-го уровня зрелости информационного моделирования [8, 40]

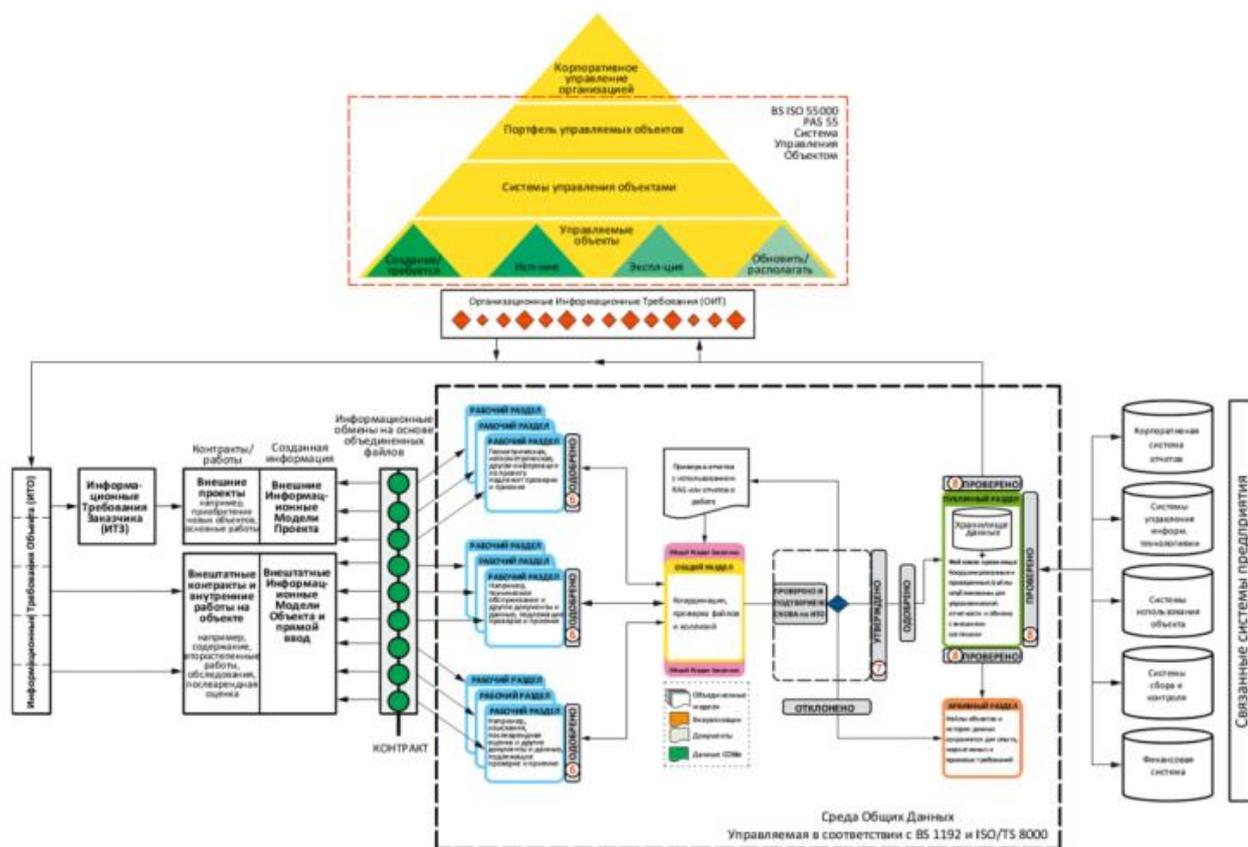


Рисунок 3 – Требования к информационному управлению для достижения 2-го уровня зрелости информационного моделирования [25, 40]

Комплекс британских BIM-стандартов (National BIM Report 2019) также включает ряд дополнительных стандартов и практических руководств и является одним из наиболее проработанных в мире по вопросам описания правил работы с данными; ролей и обязанностей всех членов команды, работающих над BIM проектом, на всех стадиях жизненного цикла (проектирования, возведения, эксплуатации и утилизации объекта); методов контроля технической безопасности; порядка сдачи объекта в эксплуатацию. Кроме того, нормы постоянно совершенствуются и дополняются, исходя из реального проектно-го опыта.

BIM-стандарты США. США первыми начали заниматься вопросами стандартизации в области BIM. Связано это прежде всего с наличием большого числа научно-образовательных учреждений, а также ведущих компаний-производителей программных комплексов для строительной отрасли [16, 22]. В отличие от британских стандартов, где государство является основным регулятором процесса, американские нормы ориентированы на непосредственных участников рынка, одним из которых является государство. Отличительной особенностью BIM-стандартов США является то, что в их разработке кроме таких компаний как buildingSMART alliance (bSa) (подразделение некоммерческой неправительственной организации National Institute of Building Sciences (NIBS, Национального института строительных наук) и BIMForum (филиал в США международного консорциума buildingSMART International (bSI)) приняли непосредственное участие ведущие разработчики программного обеспечения в области строительства (Autodesk, Inc., Bentley AECOSim Building и т. д.).

В США первый Национальный BIM-стандарт National BIM Standard – United States (NBIMS-US Version 1) был выпущен еще в 2007 году. В начале 2013 года buildingSMART alliance сформировал Целевую группу по видению NBIMS-US 2021 (VTF), чтобы сосредоточиться на определении, прогнозировании и предположениях о том, что может ожидать строительную отрасль в ближайшие 8–10 лет и, следовательно, как NBIMS-US™ должен выглядеть для поддержки этого будущего. В настоящее время в США действует третья версия стандарта, которая содержит 50 документов и представляет собой настоящую «энциклопедию» BIM [21, 22]. Стандарт охватывает весь

спектр современных BIM-технологий и содержит большое число документов, постоянно развивается и дополняется различными документами, разрабатываемыми заказчиками, научными и научно-образовательными учреждениями, которые отвечают современному уровню развития BIM-технологий в мире.

Стандарт NBIMS-US Version 3 включает три главных раздела:

- обзор используемых стандартов;
- стандарты по обмену данными;
- практические руководства.

Стандарт NBIMS-US V3 охватывает практически весь современный спектр BIM-технологий и представляет собой множество документов, разрабатываемых различными компаниями, и это определяет сложность стандарта и невозможность внесения в него актуальных изменений. Поэтому многие некоммерческие организации заказчиков, научно-образовательные учреждения и другие организации в США выпускают документы, развивающие и дополняющие NBIMS-US V3, или на практике при проектировании используют упрощенные руководства (guides) по BIM. Среди них особо следует отметить следующие [22]:

- ERDCSR-12-2. The US Army Corps of Engineers Roadmap for Life-Cycle Building Information Modeling – Дорожная карта Инженерного корпуса армии США для реализации жизненного цикла BIM);
- The VA BIM Guide – руководство по BIM, разработанное офисом по управлению зданиями и сооружениями Департамента по делам ветеранов США;
- Penn State BIM Planning Guide for Facility Owners. V2 – BIM-руководство для владельцев зданий и сооружений, разработанное университетом штата Пенсильвания совместно с buildingSMART alliance.

Следует подчеркнуть, что лишь США и Великобритания активно развивают свои BIM-стандарты, остальные страны мира, как правило, в основу своих нормативных документов принимают наработки вышеперечисленных стандартов, а иногда даже и практические руководства. В таблице 1 приводится информация о стандартах, описанная в источнике [22] А. В. Скворцовым.

Таблица 1 – Информация о стандартах для BIM в строительстве [22]

| Страна, разработчик стандарта | Наименование нормативных документов |
|--|---|
| Велико-британия | BS 8536-1:2015 Briefing for design and construction — Part 1: Code of practice for facilities management (Buildings infrastructure) |
| | BS 8536-2:2016 Briefing for design and construction — Part 2: Code of practice for asset management (Linear and geographical infrastructure) |
| | BS 1192:2007 + A2:2016 Collaborative production of architectural, engineering and construction information – Code of practice |
| | PAS 1192-2:2013 Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling |
| | PAS 1192-3:2014 Specification for information management for the operational phase of assets using building information modelling |
| | BS 1192-4:2014 Collaborative production of information – Part 4: Fulfilling employer’s information exchange requirements using COBie — Code of practice |
| | PAS 1192-5:2015 Specification for security-minded building information modelling, digital built environments and smart asset management |
| | AEC (UK) BIM Technology Protocol v2.1.1. Practical implementation of BIM for the UK Architectural, Engineering and Construction (AEC) industry |
| | Government Soft Landings |
| | Digital Built Britain |
| США | National BIM Standard - United States™ V3 |
| | E203-2013 Building Information Modeling & Digital Data Exhibit |
| | G201-2013 Project Digital Data Protocol Form |
| | G202-2013 Project Building Information Modeling Protocol Form |
| | Level of Development (LOD) Specification 2016 |
| | The Contractor’s Guide to BIM |
| | ERDC SR-12-2. The US Army Corps of Engineers Roadmap for Life-Cycle Building Information Modeling (BIM) |
| | USACE BIM Minimum Modeling Matrix (M3) |
| | USACE Advanced Modeling Project Execution Plan (PxP) Template V3.0 |
| | U.S. Air Force BIM Minimum Requirements v2.1 |
| | The VA BIM Guide |
| | GSA Building Information Modeling Guide Series |
| | State of Ohio Building Information Modeling Protocol |
| | Texas Facilities Commission Professional Architectural/Engineering Guidelines |
| | GSFIC BIM Guide - Series 01 Model Analysis and Validation |
| | State of Wisconsin DSF BIM Guidelines and Standards for Architects and Engineers |
| | CoSA BIM Standards |
| | NYC BIM Guidelines |
| | Penn State BIM Planning Guide for Facility Owners. V2 |
| | MIT CAD & BIM Guidelines |
| MIT BIM Execution Plan | |
| Georgia Tech BIM Requirements & Guidelines for Architects, Engineers and Contractors | |
| USC BIM Guidelines | |
| IU BIM Guidelines & Standards for Architects, Engineers, and Contractors | |
| SDCCD BIM Standards for Architects, Engineers & Contractors | |
| LACCD Building Information Modeling Standards. Version 4.1 | |
| Канада | BIM PxP Toolkit |
| | AEC (CAN) BIM Protocol (2012) |
| Норвегия | Statsbygg Building Information Modelling Manual 1.2.1 |
| | Boligprodusentenes BIM Manual 2.0 |
| Финляндия | HB V770 Modellgrunnlag. Krav til grunnlagsdata og modeller |
| | Common BIM Requirements 2012 |
| Германия | GAEB DA XML 3.2 |
| Нидерланды | Rgd BIM Standard 1.1 |
| Австралия | NATSPEC National BIM Guide |

Продолжение таблицы 1

| Страна, разработчик стандарта | Наименование нормативных документов |
|--|--|
| Новая Зеландия | New Zealand BIM Handbook |
| Китай (Гонконг) | BIM Project Specification 3.0 |
| | CIC Building Information Modelling Standards (Phase One) |
| Сингапур | Singapore BIM Guide Version 2.0 |
| | BIM Essential Guide: |
| | BIM Essential Guide. For BIM Adoption in an Organization |
| | BIM Essential Guide. For BIM Execution Plan |
| | BIM Essential Guide. For Architectural Consultants |
| | BIM Essential Guide. For C & S Consultants |
| | BIM Essential Guide. For MEP Consultants |
| BIM Essential Guide. For Contractors | |
| BIM e-Submission: | |
| Code of Practice for Building Information Modelling (BIM) e-Submission | |
| BIM e-Submission Templates | |
| BIM e-Submission Template Guide | |

Стандарты BIM в Российской Федерации. В Российской Федерации к 2021 году в проектировании и строительстве объектов предполагалось обеспечить переход к использованию технологий информационного моделирования (BIM-технологий). Важным шагом на пути внедрения технологий информационного моделирования в России стало внесение в Градостроительный кодекс базовых терминов «информационная модель объекта капитального строительства», «классификатор строительной информации» и «государственная информационная система обеспечения градостроительной деятельности». На основании постановления правительства Российской Федерации от 12 сентября 2020 года № 1416 утверждены правила формирования и ведения классификатора строительной информации и должна осуществляться подготовка ГОСТ «Принципы классификации и кодирования в строительстве». Классификатор строительной информации должен вестись в рамках государственной информационной системы обеспечения градостроительной деятельности (ГТСОГД), постановление о которой принято 28 сентября 2020 года (№ 1558). Согласно ему информационная система должна заработать с 1 декабря 2022 года.

В настоящее время в Российской Федерации создается Единая система информационного моделирования, состоящая из 29 стандартов. По линии Технического комитета (ТК) 465 «Строительство» Росстандарта с 2017 г. выполнялась разработка ряда базовых стандартов в области информационного моделирования для строительства в целом. В рамках ответственности ТК 465 планируется перевести все документы на единую сквозную классификацию, систематизировав их следующим образом: основополагающие стандарты (основные положения, общие требования, термины и определения); классификаторы и каталоги; организация данных и правила обмена информацией; процессы информационного моделирования на этапах жизненного цикла зданий и сооружений; промышленные объекты; линейные объекты; безопасность и качество. В базовой группе «основополагающих стандартов» к настоящему времени официально принят ГОСТ Р 57563-2017/ISO/TS 12911:2012 «Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений» [42], проекты двух других документов «Единая система информационного моделирования. Основные положения» и «Организация информации об объектах капитального строительства. Информационный менеджмент в строительстве с использованием технологии информационного моделирования. Часть 1. Понятия и принципы» находятся в разработке. Работа над документами в группе «Классификаторы и каталоги» [42] велась в рамках обновления СП 328.1325800.2017 «Правила описания компонентов информационной модели» и СП 333.1325800.2017 «Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла» [27, 29]. К настоящему времени введен в действие только обновленный документ СП 328.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели» [27], который содержит единые требования, правила и рекомендации по созданию компонентов, используемых для формирования информационных моделей объектов строительства.

Документы по организации данных и правилам обмена информацией представлены следующими сводами правил и стандартами: СП 331.1325800.2017 «Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах» [28], СП 404.1325800.2018 «Правила разработки планов проектов, реализуемых с применением технологии информационного моделирования» [30] и СП 481.1325800.2020 «Правила применения в экономически эффективной проектной документации повторного использования и при ее привязке» [33], ГОСТ Р 10.0.02-2019/ ИСО 16739-1:2018 «Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. Часть 1. Схема данных» [34], ГОСТ Р 10.0.03-2019/ ИСО 294811:2016 «Справочник по обмену информацией. Часть 1. Методология и формат» [35], ГОСТ Р 10.0.04-2019/ ИСО 29481-2:2012 «Справочник по обмену информацией. Часть 2. Структура взаимодействия» [36] и ГОСТ Р 10.0.06-2019/ ИСО 12006-3:2007 «Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Строительство зданий. Структура информации об объектах строительства. Часть 3. Основы обмена объектно-ориентированной информацией» [38], ГОСТ Р ИСО 22263-2017 «Модель организации данных о строительных работах. Структура управления проектной информацией» [39].

Группа нормативных документов для разных этапов жизненного цикла зданий и сооружений укомплектована следующими документами: для этапа строительства – своды правил СП 301.1325800.2017 «Правила организации работ производственно-техническими отделами» [26] и СП 471.1325800.2019 «Контроль качества производства строительных работ» [31], ГОСТ Р 58439.2-2019 «Информационный менеджмент в строительстве с использованием технологии информационного моделирования. Часть 2. Стадия капитального строительства» [43] (в настоящее время недействующий); для стадии эксплуатации – СП 480.1325800.2020 «Требования к формированию информационных моделей объектов капитального строительства для эксплуатации многоквартирных домов» [32] и ГОСТ Р 57311-2016 «Требования к эксплуатационной документации объектов завершеного строительства» [41].

С января 2022 года формирование и ведение информационной модели объекта в Российской Федерации становится обязательным для заказчика, застройщика, технического заказчика и эксплуатирующей организации. Однако в связи неясностью в плане обязательности исполнения норм существует необходимость в их дальнейшей проработке и совершенствовании.

Внедрение информационного моделирования в строительную отрасль Республики Беларусь

Согласно Указу Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 первым приоритетным направлением научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы является «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства», среди которых отмечаются «цифровые пространственные модели, технологии дополненной реальности».

Несмотря на принятие отраслевой программы по разработке и внедрению информационных технологий комплексной автоматизации проектирования и поддержки жизненного цикла здания, сооружения на 2012–2015 годы, утвержденной постановлением Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 31 января 2012 г. № 4, а также подпункты 3.1, 3.2 пункта 3, подпункт 4.1 пункта 4 квалификационных требований, установленных постановлением Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 2 мая 2014 г. № 25 «О некоторых вопросах аттестации юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих отдельные виды архитектурной, градостроительной, строительной деятельности (их составляющие), выполнение работ по обследованию зданий и сооружений», приказ Министерства архитектуры и строительства РБ № 29827 от октября 2014 г. «О применении BIM-технологий в строительстве», а также приказ Министерства архитектуры и строительства РБ № 70 от 16 марта 2018 г. «О внедрении технологии информационного моделирования», к сожалению, в настоящее время не существует комплекса нормативных документов, регламентирующих основные требования по применению BIM в строительстве, кроме требований к проектным и научно-исследовательским организациям по применению программных продуктов определенных производителей, позиционирующих себя в качестве BIM [1]. Однако следует все же отметить, что в Республике

Беларусь с 1 марта 2016 года введен СТБ 12911-2015 «Основные положения руководства по информационному моделированию зданий», разработанный на основе международного стандарта ISO 12911-2012 «Framework for building information modeling guidance», который устанавливает основы, определяющие технические условия для внедрения BIM. Также приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 16 марта 2018 г. № 70 утвержден план внедрения технологического информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства, согласно которому к 2022 году должен быть разработан национальный BIM-стандарт в области строительства. Кроме того, во исполнение Директивы Президента Республики Беларусь от 4 марта 2019 г. № 8 «О приоритетных направлениях развития строительной отрасли» по поручению Министерства строительства и архитектуры РУП «Белстройцентр» разрабатывает подсистему «Библиотека базовых элементов» государственной информационной системы «Госстройпортал», целью создания которой является предоставление базовых элементов участникам жизненного цикла объекта строительства на всех его этапах и информационное обеспечение участников инвестиционного процесса сведениями о строительных материалах, изделиях, оборудовании и конструкциях, применяемых на территории Республики Беларусь.

В настоящее время в строительных и проектных компаниях Республики Беларусь BIM-технологии применяются в недостаточной степени, что снижает значимость строительной отрасли в структуре цифровой экономики. В этой связи существует несколько сценариев внедрения BIM-технологий в строительных компаниях [17, 18, 20, 21]:

1. Внедрение собственными силами сотрудников компании, которые при этом не освобождаются от текущей проектной деятельности. В этом случае информационная модель создается лишь по некоторым направлениям работы компании (например, архитектура, конструкции, инженерные сети и т. д.).
2. Внедрение собственными силами компании при технической и консультационной поддержке со стороны поставщиков программного обеспечения, но при этом сценарии появляются дополнительные расходы, связанные с получением рекомендаций по новой организации функционирования компании.
3. Внедрение собственными силами с привлечением в штат новых специалистов или сотрудников сторонней организации, владеющих BIM-технологиями. Эффективность этого сценария во многом зависит от квалификации и компетентности привлеченных специалистов и собственных сотрудников, что, несомненно, приводит к увеличению степени внедрения BIM-технологий, но при этом не может быть обеспечен полный переход к информационному моделированию всеми сотрудниками. Данный сценарий несомненно имеет определенные финансовые затраты, однако является наиболее эффективным и перспективным. Высококвалифицированными специалистами осуществляется обучение ведущих сотрудников, которые в будущем смогут обеспечить приобретение BIM-компетенций всеми сотрудниками компании. Кроме того, привлеченные сотрудники сторонних организаций смогут выполнить пилотный проект с созданием информационной модели по всем направлениям деятельности компании, а также автоматизированным получением полного комплекта проектной документации.

На наш взгляд, роль таких организаций могут выполнять специализированные структурные подразделения высших учебных заведений строительного профиля. В частности, осуществление такой стратегии является одним из перспективных направлений деятельности отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», созданной 22 марта 2021 года на базе учреждения образования «Брестский государственный технический университет» при поддержке Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь и Министерства образования Республики Беларусь.

Для активного продвижения BIM-технологий недостаточно иметь развитые САПР, необходимо наличие кадров, способных эффективно их использовать. В связи с этим актуальна разработка соответствующей системы повышения квалификации, а также подготовки специалистов в вузах. Необходимо понимать, что суть технологий информационного моделирования заключается не в использовании современных САПР. BIM-технологии – это совершенно новый подход к самому процессу проектирования. И несмотря на то, что переход к BIM-проектированию –

это вопрос будущего, готовить специалистов в этой области необходимо уже сегодня. Естественно, что в условиях отсутствия соответствующей нормативной базы подготовка новых образовательных стандартов затруднена. Тем не менее, необходимо внедрять в учебный процесс наиболее важные принципы и понятия новых технологий в проектировании, демонстрировать студентам потенциал современного программного обеспечения и эффективные способы его использования.

Существует несколько вариантов внедрения BIM-технологий в образовательный процесс:

- применение методов информационного моделирования в рамках научно-исследовательской работы студентов;
- включение вопросов BIM-технологий в учебные программы специальных дисциплин (в том числе в результате внедрения результатов НИРС в учебный процесс);
- включение в учебные планы специальностей факультативного курса или отдельной дисциплины по информационному моделированию;
- разработка новых образовательных стандартов и учебных планов, обеспечивающих комплексный подход, включающий применение информационного моделирования при изучении целого ряда учебных дисциплин.

Очевидно, что последний вариант является наиболее сложным, но, вместе с тем, и самым эффективным.

Заключение

Современные реалии в области информационного моделирования зданий и сооружений определяют большое число сложных задач и нерешенных вопросов, но вместе с тем открывают широкие возможности для новых научных исследований и достижений.

Рассмотрев особенности мирового опыта нормирования BIM в строительстве, можно выделить ряд общих тенденций, которые полезно учесть при разработке национального документа в области информационного моделирования:

1. Несмотря на то, что BIM-проектирование предполагает переход к совершенно новым методам работы, что связано с дополнительными затратами времени, труда и финансов, только такой подход является единственно эффективным для обеспечения конкурентоспособности строительной отрасли Республики Беларусь на мировом рынке.
2. В мировой практике в строительной индустрии за последние полвека накоплен значительный практический опыт применения BIM-технологий, отраженный в национальных стандартах ряда ведущих стран, таких как Великобритания, США, Китай и др. В связи с этим, прежде чем перейти к техническому регламентированию, необходимо тщательно обобщить имеющийся опыт реализации BIM-технологий и использовать его применительно к особенностям строительной отрасли Республики Беларусь. Очевидно, что особую роль в процессе внедрения BIM-технологий должно играть государство, в первую очередь, при разработке нормативных документов, экспертизе и контроле, а также при формировании государственного заказа на BIM-проектирование. Следствием данных процессов должна стать разработка отечественных программных продуктов для информационного моделирования (в качестве примера может служить российская BIM-система для проектирования Renga фирмы АСКОН).
3. Внедрение BIM-проектирования требует глубокого реформирования технического образования, разработки новых образовательных стандартов и учебных программ, учитывающих идеологически новый подход к проектированию и строительству.
4. Существует определенное разнообразие программного обеспечения на проектном рынке строительной отрасли (ArchiCAD, MagiCAD, Tekla Structures, Revit, Allplan, Renga (АСКОН) и др.). Каждый из продуктов имеет свои плюсы и минусы и может быть адаптирован для обучения студентов конкретных специальностей. Очевидно, что наиболее развитые САПР имеют зарубежное происхождение, что снижает информационную безопасность страны. Поэтому весьма важно создание отечественных BIM-инструментов, учитывающих особенности проектных организаций Республики Беларусь, а также BIM-решений для специальных проектных задач, в том числе с использованием имеющейся базы отечественных типовых решений, что откроет широкие возможности для научных исследований в этой области.

5. Применение технологий информационного моделирования зданий и сооружений является одним из приоритетных направлений развития строительной отрасли в Республике Беларусь. Для эффективного их внедрения необходимо создание национальных BIM-стандартов, учитывающих как зарубежные нормативные документы, так и отечественный опыт BIM-проектирования. При этом важным является не только реформирование строительной отрасли с учетом современных информационных технологий, но и системы образования, обеспечивающей ее высококвалифицированными специалистами.

Список цитированных источников

1. Стадии развития и оценка качества BIM-технологий / Н. Н. Шалобыта [и др.] // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сборник статей III Международной научно-технической конференции, Брест, 29–30 марта 2019 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Строительный факультет, ООО "Лири САПР", ООО "ПСС-SOFISTIK", ОДО "БрестКАД", ООО "Проект-наука" ; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – С. 9–16.
2. Сковрцов, А. В. BIM для автомобильных дорог: оценка зрелости технологии / А. В. Сковрцов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 2(3). – С. 12–21.
3. Акулова, О. А. Роль параметрического моделирования при изучении студентами строительных специальностей BIM-технологий в проектировании / О. А. Акулова, В. П. Уласевич, Н. Н. Шалобыта // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сборник статей Международной научно-технической конференции, Брест, 30–31 марта 2017 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет (строительный факультет), ООО "Лири САПР", ООО "ПСС-SOFISTIK", ОДО "БрестКАД" ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 3–7.
4. Сковрцов, А. В. BIM для дорожной отрасли: что-то новое или мы этим уже занимаемся? / А. В. Сковрцов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 1(2). – С. 8–11.
5. Yin, R. K. Case Study Research: Design and Methods / Robert K. Yin. – 2nd edition. – California : Sage Publications, 1994. – 171 p.
6. National Building Information Modelling Standard. Version 1 – Part 1. Overview, Principles and Methodologies : final report, December 2007 / National Institute of Building Sciences. – United States : buildingSMARTalliance, 2007. – 182 p.
7. Succar, B. Building Information Modeling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders / B. Succar // Automation in Construction. – 2009. – Vol. 18 (3). – P. 357–375.
8. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information Modeling : PAS 1192-2:2013. – 2013. – 68 p.
9. Going BIM in a Commercial World / M. Bew [et al.] // eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: European Conferences on Product and Process Modeling (ECCPM 2008). Sophia Antipolis. France. – P. 139–150.
10. BS 1192:2007+A1:2015. Совместное производство архитектурной, инженерной и конструкторской информации – нормы и правила; официальный перевод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://web.archive.org/web/20160815201149/http://brownie-soft.com/uploads/files/BS_1192_2007_new_ru_demo.pdf. – Дата доступа: 20.03.2021.
11. National BIM Report 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thenbs.com/knowledge/national-bim-report-2019>. – Дата доступа: 20.03.2021.
12. National BIM Standard – United States. Version 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://classes.engr.oregonstate.edu/cce/winter2018/cce203/NBIMS-US_V3/NBIMS-US_V3_Acknowledgments.pdf. – Дата доступа: 20.03.2021.
13. NBS National BIM Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nationalbimlibrary.com>. – Дата доступа: 20.03.2021.
14. Singapore BIM Guide. Version 2. Building and Construction Authority [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.corenet.gov.sg/media/586132/Singapore-BIM-Guide_V2.pdf. – Дата доступа: 20.03.2021.
15. Баранник, С. В. Обзор британских стандартов семейства PAS 1192 / С. В. Баранник // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2016. – № 1(6). – С. 24–27.

16. Бараник, С. В. Обзор практических документов национального BIM-стандарта США NBIMS-US V3 / С. В. Бараник // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2017. – № 1(8). – С. 4–8.
17. Вилисова, А. Д. Анализ сценариев внедрения BIM-технологии в строительных компаниях / А. Д. Вилисова, Л. И. Миронова // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы IV Международной научно-практической конференции / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет ; под общ. ред. А. А. Семенова. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2021. – С. 99–105.
18. Гиря, Л. В. Применение BIM-технологий в практике эксплуатации зданий и сооружений / Л. В. Гиря, Г. П. Трофимов // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы IV Международной научно-практической конференции / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет ; под общ. ред. А. А. Семенова. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2021. – С. 113–119.
19. Гурьева, Ю. А. BIM-технологии в строительном комплексе: зарубежный и отечественный опыт / Ю. А. Гурьева // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы III Международной научно-практической конференции / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2020. – С. 60–68.
20. Внедрение BIM-технологий в строительстве / А. М. Горшков [и др.] // Alfabuild. – 2019. – № 4(11). – С. 70–81.
21. Кисель, Е. И. Особенности внедрения BIM-технологий на инвестиционной стадии жизненного цикла объектов строительства / Е. И. Кисель, Л. Г. Срывкина // Организация строительного производства : материалы II Всероссийской научной конференции, 4–5 февраля 2020 г. / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2020. – С. 70–84.
22. Скорцов, А. В. Обзор международной нормативной базы в сфере BIM / А. В. Скорцов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2016. – № 2(7). – С. 4–48.
23. Талапов, В. В. Технология BIM. Суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий / В. В. Талапов. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 412 с.
24. Талапов, В. В. Технология BIM: стандарты, классификаторы и уровни зрелости / В. В. Талапов // САПР и графика. [Электронный ресурс]. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/24774>. – Дата доступа: 20.03.2021.
25. Specification for information management for the operational phase of assets using building information modeling : PAS 1192-3:2014. – 2014. – 44 p.
26. Информационное моделирование в строительстве. Правила организации работ производственно-техническими отделами : СП 301.1325800.2017. – Введен 2018-03-02. – М. : Стандартинформ, 2017. – 23 с.
27. Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели : СП 328.1325800.2020. – Введен 2021-07-01. – М. : Стандартинформ, 2021. – 13 с.
28. Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах : СП 331.1325800.2017. – Введен 2018-03-19. – М. : Стандартинформ, 2018. – 32 с.
29. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла : СП 333.1325800.2020. – Введен 2021-07-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – 226 с.
30. Информационное моделирование в строительстве. Правила разработки планов проектов, реализуемых с применением технологии информационного моделирования : СП 404.1325800.2018. – Введен 2019-06-18. – М. : Стандартинформ, 2019. – 28 с.
31. Информационное моделирование в строительстве. Контроль качества производства строительных работ : СП 471.1325800.2019. – Введен 2020-06-25. – М. : Стандартинформ, 2020. – 66 с.
32. Информационное моделирование в строительстве. Требования к формированию информационных моделей объектов капитального строительства для эксплуатации многоквартирных домов : СП 480.1325800.2020. – Введен 2020-07-15. – М. : Стандартинформ, 2020. – 12 с.
33. Информационное моделирование в строительстве. Правила применения в экономически эффективной проектной документации повторного использования и при ее привязке : СП 481.1325800.2020. – Введен 2020-07-18. – М. : Стандартинформ, 2020. – 12 с.
34. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. Часть 1. Схема данных : ГОСТ Р 10.0.02-2019/ ИСО 16739-1:2018. – Введен 2019-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 27 с.
35. Информационное моделирование в строительстве. Справочник по обмену информацией. Часть 1. Методология и формат : ГОСТ Р 10.0.03-2019/ ИСО 29481-2:2016. – Введен 2019-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 32 с.
36. Информационное моделирование в строительстве. Справочник по обмену информацией. Часть 2. Структура взаимодействия : ГОСТ Р 10.0.04-2019/ ИСО 29481-2:2012. – Введен 2019-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 78 с.
37. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Строительство зданий. Структура информации об объектах строительства. Часть 2. Основные принципы классификации : ГОСТ Р 10.0.05-2019/ ИСО 12006-2:2015. – Введен 2019-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 24 с.
38. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Строительство зданий. Структура информации об объектах строительства. Часть 3. Основы обмена объектно-ориентированной информацией : ГОСТ Р 10.0.06-2019/ ИСО 12006-3:2007. – Введен 2019-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 36 с.
39. Модель организации данных о строительных работах. Структура управления проектной информацией : ГОСТ Р ИСО 22263-2017. – Введен 2017-10-01. – М. : Стандартинформ, 2018. – 16 с.
40. Системы дизайн-менеджмента. Руководство по дизайн-менеджменту в строительстве : ГОСТ Р 57295-2016. – Введен 2018-01-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – 32 с.
41. Моделирование информационное в строительстве. Требования к эксплуатационной документации объектов завершеного строительства : ГОСТ Р 57311-2016. – Введен 2017-07-01. – М. : Стандартинформ, 2018. – 8 с.
42. Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений : ГОСТ Р 57563-2017/ ИСО/ТС 12911:2012. – Введен 2017-10-01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 33 с.
43. Организация информации об объектах капитального строительства. Информационный менеджмент в строительстве с использованием технологии информационного моделирования. Часть 2. Стадия капитального строительства : ГОСТ Р 58439.2-2019. – Введен 2019-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 24 с.
44. Планирование срока службы объектов строительства. Часть 4. Планирование срока службы с использованием информационного моделирования : ГОСТ Р 58907-2020. – Введен 2021-01-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – 31 с.

References

1. Stadii razvitiya i ocenka kachestva BIM-tehnologij / N. N. Shalobyta [i dr.] // Teoriya i praktika issledovanij i proektirovaniya v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR) : sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Brest, 29–30 marta 2019 goda / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, Stroitel'nyj fakul'tet, OOO "Lira SAPR", OOO "PSS-SOFISTIK", ODO "BrestKAD", OOO "Proekt-nauka" ; redkol.: N. N. Shalobyta [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2019. – S. 9–16.
2. Skvorcov, A. V. BIM dlya avtomobil'nyh dorog: ocenka zrelosti tekhnologii / A. V. Skvorcov // SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog. – 2014. – № 2(3). – S. 12–21.
3. Akulova, O. A. Rol' parametricheskogo modelirovaniya pri izuchenii studentami stroitel'nyh special'nostej BIM-tehnologij v proektirovanii / O. A. Akulova, V. P. Ulasevich, N. N. Shalobyta // Teoriya i praktika issledovanij i proektirovaniya v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR) : sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Brest, 30–31 marta 2017 goda / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet (stroitel'nyj fakul'tet), OOO "Lira SAPR", OOO "PSS-SOFISTIK", ODO "BrestKAD" ; redkol.: S. M. Semenyuk [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2017. – S. 3–7.
4. Skvorcov, A. V. BIM dlya dorozhnoj otrasli: chto-to novoe ili my etim uzhe zanimaemsa? / A. V. Skvorcov // SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog. – 2014. – № 1(2). – S. 8–11.
5. Yin, R. K. Case Study Research: Design and Methods / Robert K. Yin. – 2nd edition. – California : Sage Publications, 1994. – 171 p.

6. National Building Information Modelling Standard. Version 1 – Part 1. Overview, Principles and Methodologies : final report, December 2007 / National Institute of Building Sciences. – United States : buildingSMARTalliance, 2007. – 182 p.
7. Succar, B. Building Information Modeling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders / B. Succar // Automation in Construction. – 2009. – Vol. 18 (3). – P. 357–375.
8. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information Modeling : PAS 1192-2:2013. – 2013. – 68 p.
9. Going BIM in a Commercial World / M. Bew [et al.] // eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: European Conferences on Product and Process Modeling (ECCPM 2008). Sophia Antipolis. France. – P. 139–150.
10. BS 1192:2007+A1:2015. Sovmestnoe proizvodstvo arhitekturnoj, inzhenernoj i konstruktorskoj informacii – normy i pravila; oficial'nyj perevod [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://web.archive.org/web/20160815201149/http://brownie-soft.com/uploads/files/-BS_1192_2007_new_ru_demo.pdf. – Data dostupa: 20.03.2021.
11. National BIM Report 2019 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.thenbs.com/knowledge/national-bim-report-2019>. – Data dostupa: 20.03.2021.
12. National BIM Standard – United States. Version 3 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://classes.engr.oregonstate.edu/~cce/winter2018/cce203/NBIMS-US_V3/NBIMS-US_V3_Acknowledgments.pdf. – Data dostupa: 20.03.2021.
13. NBS National BIM Library [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.nationalbimlibrary.com>. – Data dostupa: 20.03.2021.
14. Singapore BIM Guide. Version 2. Building and Construction Authority [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://www.corenet.gov.sg/media/586132/Singapore-BIM-Guide_V2.pdf. – Data dostupa: 20.03.2021.
15. Barannik, S. V. Obzor britanskikh standartov semejstva PAS 1192 / S. V. Barannik // SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog. – 2016. – № 1(6). – S. 24–27.
16. Barannik, S. V. Obzor prakticheskikh dokumentov nacional'nogo BIM-standarta SSHA NBIMS-US V3 / S. V. Barannik // SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog. – 2017. – № 1(8). – S. 4–8.
17. Vilisova, A. D. Analiz scenarijev vnedreniya BIM-tehnologii v stroitel'nyh kompaniyah / A. D. Vilisova, L. I. Mironova // BIM-modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury : materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet ; pod obshch. red. A. A. Semenova. – Sankt-Peterburg : SPbGASU, 2021. – S. 99–105.
18. Giroya, L. V. Primenenie BIM-tehnologii v praktike ekspluatatsii zdaniy i sooruzhenij / L. V. Giroya, G. P. Trofimov // BIM-modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury : materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet ; pod obshch. red. A. A. Semenova. – Sankt-Peterburg : SPbGASU, 2021. – S. 113–119.
19. Gur'eva, Yu. A. BIM-tehnologii v stroitel'nom komplekse: zarubezhnyj i otechestvennyj opyt / Yu. A. Gur'eva // BIM-modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury : materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. – Sankt-Peterburg : SPbGASU, 2020. – S. 60–68.
20. Vnedrenie BIM-tehnologii v stroitel'stvo / A. M. Gorshkov [i dr.] // Alfabuild. – 2019. – № 4(11). – S. 70–81.
21. Kisel', E. I. Osobennosti vnedreniya BIM-tehnologii na investitsionnoj stadii zhiznennogo cikla ob'ektov stroitel'stva / E. I. Kisel' L. G. Srykina // Organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva : materialy II Vserossijskoj nauchnoj konferencii, 4–5 fevralya 2020 g. / Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. – Sankt-Peterburg : SPbGASU, 2020. – S. 70–84.
22. Skvorcov, A. V. Obzor mezhdunarodnoj normativnoj bazy v sfere BIM / A. V. Skvorcov // SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog. – 2016. – № 2(7). – S. 4–48.
23. Talapov, V. V. Tekhnologiya BIM. Sut' i osobennosti vnedreniya informacionnogo modelirovaniya zdaniy / V. V. Talapov. – M.: DMK Press, 2015. – 412 s.
24. Talapov, V. V. Tekhnologiya BIM: standarty, klassifikatory i urovni zrelosti / V. V. Talapov // SAPR i grafika. – 2015. – № 2 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://sapr.ru/article/24774>. – Data dostupa: 20.03.2021.
25. Specification for information management for the operational phase of assets using building information modeling : PAS 1192-3:2014. – 2014. – 44 p.
26. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila organizacii rabot proizvodstvenno-tehnicheskimi otdelami : SP 301.1325800.2017. – Vveden 2018-03-02. – M.: Standartinform, 2017. – 23 s.
27. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila opisaniya komponentov informacionnoj modeli : SP 328.1325800.2020. – Vveden 2021-07-01. – M.: Standartinform, 2021. – 13 s.
28. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila obmena mezhdru informacionnymi modelyami ob'ektov i modelyami, ispol'zuemymi v programnykh kompleksah : SP 331.1325800.2017. – Vveden 2018-03-19. – M.: Standartinform, 2018. – 32 s.
29. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila formirovaniya informacionnoj modeli ob'ektov na razlichnykh stadiyah zhiznennogo cikla : SP 333.1325800.2020. – Vveden 2021-07-01. – M.: Standartinform, 2020. – 226 s.
30. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila razrabotki planov proektov, realizuemykh s primeneniem tekhnologii informacionnogo modelirovaniya : SP 404.1325800.2018. – Vveden 2019-06-18. – M.: Standartinform, 2019. – 28 s.
31. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Kontrol' kachestva proizvodstva stroitel'nyh rabot : SP 471.1325800.2019. – Vveden 2020-06-25. – M.: Standartinform, 2020. – 66 s.
32. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Trebovaniya k formirovaniyu informacionnykh modelej ob'ektov kapital'nogo stroitel'stva dlya ekspluatatsii mnogokvartirnyh domov : SP 480.1325800.2020. – Vveden 2020-07-15. – M.: Standartinform, 2020. – 12 s.
33. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila primeneniya v ekonomicheski effektivnoj proektnoj dokumentacii povtornogo ispol'zovaniya i pri ee privyazke : SP 481.1325800.2020. – Vveden 2020-07-18. – M.: Standartinform, 2020. – 12 s.
34. Otrasleyve bazovye klassy (IFC) dlya obmena i upravleniya dannymi ob ob'ektah stroitel'stva. Chast' 1. Skhema dannyh : GOST R 10.0.02-2019/ ISO 16739-1:2018. – Vveden 2019-09-01. – M.: Standartinform, 2019. – 27 s.
35. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Spravochnik po obmenu informaciej. Chast' 1. Metodologiya i format : GOST R 10.0.03-2019/ISO 294811:2016. – Vveden 2019-09-01. – M.: Standartinform, 2019. – 32 s.
36. Informacionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Spravochnik po obmenu informaciej. Chast' 2. Struktura vzaimodejstviya : GOST R 10.0.04-2019/ISO 29481-2:2012. – Vveden 2019-09-01. – M.: Standartinform, 2019. – 78 s.
37. Sistema standartov informacionnogo modelirovaniya zdaniy i sooruzhenij. Stroitel'stvo zdaniy. Struktura informacii ob ob'ektah stroitel'stva. Chast' 2. Osnovnye principy klassifikacii : GOST R 10.0.05-2019/ISO 12006-2:2015. – Vveden 2019-09-01. – M.: Standartinform, 2019. – 24 s.
38. Sistema standartov informacionnogo modelirovaniya zdaniy i sooruzhenij. Stroitel'stvo zdaniy. Struktura informacii ob ob'ektah stroitel'stva. Chast' 3. Osnovy obmena ob'ektno-orientirovannoj informaciej : GOST R 10.0.06-2019/ISO 12006-3:2007. – Vveden 2019-09-01. – M.: Standartinform, 2019. – 36 s.
39. Model' organizacii dannyh o stroitel'nyh rabotah. Struktura upravleniya proektnoj informaciej : GOST R ISO 22263-2017. – Vveden 2017-10-01. – M.: Standartinform, 2018. – 16 s.
40. Sistemy dizajn-menedzhmenta. Rukovodstvo po dizajn-menedzhmentu v stroitel'stve : GOST R 57295-2016. – Vveden 2018-01-01. – M.: Standartinform, 2020. – 32 s.
41. Modelirovanie informacionnoe v stroitel'stve. Trebovaniya k ekspluatatsionnoj dokumentacii ob'ektov zavershennogo stroitel'stva : GOST R 57311-2016. – Vveden 2017-07-01. – M.: Standartinform, 2018. – 8 s.
42. Modelirovanie informacionnoe v stroitel'stve. Osnovnye polozheniya po razrabotke standartov informacionnogo modelirovaniya zdaniy i sooruzhenij : GOST R 57563-2017/ISO/TS 12911:2012. – Vveden 2017-10-01. – M.: Standartinform, 2017. – 33 s.
43. Organizatsiya informacii ob ob'ektah kapital'nogo stroitel'stva. Informacionnyj menedzhment v stroitel'stve s ispol'zovaniem tekhnologii informacionnogo modelirovaniya. Chast' 2. Stadiya kapital'nogo stroitel'stva : GOST R 58439.2-2019. – Vveden 2019-09-01. – M.: Standartinform, 2019. – 24 s.
44. Planirovanie sroka sluzhby ob'ektov stroitel'stva. Chast' 4. Planirovanie sroka sluzhby s ispol'zovaniem informacionnogo modelirovaniya : GOST R 58907-2020. – Vveden 2021-01-01. – M.: Standartinform, 2020. – 31 s.

Материал поступил в редакцию 10.02.2022

УДК 621.7.9.044

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ P6M5

**А. В. Алифанов¹, И. А. Богданович², Ю. И. Кривонос³,
В. В. Малеронок⁴, А. М. Милюкова⁵, О. А. Толкачева⁶**

- ¹ Лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и технологий, д. т. н., профессор, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроения Барановичского государственного университета, г. Барановичи, Республика Беларусь, e-mail: alifanov_aav@mail.ru
- ² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроения Барановичского государственного университета, г. Барановичи, Республика Беларусь, e-mail: irinabogdanovich1@rambler.ru
- ³ Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь
- ⁴ Майор, преподаватель кафедры беспилотных авиационных комплексов и боевого управления военного факультета в учреждении образования «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск, Республика Беларусь
- ⁵ Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь
- ⁶ Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

Реферат

Проведены исследования по изучению процесса высоковольтного электроразрядного спекания порошка быстрорежущей стали P6M5. Процесс высоковольтного электроразрядного спекания порошков сопровождается комплексом электрофизических, термодинамических и механических явлений, оказывающих влияние на процессы спекания образцов и их свойства.

Установлено, что процесс высоковольтного электроразрядного спекания порошков стали P6M5 сопровождается уплотнением порошка в результате спекания частиц, а также действием на образец из порошка сжимающих напряжений. Большое влияние на процесс высоковольтного электроразрядного спекания оказывают форма и размер частиц, характер поверхностных пленок, размер и форма матрицы.

К факторам, влияющим на прочностные свойства образцов, относятся гранулометрический состав порошка, его исходное электросопротивление, а также технологические параметры обработки, такие как энергия разряда и плотность разрядного тока.

Ключевые слова: порошок, сталь P6M5, высоковольтное электроразрядное спекание, прочность образца.

RESEARCH OF THE PROCESS OF HIGH VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE SINTERING OF P6M5 RAPID STEEL POWDER

**A. V. Alifanov, I. A. Bogdanovich, J. I. Krivonos,
V. V. Maleronok, A. M. Miliukova, O. A. Tolkacheva**

Abstract

Studies have been carried out to study the process of high-voltage electric-discharge sintering of powder of high-speed steel R6M5. The process of high-voltage electric-discharge sintering of powders is accompanied by a complex of electrophysical, thermodynamic and mechanical phenomena that affect the sintering processes of samples and their properties.

It was found that the process of high-voltage electric-discharge sintering of powders of P6M5 steel is accompanied by compaction of the powder as a result of sintering of particles, as well as by the action of compressive stresses on the sample from the powder.

The shape and size of particles, the nature of surface films, the size and shape of the matrix have a great influence on the process of high-voltage electric-discharge sintering.

Factors affecting the strength properties of samples include the particle size distribution of the powder, its initial electrical resistance, and technological processing parameters, such as discharge energy and discharge current density.

Keywords: powder, P6M5 steel, high-voltage electric-discharge sintering, sample strength.

Введение

Анализ литературных данных и патентной информации показывает, что основное количество публикаций по использованию высоковольтного электрического разряда в различных средах и сильного импульсного магнитного поля посвящено вопросам получения высоких импульсных давлений и температур для процессов обработки материалов давлением, сварки, прессования–спекания порошковых материалов, воздействия на структуру и физические свойства с целью упрочнения, повышения износостойкости изделий и т. д.

О возможности спекать порошки, пропуская через них электрический ток, давно известно [1]. Наибольшее распространение получили процессы горячего прессования с пропусканием через порошок постоянного тока промышленной частоты [2]. В Японии появилось новое направление – низковольтное электроразрядное спекание [3], которое получило дальнейшее развитие в США [4] и в СССР [5, 6].

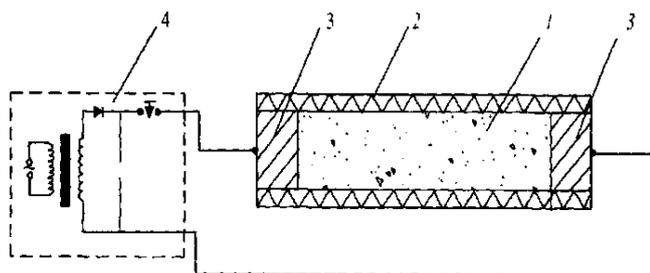
Для низковольтного электроразрядного спекания порошков характерна некоторая критическая величина, выше которой возможно возникновение электрических разрядов во всем объеме прессовки. Нагрев порошка идет как за счет джоулева тепла, так и за счет возникновения электрических искровых разрядов между частицами порошка, благодаря которым происходит интенсивный разогрев металла в приконтактных участках и разрушение окисных пленок с поверхности металлических частиц. Методом низковольтного электроразрядного спекания порошковые материалы спекают в течение нескольких десятков секунд.

В последнее время широко исследуется также метод высоковольтного электроразрядного спекания (ВЭРС) порошков с использованием энергии конденсаторной батареи генератора импульсных токов [7–15].

Основная часть

Принципиальная схема устройства для ВЭРС порошков приведена на рисунке 1. Металлический порошок (1) размещается в матрице (2) из изоляционного материала между электродами (3), с помощью которых осуществляется подпрессовка порошка. Электроды подключены к генератору импульсных токов (ГИТ) (4). Электрическая энергия, накопленная в конденсаторной батарее ГИТ, разряжается через порошковый материал 1.

Высоковольтное электроразрядное спекание характеризуется прохождением через порошок импульса электрического тока плотностью свыше 10^4 А/см² при напряжении 5–20 кВ и более в течение 10–1000 мкс и внешнем удельном давлении до 100 МПа.



1 – порошок; 2 – матрица; 3 – электроды-пуансоны;
4 – генератор импульсных токов

Рисунок 1 – Схема устройства для электроразрядного спекания порошков

В зависимости от плотности импульса тока возможны следующие особенности процесса формования:

- при малой плотности тока происходит лидерный пробой, соединение отдельных частиц порошка в результате возникновения жидкой фазы в микроконтактах, образование металлических равномерно рассеянных по объему вкраплений (прессовка плохо сохраняет свою форму после извлечения частиц);
- при средней плотности тока увеличивается плотность металлических вкраплений, формируются металлические нити и волокна, образуется жесткий каркас, несколько уплотняется порошок в поперечном относительно линии тока направлении в результате действия сил, вызванных пинч-эффектом (прессовка сохраняет форму, транспортабельна);
- при плотности тока больше критической величины происходит плавление порошка по отдельным каналам, электрический взрыв и разрушение прессовки.

Процесс ВЭРС металлических порошков при средней плотности тока при переходе от столбика свободно упакованных частиц к заготовке определенной формы и прочности может рассматриваться как трехстадийный. Первая стадия характеризуется электрическим пробоем окисных пленок, при этом происходит образование шеек между металлическими частицами порошка и вследствие этого быстрое начальное падение электросопротивления и образование проводящих нитей. Скорости образования шеек велики для любого диффузионного процесса переноса массы частиц в твердом состоянии. Нагрев всей массы порошкового тела во время роста шеек создает нормальное термическое сопротивление (вторая стадия). Данную стадию отличает также действие электродинамических сил, направленных к центру столбика свободно упакованных частиц и способствующих его уплотнению. Конечная третья стадия характеризуется тем, что уплотненный столбик представляет собой компактное тело с определенной степенью пористости и может служить в качестве проводника электрического тока.

Быстрое начальное падение электросопротивления, обусловленное электрическим пробоем, и рост электросопротивления вследствие нагрева порошкового тела – два основных фактора, влияющих на результирующее электросопротивление в процессе разряда.

Большое влияние на процесс ВЭРС оказывают форма и размер частиц, характер поверхностных пленок, размер и форма матрицы.

О числе вероятных контактов между частицами порошка можно судить с позиции плотности их упаковки и оптимизировать режим процесса спекания.

В данной работе проведено высоковольтное электроразрядное спекание образцов из порошка быстрорежущей стали Р6М5 по принципу, отображенному на рисунке 1. Цилиндрические образцы диаметром 10 и 14 мм высотой 20 и 30 мм соответственно спекали при энергии разряда от 1 до 10 кДж и максимальном напряжении от 2,2 до 5,9 кВ.

Интенсивность разряда и количество выделяемой энергии в значительной степени зависят от электросопротивления изолирующих промежутков, образованных жировыми, окисными и адсорбированными слоями различного состава, покрывающими поверхность частиц, а также воздушными зазорами между ними.

Оценку электрической прочности межчастичной изоляции осуществляли путем измерения электросопротивления порошка, засыпанного в цилиндрический контейнер из диэлектрического материала. Снизу и сверху контейнер закрывали латунными электродами. К электродам подключали ламповый вольтметр ВК-7-9, которым измеряли электросопротивление от 200 Ом и более, или универсальный мост УГИП-60 при измерении сопротивлений менее 10 Ом.

Была исследована зависимость электросопротивления засыпки модельного порошка от усилия сжатия засыпки между электродами для порошков быстрорежущей стали Р6М5 (все порошки в состоянии поставки). Нагружение осуществляли на испытательной машине ЗД-10/90.

Зависимость электросопротивления засыпки от усилия сжатия столбика порошка между электродами приведена в табл. 1, из которой видно, что при увеличении усилия прижима от минимального (10 кг) до максимального (100 кг) значения электросопротивление засыпки порошка с размером частиц порядка 200 мкм уменьшается от $270 \cdot 10^3$ Ом до 0,05 Ом соответственно, а для порошка с размером частиц порядка от 30 до 500 мкм электросопротивление уменьшается от $1,2 \cdot 10^3$ Ом до 0,02 Ом. В последнем случае электросопротивление уменьшается более эффективно в связи с тем, что мелкозернистые порошки с легкостью заполняют промежутки между крупнозернистыми, увеличивая этим плотность всей засыпки, особенно при нагружении.

Таблица 1 – Зависимость электросопротивления засыпки порошка Р6М5 от величины нагрузки

| Вид порошка | Электросопротивление засыпки, Ом, при усилии прижима, кг | | | | | | | | |
|-------------------|--|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 500 | 700 | 1000 |
| Р6М5 (200 мкм) | $270 \cdot 10^3$ | 10^3 | 100 | 14 | 4 | 0,9 | 0,2 | 0,1 | 0,05 |
| Р6М5 (30–500 мкм) | $1,20 \cdot 10^3$ | 20 | 3,63 | 0,83 | 0,45 | 0,14 | 0,05 | 0,04 | 0,02 |

В таблице 2 представлены результаты эксперимента по определению влияния электросопротивления засыпки на прочность образцов диаметром 10 мм на сжатие из порошка Р6М5 после электроразрядного спекания с энергией разряда 2 кДж.

Таблица 2 – Влияние электросопротивления засыпки на прочность спеченного образца на сжатие

| Номер образца | Электросопротивление, Ом | | Прочность на сжатие, МПа |
|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| | до разряда | после разряда | |
| 1 | 3000 | 0,0030 | 5,7 |
| 2 | 271 | 0,0037 | 5,0 |
| 3 | 20 | – | 4,8 |
| 4 | 9,5 | 0,0040 | 4,1 |
| 5 | 0,72 | 0,0030 | 1,9 |
| 6 | 0,14 | 0,0024 | 0 |
| 7 | 0,07 | 0,0023 | 0 |

Из таблицы 2 видно, что исходное электросопротивление порошка оказывает значительное влияние на процесс сварки частиц порошка и, соответственно, на прочность образцов. Максимальную прочность на сжатие (5,7 МПа) имеют образцы, имеющие максимальное электросопротивление до разряда (3000 Ом).

Как показали измерения по осциллограммам тока и напряжения, исходное сопротивление порошка (до разряда) не оказывает влияния на амплитуду и частоту разрядного тока. Это говорит о том, что образование проводящих каналов в массе порошка происходит в предразрядный период путем лидерного пробоя межчастичной изоляции (окисных и жировых пленок и воздушных промежутков). Проходящий затем импульс тока большой плотности осуществляет интенсивный разогрев контактных поверхностей частиц и их сварку.

На рисунке 2 (а, б) представлены фотографии частиц порошка до и после прохождения разрядного тока через образец. На рисунке 2, б видны места сварки частиц.

Процесс высоковольтного электроразрядного спекания сопровождается некоторым уплотнением порошка в результате слияния частиц, а также действия на образец сжимающих напряжений, вызываемых пинч-эффектом в поперечном относительно линии тока направлении. Пористость образцов диаметром 10 мм при увеличении плотности тока от 100 до 330 кА/см² уменьшилась на 14 %, а образцов диаметром 14 мм – на 5 %, что можно объяснить тем, что удельное давление на образец диаметром 10 мм превышает удельное давление на образец диаметром 14 мм, так как усилия сжатия образцов в обоих случаях были одинаковыми.

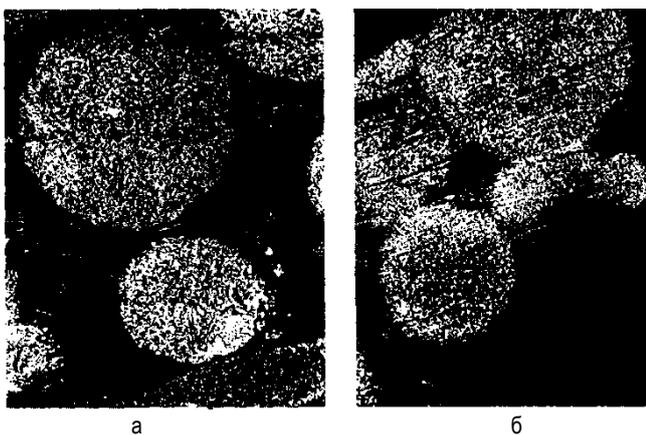


Рисунок 2 – Макроструктура образцов из порошка Р6М5 до (а) и после (б) высоковольтного электроразрядного спекания х 200

Зависимости прочности на сжатие от энергии разряда представлены на рисунке 3. Из приведенных зависимостей следует, что в исследованном диапазоне энергии разряда прочность образцов из материала Р6М5 линейно зависит от подводимой энергии. Прочность образцов диаметром 10 мм увеличивается более интенсивно, чем образцов диаметром 14 мм, так как удельная энергия, воздействующая на образец диаметром 10 мм, превышает удельную энергию, действующую на образец диаметром 14 мм, что приводит к более значительному уплотнению порошка.

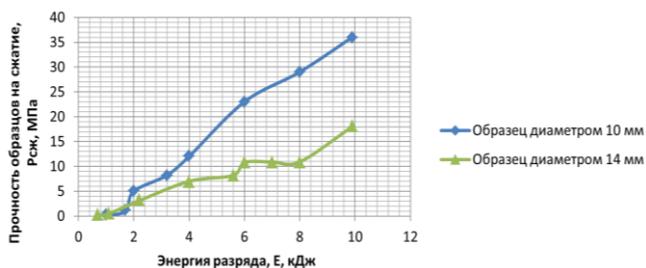


Рисунок 3 – Зависимость прочности образцов на сжатие от энергии разряда

На рисунке 4 показана зависимость прочности образцов, изготовленных из порошка Р6М5, от плотности тока. Под плотностью тока (j , кА/см²) подразумевается отношение силы тока к площади поперечного сечения проводника, в данном случае – образца из порошка стали Р6М5.

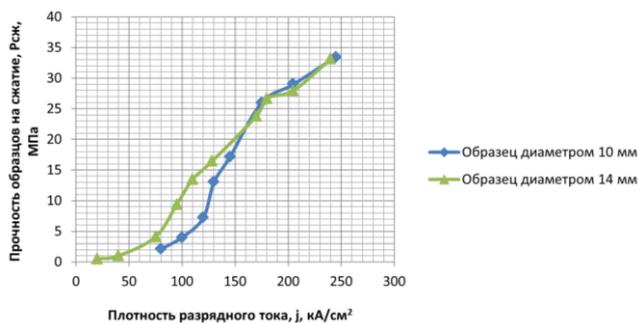


Рисунок 4 – Зависимость прочности образцов на сжатие от плотности разрядного тока

Как показали исследования, в данном случае диаметр образца существенно не влияет на его прочность при сжатии, так как разрядный ток равномерно распределяется по всей поверхности образца. Поэтому зависимости прочности образцов диаметром 10 и 14 мм от плотности разрядного тока мало отличаются друг от друга и характер данных зависимостей стремится к линейному.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) процесс высоковольтного электроразрядного спекания порошков сопровождается комплексом электрофизических, термодинамических и механических явлений, оказывающих влияние на процессы спекания образцов и их свойства;
- 2) среди факторов, влияющих на количество спаек между частицами порошка и, соответственно, на прочностные свойства спекленных данным способом образцов, следует отметить гранулометрический состав порошка, его исходное электросопротивление, а также технологические параметры обработки, такие как энергия разряда и плотность разрядного тока.

Список цитированных источников

1. Патент США № 2355954. Способ спекания порошков / Г. Кремер. – Оubl. 15.08.1944.
2. Самсонов, Г. В. Горячее прессование / Г. В. Самсонов, М. С. Ковальченко. – Киев : Наукова думка, 1962. – 126 с.
3. Патент Японии № 3241956. Электроразрядное спекание / Иноуэ Киёси. – Оubl. 29.10.1963.
4. Goetzel, E. G. Electric discharge sintering of powders / E. G. Goetzel, V. S.de Macchi. // Power Metall Intern. – 1971. – Vol. 3, № 2. – 30 p.
5. Райченко, А. И. Стойкость материалов электродов-пуансонов и матриц в процессе электроразрядной обработки металлических порошков / А. И. Райченко, О. Н. Рябинина // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 38–41.
6. Райченко, А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А. И. Райченко. – М. : Металлургия, 1987. – 128 с.
7. Clyens, S. // Int. J. of Mechanical Sciences / S. Clyens., S. Al-Hassani, W. Johnson. – 1976. – № 18. – P. 37.
8. Аль-Хассани, С. Т. Электроразрядное уплотнение порошков / С. Т. Аль-Хассани // Прогрессивные технологические процессы в порошковой металлургии. – Минск : Вышэйш. шк., 1982. – С. 81–89.
9. Мальцев, И. М. Электрокомпактирование металлических материалов / И. М. Мальцев // Современные технологии и материаловедение : сборник научных трудов. – Магнитогорск : МГТУ, 2003. – С. 165–168.

10. Мальцев, И. М. Исследование процесса электроимпульсного спекания порошка при прокатке / И. М. Мальцев, В. Г. Петриков // Управление строением отливок и слитков: Межвузовский сборник научных трудов. – Нижний Новгород : РГГТУ, 1998. – С. 136–138.
11. Высоковольтное ударное электроимпульсное спекание / С. В. Лемешев [и др.] // Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях : сборник трудов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей и механиков. – Ростов-на-Дону, 2014. – С. 130–136.
12. Спекание металлических порошков серий сильноточных импульсов / Н. Н. Заводов [и др.] // ТВТ. – 1999. – Т. 37, Вып. 1. – С. 135–141.
13. Белявин, К. Е. Получение пористых материалов из тугоплавких металлов методом электроимпульсного спекания / К. Е. Белявин, В. К. Шелег // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 2. – С. 68–77.
14. Рябинина, О. М. Физико-механические свойства композитов, полученных электроразрядным спеканием / О. М. Рябинина // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2005. – Том 2, № 10. – С. 102–106.
15. Разрядно-импульсное прессование композиционных материалов / С. В. Нескоромный [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (83). – С. 76–81.
6. Rajchenko, A. I. Osnovy processa spekaniya poroshkov propuskaniem elektricheskogo toka / A. I. Rajchenko. – M. : Metallurgiya, 1987. – 128 s.
7. Clyens, S. // Int. J. of Mechanical Sciences / S. Clyens., S. Al-Hassani, W. Johnson. – 1976. – № 18. – R. 37.
8. Al'-Hassani, S. T. Elektrorazryadnoe uplotnenie poroshkov / S. T. Al'-Hassani // Progressivnye tekhnologicheskie processy v poroshkovoj metallurgii. – Minsk : Vyshejsh. shk., 1982. – S. 81–89.
9. Mal'cev, I. M. Elektrokompaktirovanie metallicheskih materialov / I. M. Mal'cev // Sovremennye tekhnologii i materialovedenie : sbornik nauchnyh trudov. – Magnitogorsk : MG TU, 2003. – S. 165–168.
10. Mal'cev, I. M. Issledovanie processa elektroimpul'snogo spekaniya poroshka pri prokatke / I. M. Mal'cev, V. G. Petrikov // Upravlenie stroeniem otlivok i slitkov: Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. – Nizhnij Novgorod : RGGTU, 1998. – S. 136–138.
11. Vysokovolt'noe udarnoe elektroimpul'snoe spekanie / S. V. Lemeshev [i dr.] // Volnovye, vibrovolnovye tekhnologii v mashinostroenii, metalloobrabotke i drugih otraslyah : sbornik trudov mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma tekhnologov-mashinostrotelej i mekhanikov. – Rostov-na-Donu, 2014. – S. 130–136.
12. Spekanie metallicheskih poroshkov seriej sil'notochnyh impul'sov / N. N. Zavodov [i dr.] // TVT. – 1999. – Т. 37, Вып. 1. – С. 135–141.
13. Belyavin, K. E. Poluchenie poristyh materialov iz tugoplavkih metallov metodom elektroimpul'snogo spekaniya / K. E. Belyavin, V. K. Sheleg // Teoriya i praktika mashinostroeniya. – 2004. – № 2. – S. 68–77.
14. Ryabinina, O. M. Fiziko-mekhanicheskie svojstva kompozitov, poluchennyh elektrorazryadnym spekaniem / O. M. Ryabinina // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2005. – Том 2, № 10. – С. 102–106.
15. Razryadno-impul'snoe pressovanie kompozicionnyh materialov / S. V. Neskoromnyj [i dr.] // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2015. – № 4 (83). – S. 76–81.

References

Материал поступил в редакцию 06.12.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ В ФРИКЦИОННЫХ РЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧАХ

А. Г. Баханович

Д. т. н., доцент, ректор Брестского государственного технического университета, г. Брест, Беларусь, e-mail: rector@bstu.by

Реферат

Рассмотрены физические закономерности передачи мощности гибкой связью фрикционного типа (ремнем) посредством силы трения, возникающей на дугах обхвата шкивов передачи. Получены теоретические зависимости напряжений и деформаций элементов ремня от основных геометрических и кинематических параметров передачи, позволяющих перейти к прогнозированию долговечности ремня.

Ключевые слова: фрикционная ременная передача, геометрические и кинематические параметры, напряженно-деформированное состояние, долговечность.

INVESTIGATION OF THE PHYSICAL PROCESSES OF POWER TRANSMISSION IN FRICTION BELT DRIVES

A. G. Bakhanovich

Abstract

The physical regularities of power transmission by a flexible friction-type coupling (belt) by means of the friction force arising on the arcs of the transmission pulleys girth are considered. Theoretical dependences of stresses and deformations of belt elements on the basic geometric and kinematic transmission parameters are obtained, allowing to proceed to the prediction of belt durability.

Keywords: friction belt drive, geometric and kinematic parameters, stress-strain state, durability.

Введение

Как известно, передача окружной силы в фрикционной ременной передаче (ФРП) осуществляется не на всей дуге обхвата ремня и шкивов, а лишь на ее части, в пределах которой происходит взаимное скольжение ремня и шкива. Эти части дуг, расположенные на обоих шкивах со стороны сбегающей ветви ремня, называют дугами скольжения. Доказательства этих положений основаны на применении условия постоянства массы ремня при изменении его натяжения, подобного условию неразрывности потока жидкости:

$$q_x \cdot V_x = \text{const},$$

где q_x и V_x – масса единицы ремня и его скорость при прохождении данного сечения.

Так как $q_x = q / (1 + \varepsilon_x)$, где q – масса единицы длины недеформированного ремня, ε_x – относительное удлинение ремня при прохождении им данного сечения, получим:

$$\frac{V_x}{1 + \frac{F_x}{EFA}} = \text{const}, \quad (1)$$

где F_x – усилие в ремне в данном сечении;
 A – площадь поперечного сечения ремня.

Из уравнения (1) следует, что части растяжимого ремня различными натяжениями имеют разные скорости, причем скорость больше в тех точках, в которых ремень больше растянут. Поскольку окружная скорость шкива одинакова во всех точках дуги обхвата, то изменение натяжения ремня вдоль дуги обхвата должно сопровождаться скольжением ремня относительно шкивов.

Результатом упругого скольжения ремня на шкивах является относительная потеря скорости в передаче, выражаемая через коэффициент относительного скольжения:

$$\xi_c = 1 - \frac{V_2}{V_1}, \quad (2)$$

где V_2 и V_1 – линейные скорости точек шкивов, совпадающих с расположением нейтрального слоя ремня.

Исследование физических процессов передачи мощности

Анализ работы ременной передачи, основанный на предположении, что в ремне возникают только деформации изгиба и растяжения, значительно упрощает действительную картину явлений, происходящих в передаче мощности ремнем конечной толщины. Так, при передаче мощности в деформируемых средах возникают деформации сдвига, как это имеет место, например, в почво-грунтах при воздействии на них ведущих колес транспортных средств [1]. Таким образом, в реальных передачах ремень на шкивах претерпевает сложную деформацию, в том числе деформацию сдвига, возникающую под действием касательной нагрузки, приложенной к его рабочей поверхности со стороны шкива с учетом сдвига натяжения ремня, если его рассматривать как сумму натяжений отдельных слоев, может изменяться при отсутствии скольжения шкива относительно прилегающего к нему слоя ремня.

Для ременных передач считаем рабочие поверхности ремня идеально гладкими и под предварительным смещением понимаем происходящие под действием касательной нагрузки сдвиги в материале ремня, проявляющиеся в повороте его поперечных сечений. При этом предполагаем о наличии однозначной и определенной связи между деформациями ремня и действующими в нем силами.

Рассмотрим с этих позиций установившийся процесс передачи окружной силы на ведущем шкиве (рисунок 1).

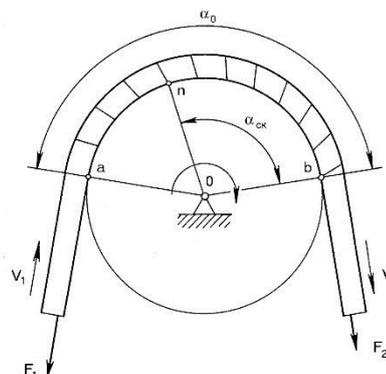


Рисунок 1 – Изменение сдвигов в ремне на дуге обхвата ведущего шкива

Предположим, что со стороны сбегания ремня имеется дуга скольжения nb . В пределах дуги скольжения на ремень со стороны шкива действуют силы трения скольжения, интенсивность которых в каждой точке контакта определяется давлением и коэффициентом трения. Следовательно, силы трения наибольшей интенсивности действуют в точке b , где натяжение ремня, а вместе с ним и давление, наибольшее для дуги nb .

Так как сила трения на каждый элемент ремня действует эксцентрично по отношению к касательной, составляющей равнодействующую сил натяжения, то они обуславливают сдвиг в ремне, проявляющийся в повороте его поперечных сечений. При этом наибольший сдвиг в ремне, очевидно, должен быть в начале дуги скольжения, т. е. в точке срыва b , где интенсивность касательных сил максимальна. Если исходить из равенства скоростей шкива и набегающей ветви ремня, то после набегания ремня на шкив отношение скоростей его нейтрального слоя и слоя, прилегающего к шкиву и перемещающегося на дуге an совместно со шкивом, оказывается равным отношению радиусов расположения этих слоев на шкиве. В этом случае каждое поперечное сечение ремня после набегания последнего на шкив остается радиально расположенным при их совместном движении и нет причин для возникновения касательных сил между шкивом и ремнем не только в пределах дуги an , но и на всей дуге обхвата. Итак, необходимым условием существования дуги скольжения, как и вообще передачи окружной силы ведущим шкивом, является некоторое отставание набегающей ветви от шкива.

Чтобы натяжение ремня после его набегания на шкив не изменялось, его скорость должна совпадать с окружной скоростью шкива на радиусе расположения на нем нейтрального слоя ремня. Поэтому при определении потерь скорости при набегании, возникающих в процессе передачи окружной силы, скорость каждой ветви ремня следует сравнивать именно с окружной скоростью ωR шкива, на который данная ветвь набегает.

Относительные потери скорости при набегании ремня на ведущий и ведомый шкивы в соответствии с (2) тогда будут равны:

$$\xi_1 = \frac{\omega_1 R_1 - V_1}{\omega_1 R_1}, \quad (3)$$

$$\xi_2 = \frac{V_2 - \omega_2 R_2}{V_2}. \quad (4)$$

Для плоского ремня принимаем нейтральный слой, совпадающий со средним слоем ремня.

Очевидно, что общая относительная потеря скорости в ФРП, оцениваемая по потере угловой скорости ведомого шкива и в том случае, когда она включает в себя ряд составляющих, выражается той же формулой (2). В соответствии с (3) и (4) преобразуем ее следующим образом:

$$\xi = \frac{\omega_{2xx} - \omega_2}{\omega_{2xx}} = \frac{\omega_1 R_1 - \omega_2 R_2}{\omega_1 R_1} = \frac{(\omega_1 R_1 - V_1) + (V_1 - V_2) + (V_2 - \omega_2 R_2)}{\omega_1 R_1} = \xi_1 + \xi_c V_1 + \xi_2 \frac{V_2}{\omega_1 R_1} = \xi_1 + \xi_c (1 - \xi_1) + \xi_2 (1 - \xi_1) (1 - \xi_c), \quad (5)$$

где ω_{2xx} – окружная скорость ведомого шкива при холостом ходе передачи.

Так как произведение бесконечно малых величин стремится к 0, то с точностью до 0,95 выражение (5) может быть представлено в виде:

$$\xi = \xi_1 + \xi_c + \xi_2.$$

Так как потери скорости в передаче складываются из нескольких компонентов, необходимо получить формулы, позволяющие по коэффициенту тяги ψ определять относительные потери скорости при набегании ремня на шкивы ξ_1 и ξ_2 . Вывод их требует привлечения к уравнениям равновесия элемента ремня уравнений деформации. Предполагая закон распределения напряжений растяжения (сжатия) в поперечных сечениях ремня линейным, определим зависимость удельных касательных сил q_b действующих между шкивом и элементом ремня, от деформации сдвига, которую претерпел этот элемент.

В пределах элемента считаем удельные касательные силы постоянными.

Так как толщина ремня H_p обычно мала по сравнению с радиусом шкива R , то, не внося большой погрешности, мы можем рассматривать сдвиг элемента ремня, контактирующего не с цилиндром, а с плоскостью (рисунок 2).

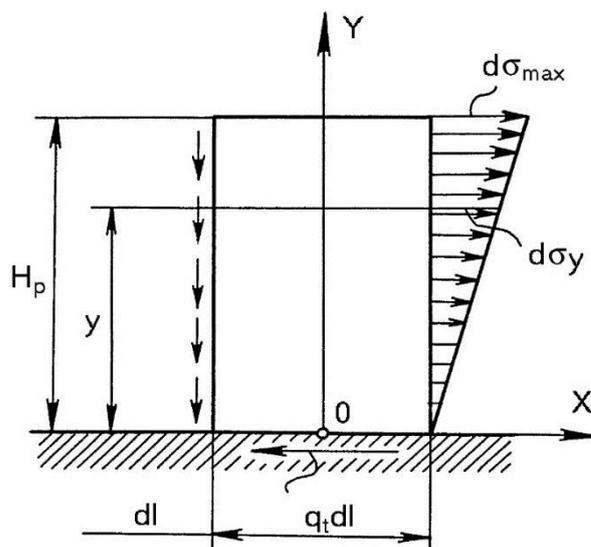


Рисунок 2 – Нагрузка элемента ремня на дуге сцепления

При линейном законе распределения напряжений растяжения в поперечных сечениях ремня разность натяжений, действующих в граничных поперечных сечениях элемента, также распределена по линейному закону. На дугах сцепления прилегающий к шкиву слой ремня, как известно, не скользит относительно шкива и, таким образом, не удлиняется и не сокращается. Следовательно, напряжение растяжения в этом слое также не изменяется. Тогда разность натяжений, под действием которой происходит сдвиг элемента ремня на дугах сцепления, распределена по закону треугольника, вершина которого расположена у плоскости контакта.

Предположим, что в контакте элемента ремня с плоскостью действуют удельные касательные силы q_t . Проецируя приложенные к элементу ремня силы на ось OX, из условия равновесия элемента определяем разность напряжений растяжения, действующих в периферийном слое ремня, которая должна иметь место при данном значении q_t и при распределении разности натяжений по закону треугольника:

$$d\sigma \frac{2dl}{H_p \max}$$

Тогда разность напряжений растяжения, действующих в слое, отстоящем от плоскости контакта на расстоянии y , равна:

$$d\sigma_y = \frac{y}{H_p} d\sigma \frac{2ydl}{H_p^2 \max}$$

Касательные напряжения, действующие в продольном сечении элемента, отстоящем от плоскости контакта на расстоянии y , определяем из условия равновесия верхней части элемента:

$$\tau_y = (H_p - y) \frac{d\sigma_{\max}}{2dl_t \frac{H_p^2 - y^2}{H_p^2}}$$

Считая касательные напряжения на всех гранях элементарной призмы высотой dy (рисунок 3) постоянными, определяем относительный сдвиг призмы как находящейся в условиях чистого сдвига:

$$\gamma_y = \frac{\tau_y}{G} = \frac{q_t}{GH_p^2} (H_p^2 - y^2),$$

где G – модуль упругости ремня при сдвиге.

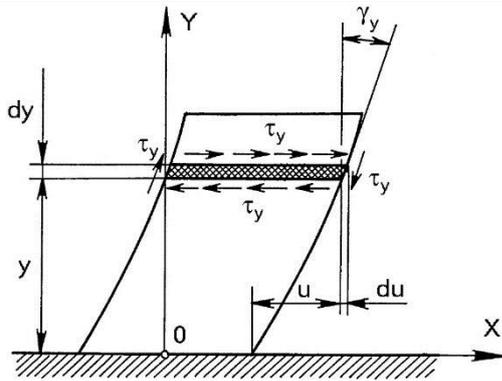


Рисунок 3 – Деформация сдвига элемента ремня ФРП на дуге сцепления

Соответствующий этому относительному сдвигу абсолютный сдвиг du продольных граней призмы выразится как:

$$du = \gamma_y dy = \frac{q_t}{GH_p^2} (H_p^2 - y^2) dy.$$

Суммируя абсолютные сдвиги элементарных призм, находим уравнение изменения абсолютных сдвигов продольных сечений элемента dy ремня относительно его контактирующей поверхности, которое определяет форму поперечных сечений элемента после сдвига:

$$u = \frac{q_t}{GH_p^2} \int_0^y (H_p^2 - y^2) dy = \frac{q_t}{G} \left(y - \frac{y^3}{3H_p^2} \right). \quad (6)$$

Для составления уравнений, описывающих передачу окружной силы на дугах сцепления, необходимо выразить удельные касательные силы q_t через сдвиг каких-либо двух определенных слоев ремня. Ниже будет показано, что наиболее целесообразно учитывать абсолютный сдвиг u_{cp} среднего и нижнего слоев ремня относительно друг друга.

Подстановкой в (6) значения $y = H_p / 2$ получаем искомое уравнение зависимости q_t от u_{cp} на дугах сцепления:

$$q_t \approx \frac{2,2Gu_{cp}}{H_p}. \quad (7)$$

Зная заранее направление действия касательных сил, целесообразно соответствующий в каждом случае этому направлению сдвиг u_{cp} как на ведущем (рисунок 4), так и на ведомом шкивах считать положительным. Тогда приращения du_{cp} на дугах сцепления обоих шкивов будут всегда положительными.

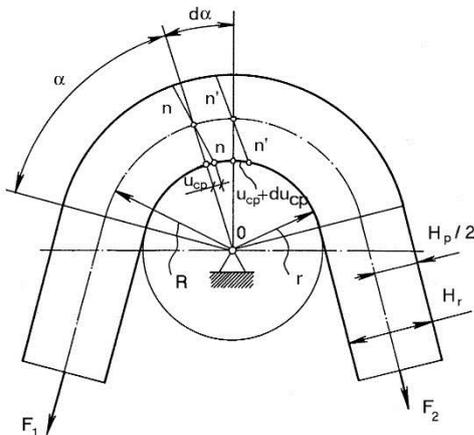


Рисунок 4 – Приращение деформации ремня ФРП на дуге сцепления

В соответствии с этим можем записать: для ведущего шкива

$$du_{1cp} = \left[V_{r1,\alpha} - V_{R1,\alpha} \frac{r_1}{R_1} \right] dt,$$

для ведомого шкива

$$du_{2cp} = \left[V_{R2,\alpha} \frac{r_2}{R_2} - V_{r2,\alpha} \right] dt,$$

где $V_{R,\alpha}$ – скорость средней по толщине ремня точки поперечного сечения $n-n$;

$V_{R,\alpha} / R$ – скорость, которую должна иметь соприкасающаяся со шкивом точка поперечного сечения $n-n$;

$V_{R,\alpha} = \omega r = \text{const}$ – действительная скорость соприкасающейся со шкивом точки поперечного сечения $n-n$ на дуге сцепления;

$dt = R_{d\alpha} / V_{R,\alpha}$ – время перемещения поперечного сечения $n-n$ в соседнее бесконечно близкое положение $n'-n'$.

Вводя в эти уравнения выражения для $V_{R,\alpha}$ и dt , записанные отдельно для ведущего и ведомого шкивов, получим:

$$V_{R1,\alpha} = V_1 \frac{1 + \frac{F}{EFA}}{1 + \frac{F_1}{EFA}} = \frac{V_1}{1 + \frac{F_1 - EF}{EFA}} \quad (8)$$

$$V_{R2,\alpha} = V_2 \frac{1 + \frac{F}{EFA}}{1 + \frac{F_2}{EFA}} = \frac{V_2}{1 - \frac{F - F_2}{EFA}} \quad (9)$$

Текущую скорость $V_{R1,\alpha}$ среднего слоя ремня на каждом из шкивов выразим через скорость и натяжение набегающей на шкив ветви:

$$du_{kp} = \left[\frac{\omega_1 R_1}{V_{R1,\alpha}} - 1 \right] r_1 d\alpha, \quad (10)$$

$$du_{2cp} = \left[1 - \frac{\omega_2 R_2}{V_{R2,\alpha}} \right] r_2 d\alpha. \quad (11)$$

Подставив выражения (10) и (11) соответственно в (8) и (9) после преобразований, получим:

$$du_{1cp} = \left[\frac{F_1 - F}{EFA(1 - \xi_1)} + \frac{\xi_1}{1 - \xi_1} \right] r_1 d\alpha, \quad (12)$$

$$du_{2cp} = \left[\frac{(F - F_2)(1 - \xi_2)}{EFA} + \xi_2 \right] r_2 d\alpha. \quad (13)$$

Принимая при проецировании сил на координатные оси $\cos(d\alpha/2) \approx 1$; $\sin(d\alpha/2) \approx d\alpha/2$ (рисунок 5) и пренебрегая бесконечно малыми второго порядка, для ведущего шкива получим:

$$dF + q_t b_p r_1 d\alpha = 0, \quad (14)$$

$$q_n b r_1 - F = 0.$$

Решая совместно эти уравнения статики с уравнениями деформации (7) и (12), находим F_i , u_{1cp} , q_t в зависимости от угла α и относительной потери скорости ξ_1 , при набегаании ремня на ведущий шкив.

Из уравнения (12) имеем:

$$\frac{dF}{d\alpha} = - \frac{EFA(1 - \xi_1)}{r_1} \cdot \frac{\alpha^2 u_{1cp}}{d\alpha^2}. \quad (15)$$

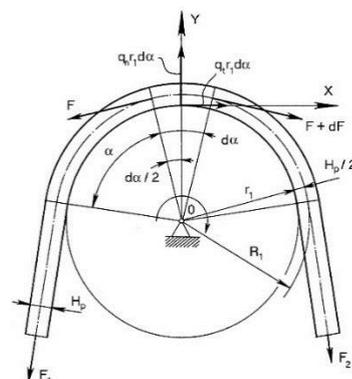


Рисунок 5 – Силы, действующие на дуге сцепления ведущего шкива

Выразив q_t через u_{cp} в соответствии с (7) с учетом (15), преобразуем уравнение (14) к виду:

$$\frac{d^2 u_{1cp}}{d\alpha^2} - \frac{K_1}{1 - \xi_1} u_{1cp} = 0,$$

где K_1 – безразмерный коэффициент.

$$K_1 = \frac{2,2Gr_1^2}{E_F H_p^2}.$$

Общее решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$u_{1cp} = c_1 e^{\left(\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha\right)} + c_2 e^{\left(-\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha\right)}. \quad (16)$$

Постоянные определяем из начальных условий: $\alpha = 0, u_{1cp} = 0, du_{1cp}/d\alpha = \xi_1 r_1 / (1 - \xi_1)$.

Кроме того, при $\alpha = 0 \rightarrow F = F_1$.

При этих начальных условиях уравнение (16) примет вид:

$$u_{1cp} = \frac{\xi_1}{\sqrt{1-\xi_1}} \cdot \frac{r_1}{2\sqrt{K_1}} \left[e^{\left(\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha\right)} - e^{\left(-\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha\right)} \right]. \quad (17)$$

Дифференцируя (17), подставляя $du_{1cp}/d\alpha$ в уравнение (16) и переходя от натяжений ремня к напряжениям $\sigma_{R1,\alpha}$, действующим в нейтральном слое ремня, получаем:

$$\sigma_{R1,\alpha} = \sigma_1 - \xi_1 E_F \left(\frac{e^{\left(\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha\right)} + e^{\left(-\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha\right)}}{2} - 1 \right).$$

Концом дуги сцепления и, следовательно, границей дуг сцепления и скольжения является точка, в которой происходит срыв. Угловую координату этой точки α_{1r} определяем из условия:

$$q_t = \mu q_n.$$

Подстановка в это равенство функций $q_t = q_t(\alpha)$ и $q_n = q_n(\alpha)$ приводит к следующему равенству, связывающему координату α_{1r} на ведущем шкиве с относительной потерей скорости при набегании ремня на этот шкив:

$$\xi_1 \left(\frac{\sqrt{K_1}}{2\sqrt{1-\xi_1}} \left[e^{\left(\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha_{1r}\right)} - e^{\left(-\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha_{1r}\right)} \right] + \frac{\mu}{2} \left[e^{\left(\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha_{1r}\right)} + e^{\left(-\frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\alpha_{1r}\right)} \right] - \mu \right) = \mu \frac{\sigma_1}{E_F}. \quad (18)$$

Полученные уравнения для дуги сцепления ведущего шкива теряют смысл при $\xi_1 \rightarrow 1$, поскольку при этом дуга сцепления стягивается в точку и скольжение распространяется на всю дугу обхвата.

Практически область применения уравнения ограничивается значением $\xi_1 \leq 0,02$, т. к. уже при этом достигается предельный коэффициент тяги. Поэтому без большого ущерба для точности можно считать $1 - \xi_1 \approx 1$ и выражение (18) может быть упрощено:

$$\xi_1 \left(\frac{\sqrt{K_1} + \mu}{2} e^{\sqrt{K_1}\alpha_{1r}} - \frac{\sqrt{K_1} - \mu}{2} e^{-\sqrt{K_1}\alpha_{1r}} - \mu \right) = \mu \frac{\sigma_1}{E_F}.$$

Уравнения равновесия в соответствии со схемой сил, действующих на элемент ремня на дуге обхвата ведомого шкива аналогичны применяемым при получении формулы Эйлера [2]. В соответствии со схемой (рис. 6) они имеют вид:

$$dF - q_t b_p r_2 d\alpha = 0,$$

$$-q_n - F = 0.$$

Эти уравнения совместно с уравнениями деформации (7) и (13) составляют систему, решение которой аналогично выполненному для дуги сцепления ведущего шкива.

Общее решение получаемого при этом дифференциального уравнения изменения абсолютного сдвига u_{2cp} по углу α имеет вид:

$$u_{2cp} = c_1 e^{\sqrt{1-\xi_2}\sqrt{K_2}\alpha} + c_2 e^{-\sqrt{1-\xi_2}\sqrt{K_2}\alpha},$$

где $K_2 = \frac{2,2Gr_2^2}{E_F H_p^2}$.

При начальных условиях $\alpha = 0, u_{2cp} = 0, du_{2cp}/d\alpha = \xi_2 r_2$ и с учетом того, что при $\alpha = 0 \rightarrow F = F_2$, искомое решение уравнения принимает вид:

$$u_{2cp} = \frac{\xi_2}{\sqrt{1-\xi_2}} \cdot \frac{r_2}{2\sqrt{K_2}} \left[e^{\sqrt{1-\xi_2}\sqrt{K_2}\alpha} - e^{-\sqrt{1-\xi_2}\sqrt{K_2}\alpha} \right].$$

Если, как и в предыдущем случае, опустить не влияющий на точность расчетов множитель $1 - \xi_2$, то получим выражения для расчета напряжения, действующего в среднем слое ремня и уравнение связи между координатой α_{2r} границы дуг сцепления и скольжения и относительной потерей скорости:

$$\sigma_{R2,\alpha} = \sigma_2 + \xi_2 E_F \left(\frac{e^{\sqrt{K_2}\alpha} + e^{-\sqrt{K_2}\alpha}}{2} - 1 \right),$$

$$\xi_2 \left(\frac{\sqrt{K_2} - \mu}{2} e^{\sqrt{K_2}\alpha_{2r}} - \frac{\sqrt{K_2} + \mu}{2} e^{-\sqrt{K_2}\alpha_{2r}} + \mu \right) = \mu \frac{\sigma_2}{E_F}.$$

Вывод

Таким образом, получены теоретические зависимости, описывающие закономерности функционирования ФРП с учетом, реально происходящих на дугах обхвата явлений и выражающиеся в учете не только продольной, но и имеющей место сдвиговой деформации эластомерного ремня.

Список цитированных источников

1. Алферов, С. А. Динамика зерноуборочного комбайна / С. А. Алферов. – М.: Машиностроение, 1973. – 253 с.
2. Решетов, Д. Н. Детали машин / Д. Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.

References

1. Alferov, S. A. Dinamika zemouborochnoho kombayna / S. A. Alferov. – M.: Mashinostroyeniye, 1973. – 253 s.
2. Reshetov, D. N. Detali mashin / D. N. Reshetov. – M.: Mashinostroyeniye, 1989. – 496 s.

Материал поступил в редакцию 19.12.2021

КОНСТРУКТОРСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ ЗУБЧАТО-РЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ

А. Г. Баханович

Д. т. н., доцент, ректор Брестского государственного технического
университета, г. Брест, Беларусь, e-mail: rector@bstu.by

Реферат

Рассмотрены конструкторские и технологические методы снижения шумоизлучения в зубчато-ременных передачах. Разработана усовершенствованная методика выбора рациональных геометрических параметров приводных зубчатых ремней, обеспечивающих минимальный уровень шума передачи.

Ключевые слова: зубчато-ременная передача, шумоизлучение, геометрические параметры, технология изготовления.

DESIGN AND TECHNOLOGICAL METHODS FOR REDUCING THE NOISE EMISSION OF TOOTHED-BELT TRANSMISSIONS

A. G. Bakhanovich

Abstract

Design and technological methods of noise emission reduction in toothed-belt transmissions are considered. An improved method for selecting rational geometric parameters of drive toothed belts that ensure a minimum level of transmission noise has been developed.

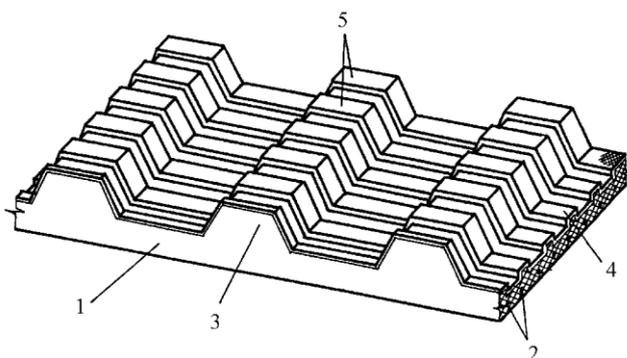
Keywords: toothed-belt transmission, noise emission, geometric parameters, manufacturing technology.

Введение

Анализ мировой научно-технической литературы и проведенный патентно-информационный поиск свидетельствуют о том, что существует тенденция создания конструкций зубчатых ремней, уровень шумоизлучения которых должен понижаться в результате демпфирования колебаний нагрузки.

Технологические методы

Существуют конструкции зубчатых ремней, которые имеют промежуточный слой резины, расположенный между обкладочной тканью и нитями кордшнура. Более эффективный метод демпфирования колебаний реализован в зубчатом ремне, представленном на рисунке 1.



1 – ремень; 2 – корд; 3 – зубья; 4 – обкладка; 5 – гребни

Рисунок 1 – Зубчатый ремень с демпфированием нагрузки

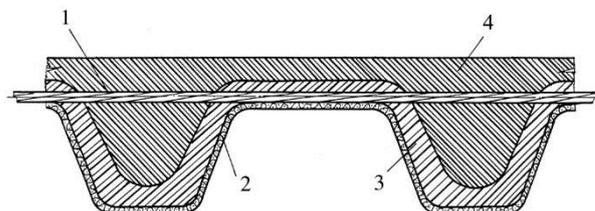
Основное отличие данного ремня – наличие на рабочих поверхностях ряда гребней. При колебаниях нагрузки гребни деформируются и сглаживается пульсация нагрузки. Зубчатый ремень с такими зубьями имеет два значения податливости зубьев. Повышенная податливость реализуется при контакте зубьев ремня и шкива, осуществляемом через гребни. Тогда неравномерность нагружения зубьев на дуге обхвата уменьшается. При перегрузке передачи гребни деформируются, происходит контакт зубьев ремня и шкива по всей поверхности.

Как и в конструкциях клиновых ремней, радикальным методом понижения уровня шумоизлучения зубчатых ремней следует считать

их армирование. Ввиду нетехнологичности армированных резин обычно из них выполняют только зубья ремня или их часть. Армирование всего массива зуба резиной, содержащей неориентированные вискозные волокна, армированные составом Л-19Ф, позволяет повысить усталостную долговечность зубьев ремня $m = 7$ мм при усилии $P = 15$ Н/мм на 50 % [1].

Существует точка зрения, согласно которой армировать волокнистой резиной весь объем зуба нецелесообразно. В работе [2] приводится обоснование конструкции, имеющей зубья с твердой сердцевиной из волокнистой резины и сравнительно мягкие наружные слои. Прочность таких зубьев на 60...80 % выше, чем у серийных ремней, а повышенная податливость поверхностных слоев зуба позволяет получить более благоприятное распределение нагрузки в зацеплении.

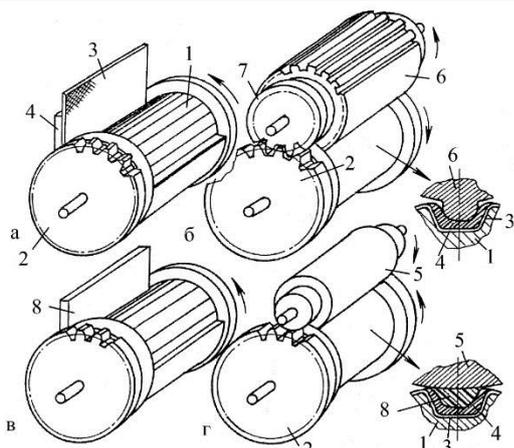
С другой стороны, известно, что усталостная трещина зарождается у основания зуба в поверхностном его слое. Данный поверхностный слой в наибольшей степени подвергается истиранию при зацеплении с зубьями шкива. Таким образом, представляется рациональным размещать волокнистую резину в периферийной части зуба (рис. 2). Недостаток такой конструкции – возможность расслаивания ремня по границе раздела двух слоев резины.



1 – кордшнур; 2 – обкладочная ткань;
3 – мягкий поверхностный слой; 4 – твердая основа

Рисунок 2 – Зубчатый ремень с наружным демпфирующим слоем

Технология сборки армированных ремней дополняется операциями укладки армирующих слоев или самой арматуры. Так, разработан метод сборки зубчатых ремней с зубьями, содержащими слою армированной резины (рис. 3).



а) укладка обкладочной ткани и армированной резины;
б) прикатка профильным валком; в) укладка неармированной резины;
г) прикатка гладким роликом

Рисунок 3 – Последовательность сборки армированного зубчатого ремня

Метод позволяет получить требуемую конфигурацию армирующего слоя резины во всех зубьях ремня [3]. Последовательность операций, согласно этому методу, следующая. На зубчатый сборочный барабан (1), снабженный дополнительным зубчатым венцом (2), укладывают обкладочную ткань (5). Затем профильный вал (6), оснащенный зубчатым венцом (7), входит в зацепление с зубчатым венцом (2) сборочного барабана (1). Далее на сборочный барабан (1) наматывается кордшнур, укладывается слой неармированной резины (8) и производится его прикатка гладким цилиндрическим роликом (9). Заготовка вместе с зубчатым сборочным барабаном снимается со станка и вулканизируется под действием тепла и давления.

Рациональные геометрические параметры приводных ремней.

Каркас как зубчатых, так и ремней фрикционного типа (плоских, поликлиновых, кордшнуровых клиновых) можно представить в виде плоского однонаправленного армированного слоя (рис. 4), образованного совокупностью армирующих элементов (кордшнуров) диаметром $d_c^{(k)}$, расположенных параллельно в массиве толщиной $h_0^{(k)} = H_p - h_p$. Семейство этих армирующих элементов однородно и обладает значительной по сравнению с окружающим эластомером прочностью и жесткостью.

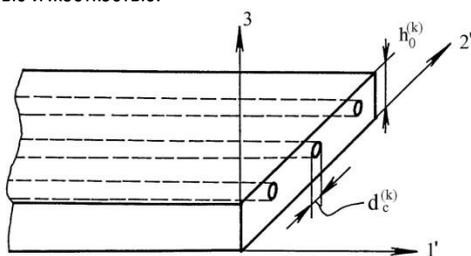


Рисунок 4 – Однонаправленно армированный несущий слой ремня

Методы, дающие оценку жесткости армирующего слоя, в совокупности можно условно классифицировать следующим образом:

- 1) анализ композиционного материала на основе курса сопротивления материалов;
- 2) оценка верхних и нижних границ жесткости композиционного материала на основе вариационных принципов;
- 3) анализ композиционного материала на основе теории упругости;
- 4) решение методом конечных элементов.

Ниже остановимся на подходе, в основу которого положены зависимости для определения упругих постоянных армированного слоя, полученные с применением первых трех методов.

Рассмотрим однонаправленно армированный слой (рис. 4), направив оси 1', 2', 3 вдоль армирующих волокон, перпендикулярно им в плоскости слоя и ортогонально плоскости слоя. Будем считать

матрицу линейно-упругой и изотропной с модулем упругости $E_R^{(k)}$, модулем сдвига $G_R^{(k)}$ и коэффициентом Пуассона $\nu_R^{(k)}$.

Аналогичное предположение сделаем относительно армирующих волокон, обозначив их упругие постоянные через $E_c^{(k)}$, $G_c^{(k)}$ и $\nu_c^{(k)}$.

Коэффициент армирования $\psi_c^{(k)}$ характеризует относительное объемное содержание волокон (корда). В этом случае соотношения между напряжениями и деформациями для слоя в его осях симметрии запишем так:

$$\psi_c^{(k)} = \frac{\pi(d_c^{(k)})^2}{4h_0^{(k)}l_c^{(k)}},$$

где $l_c^{(k)}$ – частота армирования (шаг навивки корда).

Если принять допущение, что насыщение кордом достаточно частое ($\alpha_c^{(k)} \approx l_c^{(k)}$), то с достаточной точностью можно считать слой изотропным, причем плоскость 2' 3 является плоскостью изотропии.

В этом случае соотношения между напряжениями и деформациями для слоя в его осях симметрии запишем так:

$$\begin{aligned} \sigma_{1'1'} &= C_{11}^{(k)}\varepsilon_{1'1'} + C_{12}^{(k)}\varepsilon_{2'2'}; & \sigma_{1'2'} &= C_{12}^{(k)}\varepsilon_{1'2'}; \\ \sigma_{2'2'} &= C_{12}^{(k)}\varepsilon_{1'1'} + C_{22}^{(k)}\varepsilon_{2'2'}; \\ \varepsilon_{1'3} &= (G_{13}^{(k)})^{-1}\sigma_{1'3}; & \varepsilon_{2'3} &= (G_{23}^{(k)})^{-1}\sigma_{2'3}. \end{aligned}$$

Компоненты матрицы осредненной жесткости армированного слоя находим с помощью выражений:

$$\begin{aligned} C_{11}^{(k)} &= \frac{E_1^{(k)}}{1-\nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; & C_{22}^{(k)} &= \frac{E_2^{(k)}}{1-\nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; \\ C_{12}^{(k)} &= \frac{\nu_{21}^{(k)}E_1^{(k)}}{1-\nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; & C_{21}^{(k)} &= C_{12}^{(k)}. \end{aligned}$$

где $E_1^{(k)}$, $E_2^{(k)}$ – модули упругости однонаправленного армированного слоя вдоль и поперек волокон корда;

$\nu_{12}^{(k)}$, $\nu_{21}^{(k)}$ – коэффициенты Пуассона;

$G_{12}^{(k)}$ – модуль сдвига в плоскости слоя;

$G_{13}^{(k)}$, $G_{23}^{(k)}$ – модули поперечного сдвига.

При этом справедливы равенства:

$$G_{13}^{(k)} = G_{12}^{(k)}, \quad \nu_{21}^{(k)} = \nu_{12}^{(k)} \frac{E_2^{(k)}}{E_1^{(k)}}.$$

Модуль упругости $E_1^{(k)}$, и коэффициент Пуассона $\nu_{12}^{(k)}$ с достаточной для практических результатов точностью определим из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} E_1^{(k)} &= E_c^{(k)}\psi_c^{(k)} + E_R^{(k)}(1 - \psi_c^{(k)}); \\ \nu_{12}^{(k)} &= \nu_c^{(k)}\psi_c^{(k)} + \nu_R^{(k)}(1 - \psi_c^{(k)}), \end{aligned}$$

Для модуля упругости поперек волокон корда воспользуемся зависимостью, полученной на основе различных допущений о законах распределения напряжений и деформаций в армированном слое:

$$E_2^{(k)} = \frac{e_k E_1^{(k)}}{[\psi_c^{(k)} + e_k(1 - \psi_c^{(k)})][1 + (\varepsilon_k)\psi_c^{(k)}]}$$

где $e_k = \frac{E_c^{(k)}}{E_R^{(k)}}$.

Рассмотрим модуль сдвига в плоскости армированного слоя. Для этого модуля с помощью вариационного метода после ряда преобразований получим:

$$G_{12}^{(k)} = \frac{g_k(1 + \psi_c^{(k)}) + 1 - \psi_c^{(k)}}{g_k(1 - \psi_c^{(k)}) + 1 + \psi_c^{(k)}} G_R^{(k)},$$

где $g_k = \frac{G_c^{(k)}}{G_R^{(k)}}$; $G_c^{(k)} = \frac{E_c^{(k)}}{2(1 + \nu_c^{(k)})}$; $G_R^{(k)} = \frac{E_R^{(k)}}{2(1 + \nu_R^{(k)})}$.

Анализ армированного слоя методами сопротивления материалов позволяет получить значение модуля поперечного сдвига:

$$G_{23}^{(k)} = \frac{g_k}{g_k(1 - \psi_c^{(k)}) + \psi_c^{(k)}} G_2^{(k)}.$$

Обозначим: $D = \frac{\sqrt{E_1^{(k)} E_2^{(k)} h_0^{(k)}}}{2(1 - \sqrt{\nu_c^{(k)} \nu_R^{(k)}})} \psi_c^{(k)}$ – приведенная жесткость

армированного слоя.

Тогда уравнение малых свободных колебаний такого слоя можно получить, заменяя в уравнении равновесия поперечную нагрузку инерционным членом:

$$q = \rho_k h_0^{(k)} \frac{\delta^2 W}{\delta t^2},$$

где ρ_k – удельная плотность материала;
 W – прогиб (амплитуда колебаний) слоя;
 t – время.

Опуская преобразования, получим уравнение малых свободных колебаний продольно-армированного слоя:

$$D = \left(1 - \frac{\theta(h_0^{(k)})^2}{\beta} \Delta \right) \Delta \Delta \chi + F_{11} - 2F_{12} + F_{22} + \rho_0 h_0^{(k)} \frac{\delta^2 W}{\delta t^2} = 0, \quad (1)$$

где Δ – оператор Лапласа; $\rho_0 = \rho_k$.

Так как рассматриваемый слой имеет прямоугольную форму, то из (1) следует:

$$D(1 - h_0^{(k)} \Delta) \Delta \Delta \chi + \rho_0 h_0^{(k)} \frac{\delta^2}{\delta t^2} (1 - (h_0^{(k)})^2 \Delta) \chi = 0. \quad (2)$$

Граничные условия представим в форме:

$$X = \frac{\delta^2 \chi}{\delta \alpha_1^2} = \frac{\delta^4 \chi}{\delta \alpha_1^4} = 0; \quad \text{при } \alpha_1 = 0.$$

$$X = \frac{\delta^2 \chi}{\delta \alpha_2} = \frac{\delta^4 \chi}{\delta \alpha_1^4} = 0; \quad \text{при } \alpha_2 = 0; \quad \alpha_1 = B_p.$$

Решение (2) представим в виде:

$$X = X_0 e^{i\omega_0 t} \sin \frac{m\pi\alpha_1}{e} \sin \frac{n\pi\alpha_2}{B_p}, \quad (3)$$

где m, n – число полуволн в направлениях α_1, α_2 ;

ω_0 – частота собственных колебаний;

X_0 – некоторая постоянная.

Подставляя (3) в (2), после преобразований получим значение частоты:

$$\omega_0^2 = \frac{D}{\rho_0 h_0^{(k)}} \omega_2^2, \quad (4)$$

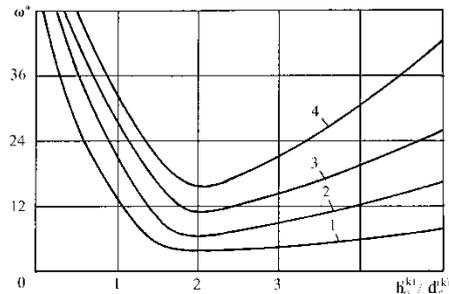
где $\omega_2^2 = \pi^4 (m^2 + \lambda^2 n^2) \frac{1 + \theta k (m^2 + \lambda^2 n^2)}{1 + k (m^2 + \lambda^2 n^2)}$; $k = \frac{\pi^2 (h_0^{(k)})^2}{\beta^2}$;

$$\lambda = \frac{l}{B_p}.$$

Выводы

Рассматривая свободные колебания при фиксированных значениях длины ветви ремня и его ширины $B_p = 10$ мм при показателях жесткости, характерных для зубчатых ремней, путем решения (4) численными методами в соответствии с методикой ортогонального планирования, установлено следующее:

- а) минимальная амплитуда колебаний ветвей ремня и, следовательно, минимальное шумоизлучение передачи, связанное с колебаниями ветвей, наблюдается при конструктивном выполнении $h_0^{(k)} \approx 2d_c^{(k)}$ (рис. 5), при этом утолщение ремня не приводит к существенному увеличению амплитуды ремня;
- б) величина шага навивки корда практически не влияет на частоту свободных колебаний;
- в) целесообразной конструкцией с точки зрения минимизации амплитуды колебаний следует считать исполнение с длиной ветви $L_B = (80 \dots 100)h_0^{(k)}$, т. е. для снижения шумоизлучения необходимо при прочих равных условиях подбирать такой типоразмер ремня (со стандартной толщиной), который бы обеспечивал получение длин ветвей, равных примерно стократной их толщине.



1, 2, 3, 4 – номера форм колебаний

Рисунок 5 – Зависимость частоты колебаний от конструктивного параметра

Таким образом, посредством рационализации геометрических параметров ремня и передачи возможно обеспечение минимального уровня ее шумоизлучения.

Список цитированных источников

1. Никончук, А. Н. Усталостная прочность зубьев зубчатых ремней / А. Н. Никончук, В. И. Шпилевский. – Минск : БПИ, 1989. – Деп. в ВНИИТЭМР 19.10.89. № 296 - МШ89/РЖ48.
2. Козачевский, Г. Г. Зубчатые ремни повышенной несущей способности / Г. Г. Козачевский, Л. Ф. Павловская, А. Н. Никончук // Промышленность синтетического каучука, резиновых технических изделий. – 1988. – № 2. – С. 26–28.
3. А.С. СССР 1426835, МКИ³ В29 С29/С8. Способ изготовления зубчатых ремней и устройство для его осуществления / А. Н. Никончук, Г. Г. Козачевский, В. В. Никитин, БПИ. – Оpubl. 30.09.88, Бул. №36 // Открытия. Изобретения. – № 36. – 1988. – С. 74.

References

1. Nikonchuk, A. N. Ustalostnaya prochnost' zub'ev zubchatykh remnev / A. N. Nikonchuk, V. I. Shpilevskiy. – Minsk : BPI, 1989. – Dep. v VNIITEMR 19.10.89. № 296 - MSH89/RZH48.
2. Kozachevskiy, G. G. Zubchatye remni povshennoy nesushchev sposobnosti / G. G. Kozachevskiy, L. F. Pavlovskaya, A. N. Nikonchuk // Promyshlennost' sintetichesko-kauchuka, rezinovykh tekhnicheskikh izdeliy. – 1988. – № 2. – S. 26–28.
3. A.S. SSSR 1426835. MKI3 B29 C29/C8. Spособ izgotovleniya zubchatykh remnev i ustrovstvo dlya yego osushchestvleniya / A. N. Nikonchuk, G. G. Kozachevskiy, V. V. Nikitin, BPI. – Opubl. 30.09.88, Byul. №36 // Otkrytiya. Izobreteniya. – № 36. – 1988. – S. 74.

Материал поступил в редакцию 19.12.2021

ОСОБЕННОСТИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МИКРООБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ

Ф. И. Пантелеенко¹, М. Н. Карпец²

¹ Член-корреспондент НАН Беларуси, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: panteleyenkofi@bntu.by

² М. т. н., аспирант Белорусского национального технического университета, заместитель начальника лаборатории технической диагностики и наладки ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Республика Беларусь, e-mail: mail-maxiolis@mail.ru

Реферат

Одним из способов повышения надежности и долговечности деталей машин, инструмента и технологической оснастки является химико-термическая обработка (ХТО). Для упрочнения стальных деталей различного назначения широкое распространение получило термодиффузионное легирование бором. Традиционными объектами ХТО являются макродетали, для которых толщина диффузионного слоя на несколько порядков меньше линейных размеров детали. В последнее время активно развивается новое направление ХТО – диффузионное легирование микрообъектов. Переход от макроуровня к микроуровню принципиально изменяет технологию ХТО.

В данной работе были исследованы процессы диффузионного легирования бором микрообъектов, в частности изделий с сечением в форме круга (проволок) различных структурных классов. По результатам исследований были определены факторы, оказывающие влияние на толщину боридных слоёв. Определена интенсивность борирования микрообъектов различных структурных классов.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, диффузионное легирование, борирование, поверхностное упрочнение.

FEATURES OF CHEMICAL AND THERMAL TREATMENT OF MICRO-OBJECTS OF DIFFERENT STRUCTURAL CLASSES

F. I. Panteleenko, M. N. Karpets

Abstract

One of the ways to increase the reliability and durability of machine parts, tools and technological equipment is chemical heat treatment. For hardening steel parts for various purposes, thermal diffusion alloying with boron is widely used. Traditional objects of chemical and thermal treatment are macro-parts, for which the thickness of the diffusion layer is several orders of magnitude less than the linear dimensions of the part. Recently, a new direction of chemical treatment is actively developing - diffusion alloying of micro-objects. The transition from the macrolevel to the microlevel fundamentally changes the diffusion alloying technology.

In this work, we investigated the processes of diffusion alloying with boron of micro-objects, in particular, products with a circular cross-section (wires) of various structural classes. According to the research results, the factors influencing the thickness of boride layers were determined. The intensity of boriding of micro-objects of various structural classes has been determined.

Keywords: chemical heat treatment, diffusion alloying, boriding, surface hardening.

Введение

Химико-термическая обработка (ХТО) является одним из наиболее эффективных и широко применяемых в промышленности методов повышения надёжности и долговечности ответственных деталей машин, инструмента и технологической оснастки за счёт получения требуемых эксплуатационных свойств поверхностных слоёв (повышенной твердости, износостойкости, коррозионной и эрозийной стойкости и других). Существующие методы ХТО можно разделить на четыре основные группы: насыщение в твёрдых, жидких, газовых средах и в плазме. Особенности каждого метода обусловлены агрегатным состоянием насыщающей среды и свойствами веществ-компонентов [1].

Традиционными объектами ХТО являются макродетали, для которых толщина диффузионного слоя на несколько порядков меньше линейных размеров детали. Целью традиционной ХТО является изменение химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя детали на незначительную глубину. Такая поверхностно-упрочнённая деталь, как правило, является конечным продуктом технологии. В общем комплексе решаемых задач химический состав упрочнённого слоя имеет второстепенное значение по сравнению с эксплуатационными свойствами последнего. В последнее время активно развивается новое направление ХТО – диффузионное легирование микрообъектов. Под микрообъектами ХТО понимают дискретные микрообъёмы твёрдых тел, линейные размеры которых соизмеримы с толщиной формируемого диффузионного слоя. Наиболее часто микрообъектами ХТО являются различные порошки. К микрообъектам ХТО с некоторыми допущениями также следует отнести изделия с сечением в форме круга, например, проволоку

малых диаметров, поскольку хотя бы один линейный размер в этом случае соизмерим с толщиной диффузионного слоя [2].

Переход от макроуровня к микроуровню принципиально изменяет технологию ХТО. В этом случае целью ХТО на микроуровне является получение в первую очередь требуемого химического состава диффузионного слоя. Механические свойства диффузионного слоя на микрообъекте, как правило, решающего значения не имеют. А сама ХТО становится промежуточной операцией, после которой следует основная операция формирования защитного слоя. К настоящему времени обозначились два характерных направления ХТО микрообъектов: получение синтетических насыщающих порошковых смесей методами ХТО для последующей диффузионной обработки макродеталей и диффузионное легирование металлических порошков для последующей наплавки (напыления) или получения деталей методами порошковой металлургии [2]. Для упрочнения стальных деталей различного назначения широкое распространение получило термодиффузионное легирование бором [3], недостаточно полностью изученное для изделий в форме круга.

Целью данной работы является исследование процесса диффузионного легирования бором изделий с сечением в форме круга (проволоки) различных структурных классов.

Основная часть

Для проведения исследований были выбраны проволоки различных структурных классов следующих марок: Св-08А Ø 3,0 мм (ферритно-перлитный класс), Св-08Г2С Ø 1,6 мм (ферритно-перлитный класс), 95Х18 Ø 1,6 мм (мартенситный класс), ER2209 Ø 1,2 мм (аустенитно-ферритный класс), ER316LSi Ø 1,2 мм и ER 347 Ø 1,2 мм (аустенитный класс). Химический состав проволок приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав применяемых проволок [4–6]

| Марка проволоки | Массовая доля химических элементов, % | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------------|------|------|-----------|----------|-------|-------|------|-------|-----|
| | Mn | Mo | Cu | C | Si | Ni | Cr | Ti | Al | Nb |
| Св-08А | 0,35–0,6 | – | – | <0,1 | <0,03 | <0,25 | <0,12 | – | <0,01 | – |
| Св-08Г2С | 1,8–2,1 | – | – | 0,05–0,11 | 0,7–0,95 | <0,25 | <0,2 | – | – | – |
| ER347 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,04 | 0,7 | 9,8 | 19 | – | – | 0,6 |
| ER316LSi | 1,80 | 2,60 | 0,12 | 0,01 | 0,9 | 12,2 | 18,4 | – | – | – |
| ER2209 | 1,70 | 3,30 | <0,3 | <0,025 | 0,50 | 8,50 | 22,5 | – | – | – |
| 95Х18 | <0,8 | – | <0,3 | 0,9–1,0 | <0,8 | <0,6 | 17–19 | <0,2 | – | – |

Каждую марку проволоки подвергали диффузионному легированию бором (борированию) в контейнере с герметизирующим плавким затвором. В качестве насыщающей среды применялся технический карбид бора (В4С). ХТО выполнялась при различных температурно-временных режимах в камерной электрической печи Термоскале КГ360/1100С. Как известно, для ускорения интенсивности диффузионного насыщения рекомендуется применять галогенсодержащие активаторы в количестве не более 1,5 % [7]. Поэтому при проведении исследований в качестве активатора был выбран фтористый алюминий (AlF3) в количестве 1 %.

После борирования металлографическим способом выполнялось измерение толщины боридного слоя для всего диапазона использованных режимов диффузионного легирования.

Металлографические исследования. Металлографические исследования на предмет толщины боридного слоя выполнялись с применением микроскопа МИ-1 и микроскопа «Альтами МЕТ П». Для получения и анализа изображений применялось программное обеспечение «SIAMS 800» и Altami Studio.

По результатам металлографических исследований для каждой из марки проволоки была определены толщины боридных слоев (таблица 2).

Таблица 2 – Толщина боридных слоев в зависимости от режимов диффузионного легирования

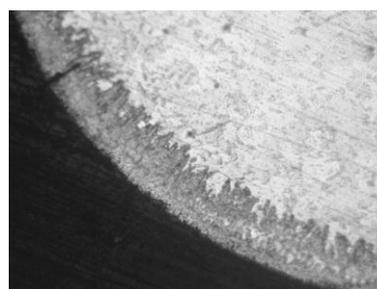
| Марка проволоки | Температура ХТО, °С | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------|----|-----|-----|-----|---------------------|----|-----|-----|-----|---------------------|----|-----|-----|-----|
| | 850 | | | | | 900 | | | | | 950 | | | | |
| | Время выдержки, мин | | | | | Время выдержки, мин | | | | | Время выдержки, мин | | | | |
| | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 |
| Св-08А | 10 | 13 | 20 | 28 | 40 | 20 | 25 | 32 | 40 | 52 | 30 | 50 | 80 | 130 | 160 |
| Св-08Г2С | 10 | 14 | 19 | 27 | 38 | 20 | 27 | 35 | 48 | 62 | 30 | 45 | 80 | 120 | 150 |
| ER347 | 8 | 10 | 13 | 16 | 21 | 12 | 15 | 19 | 24 | 30 | 16 | 18 | 25 | 30 | 50 |
| ER316 | 7 | 9 | 12 | 15 | 20 | 11 | 14 | 17 | 21 | 27 | 15 | 18 | 25 | 35 | 50 |
| ER2209 | 6 | 8 | 11 | 15 | 20 | 8 | 11 | 15 | 20 | 27 | 15 | 18 | 22 | 28 | 35 |
| 95Х18 | 6 | 8 | 12 | 15 | 20 | 9 | 12 | 16 | 21 | 28 | 14 | 18 | 20 | 32 | 40 |

Проволоки ферритно-перлитного класса (Св-08А и Св-08Г2С).

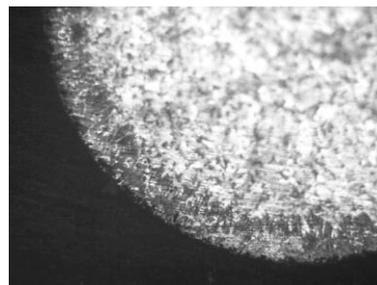
После диффузионного легирования боридный слой имеет характерное игольчатое строение. Иглы (конусы) боридов, срастаясь у основания, образуют сплошной боридный слой (рисунок 1). Учитывая, что борирование выполнялось в порошкообразной смеси на основе технического карбида бора, боридный слой имеет двухфазное строение (FeB+Fe2B) [9].

Из всех исследуемых проволок при одинаковых режимах борирования на проволоках ферритно-перлитного класса (Св-08А и Св-08Г2С) удалось получить наибольшую толщину боридного слоя. Это объясняется невысоким содержанием легирующих элементов и углерода в их составе. Как известно, при концентрации углерода в стали от 0,04 до 0,1 % он не оказывает существенного влияния на толщину боридного слоя. Марганец незначительно снижает толщину боридного слоя. В тоже время кремний при его содержании от 0,5 до 4,0 % существенно снижает толщину боридного слоя [8]. Изначально предполагалось, что толщина боридного слоя в этих проволоках будет существенно отличаться, поскольку в составе проволоки марки Св-08Г2С имеется большее содержание элементов, замедляющих диффузию, а именно марганца (на 1,5 %) и кремния (на 0,7–0,9 %). Однако в зависимости от температуры борирования было выявлено, что при температуре 850 °С толщина боридных слоев практически не отличается (рисунок 2). При температуре 900–950 °С, с увеличением

времени выдержки, толщина боридных слоев на этих проволоках отличается незначительно (до 10 мкм).



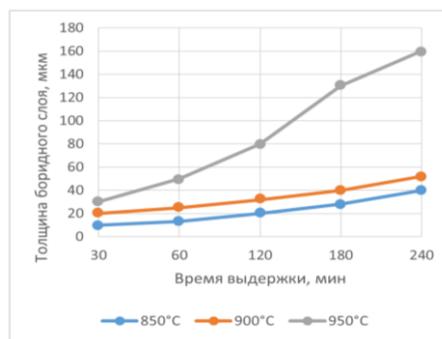
а)



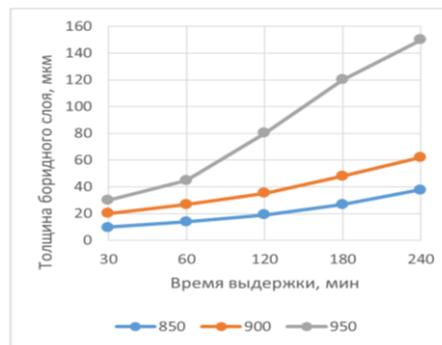
б)

а) проволока Св-08А; б) проволока Св-08Г2С

Рисунок 1 – Микроструктура проволоки после выдержки при температуре 950 °С в течение 240 мин, увеличение x100



а)



б)

а) проволока Св-08А; б) проволока Св-08Г2С

Рисунок 2 – Влияние температуры и времени выдержки на толщину боридного слоя

Вероятно, незначительное отличие толщин боридного слоя можно объяснить различием в диаметрах проволок (1,6 мм Св-08Г2С против 3,0 мм Св-08А), при котором в проволоке Св-08А с большим диаметром поверхностная диффузия [8] протекала медленнее.

В тоже время при максимальной температуре и времени выдержки максимальный боридный слой (160 мкм) образовался на проволоке марки Св-08А.

Проволока мартенситного класса (95Х18). По результатам исследований для данной проволоки была замечена низкая интенсивность увеличения боридного слоя во всех температурных и временных диапазонах (рисунок 3).

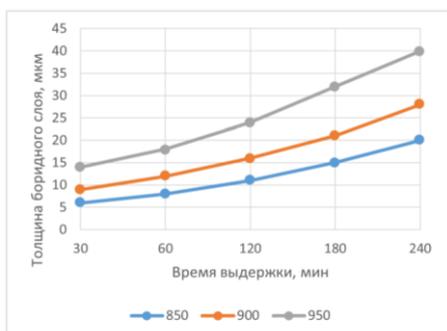


Рисунок 3 – Влияние температуры и времени выдержки на толщину боридного слоя на проволоке 95Х18

Это объясняется высоким содержанием углерода (0,9–1,0 %), который при содержании более 0,8 % интенсивно снижает толщину боридного слоя. Снижение интенсивности связано с образованием борного цементита в подборидной зоне, причиной появления которого является повышение концентрации углерода и бора выше предельной растворимости их в аустените при температуре борирования. Борный цементит механически препятствует проникновению боридных игл и росту боридного слоя [8]. Кроме углерода интенсивность борирования уменьшается за счет высокого содержания хрома (17–19 %), который также уменьшает толщину проникновения боридных игл и делает боридный слой более компактным. Поэтому боридный слой на данной проволоке не имеет игольчатой структуры (рисунок 4). Кроме того, наличие хрома в данной проволоке охрупчивает боридный слой.



Рисунок 4 – Микроструктура проволоки 95Х18 после выдержки при температуре 950 °C в течение 240 мин, увеличение x100

Проволока аустенитно-ферритного класса (ER2209). По результатам исследований была замечена низкая интенсивность увеличения боридного слоя во всех температурных и временных диапазонах (рисунок 5).

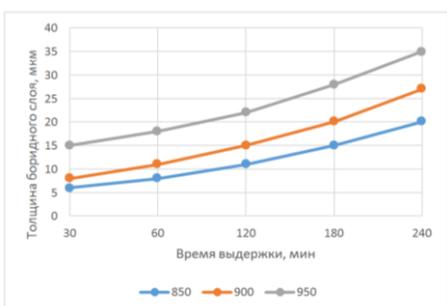


Рисунок 5 – Влияние температуры и времени выдержки на толщину боридного слоя на проволоке ER2209

Это объясняется высоким содержанием легирующих элементов, уменьшающим интенсивность борирования. Содержащийся в проволоке хром (22,5 %) существенно уменьшает толщину проникновения боридных игл и делает боридный слой более компактным и хрупким [8]. На рисунке 6 видны сколы боридного слоя вследствие механической подготовки образца к металлографическим исследованиям.

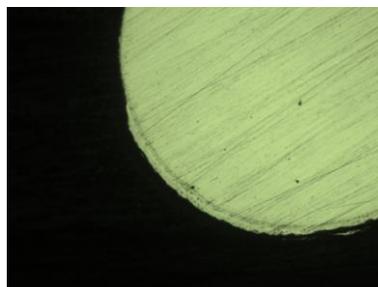
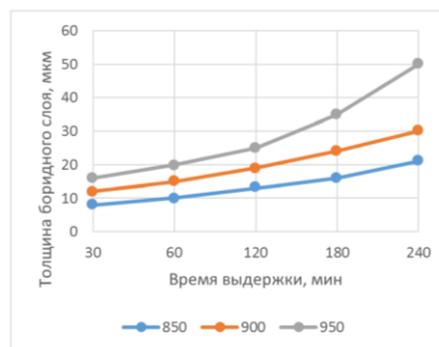


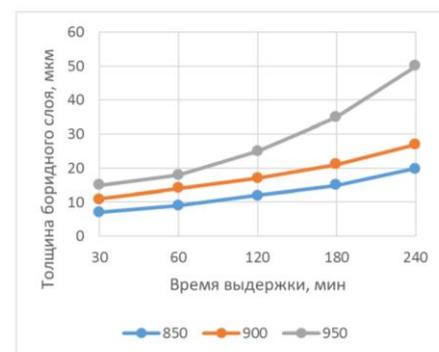
Рисунок 6 – Микроструктура проволоки ER2209 после выдержки при температуре 950 °C в течение 240 мин, увеличение x100

Содержащийся в проволоке молибден (3,3 %) также снижает толщину слоя боридов. Никель и марганец, в том количестве, в котором они содержатся в данной проволоке, не оказывают существенного влияния на толщину боридного слоя [8].

Проволока аустенитного класса (ER347 и ER316LSi). Из всех исследуемых высоколегированных нержавеющей проволоки при одинаковых режимах борирования на проволоках аустенитного класса (ER347 и ER316LSi) удалось получить наибольшую толщину боридного слоя (рисунок 7).



а)



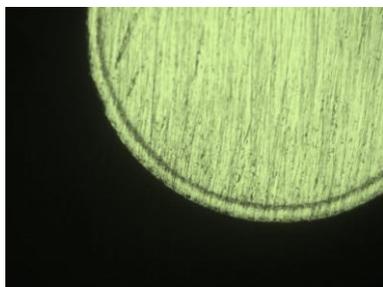
б)

а) проволока ER347; б) проволока ER316LSi

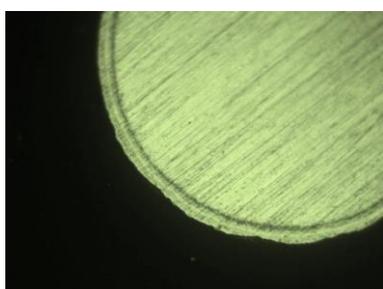
Рисунок 7 – Влияние температуры и времени выдержки на толщину боридного слоя

Высокое содержание легирующих элементов значительно уменьшает интенсивность борирования. Содержащийся в проволоках ER347 и ER316LSi хром (19 % и 18,4 % соответственно) существенно уменьшает толщину проникновения боридных игл и делает

боридный слой более компактным и хрупким. Кроме того, содержащийся в проволоке ER316LSi молибден (2,6 %), а в проволоке ER347 ниобий (0,6 %) также снижают толщину слоя боридов. Никель и марганец в том количестве, в котором они содержатся в данных проволоках, не оказывают существенного влияния на толщину боридного слоя [8]. Боридный слой в обеих проволоках практически лишен игольчатого строения, характерного для сплавов на основе железа (рисунок 8).



а)



б)

а) проволока ER347; б) проволока ER316LSi

Рисунок 8 — Микроструктура проволоки после выдержки при температуре 950 °С в течение 240 мин, увеличение x100

Заключение

По результатам проведенных испытаний можно установить, что на толщину диффузионного (боридного) слоя существенное влияние оказывают режимы ХТО (температура, время выдержки), химический состав и диаметр проволоки. Наибольшая интенсивность борирования наблюдается у проволок ферритно-перлитного класса (Св-08Г2С и Св-08А). Высоколегированные нержавеющие проволоки ER2209, ER316LSi, ER347, 95X18 борированы с меньшей интенсивностью, что связано с достаточно высоким содержанием элементов, снижающих интенсивность борирования. Для проволок ER2209, ER316LSi элементами, снижающими интенсивность борирования, являются хром и молибден. Для проволоки 95X18 элементами, снижающими интенсивность борирования, являются хром и углерод. Для проволоки ER347 элементами, снижающими интенсивность борирования, являются хром и ниобий. При борировании высоколегированных проволок, содержащих хром и молибден, необходимо учитывать фактор охрупчивания боридного слоя.

Список цитированных источников

1. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки : учебное пособие / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – М. : Новое знание; Минск : Новое знание, 2010. – 304 с. : ил. – (Техническое образование).
2. Ворошнин, Л. Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : ФТИ ; Новополоцк : ПГУ, 2001. – 148 с.
3. Константинов, В. М. Применение борирования в порошковой среде для упрочнения стальных деталей различного назначения / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, А. В. Ковальчук // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сборник научных трудов : в 3 кн. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2015. – Кн. 1 : Материаловедение. – С. 33–38.

4. Проволока стальная варочная. Технические условия : ГОСТ 2246-70. – Взамен ГОСТ 2246-60 ; введ. 01-01-73. – М. : ИПК изд-во стандартов, 2004. – с. 20. – (Межгосударственный стандарт).
5. Компания ESAB. Продукция и решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esab.ru/ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. – Дата доступа: 14.09.2021.
6. Центральный металлический портал РФ. Марки стали и сплавы. Сталь марки 95X18 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stn/95X18. – Дата доступа: 14.09.2021.
7. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них / Ф. И. Пантелеенко. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
8. Ворошнин, Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов / Л. Г. Ворошнин. – Минск : Беларусь, 1981. – 205 с.
9. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник / Г. В. Борисенко [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1981. – 424 с.

References

1. Voroshnin, L. G. Teoriya i tekhnologiya himiko-termicheskoy obrabotki : uchebnoe posobie / L. G. Voroshnin, O. L. Mendeleeva, V. A. Smetkin. – M. : Novoe znanie; Minsk : Novoe znanie, 2010. – 304 s. : il. – (Tekhnicheskoe obrazovanie).
2. Voroshnin, L. G. Teoriya i praktika polucheniya zashchitnykh pokrytij s pomoshch'yu HTO / L. G. Voroshnin, F. I. Panteleenko, V. M. Konstantinov. – 2-e izd., pererab. i dop. – Minsk : FTI ; Novopolock : PGU, 2001. – 148 s.
3. Konstantinov, V. M. Primenenie borirovaniya v poroshkovej srede dlya uprochneniya stal'nykh detalej razlichnogo naznacheniya / V. M. Konstantinov, V. G. Dashkevich, A. V. Koval'chuk // Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov : sbornik nauchnykh trudov : v 3 kn. – Minsk : FTI NAN Belarusi, 2015. – Kn. 1 : Materialovedenie. – S. 33–38.
4. Provoloka stal'naya varochnaya. Tekhnicheskie usloviya : GOST 2246-70. – Vzaмен GOST 2246-60 ; vved. 01-01-73. – M. : IPK izd-vo standartov, 2004. – s. 20. – (Mezhgosudarstvennyj standart).
5. Kompaniya ESAB. Produkciya i resheniya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.esab.ru/ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. – Data dostupa: 14.09.2021.
6. Central'nyj metallicheskiy portal RF. Marki stali i splavy. Stal' marki 95H18 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stn/95X18. – Data dostupa: 14.09.2021.
7. Panteleenko, F. I. Samoflyusuyushchiesya diffuzionno-legirovannye poroshki na zheleznoj osnove i zashchitnye pokrytiya na nih / F. I. Panteleenko. – Minsk : UP «Tekhno-print», 2001. – 300 s.
8. Voroshnin, L. G. Borirovanie promyshlennykh staley i chugunov / L. G. Voroshnin. – Minsk : Belarus', 1981. – 205 s.
9. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov. Spra-vochnik / G. V. Borisenok [i dr.]. – M. : Metallurgiya, 1981. – 424 s.

Материал поступил в редакцию 19.01.2022

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОПИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЛЯ ПОДПРУЖИНЕННЫМИ СОШНИКАМИ ПОСЕВНОГО АГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Е. Я. Строк¹, Л. Д. Бельчик², А. А. Ананчиков³, С. В. Савчук⁴

¹ К. т. н., доцент, заведующий лабораторией электрогидравлических систем управления Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь

² К. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории электрогидравлических систем управления Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь, e-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

³ Магистр технических наук, младший научный сотрудник лаборатории электрогидравлических систем управления Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь, e-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

⁴ К. т. н., доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета, г. Брест, Беларусь, e-mail: sergeyskb@tut.by

Реферат

В статье представлены конструкции сошников посевного агрегата, имеющие в своем составе рычажно-пружинные элементы, которые обеспечивают требуемую силу давления на почву и осуществляют высев и заделку семенного материала на необходимую заданную глубину, рассмотрены вопросы повышения качества функционирования электрогидравлического привода рабочих органов посевного агрегата.

Ключевые слова: копирование рельефа, поле, посевной агрегат, сошник подпружиненный, электрогидравлическая система управления.

INCREASING THE ACCURACY OF GROUND CONTOUR FOLLOWING BY SPRING-LOADED COULTERS OF THE SEEDING UNIT WITH USING THE ELECTRO-HYDRAULIC CONTROL SYSTEM

E. Y. Strok, L. D. Belchik, A. A. Ananchikov, S. V. Sauchuk

Abstract

The article presents the designs of the coulters of the sowing unit, which include lever-spring elements that provide the required force of pressure on the soil and carry out sowing and sealing of seed material to the required specified depth, the issues of improving the quality of functioning of the electrohydraulic drive of the working bodies of the sowing unit are considered.

Keywords: terrain copying, field, sowing unit, spring-loaded coulter, electrohydraulic control system.

Введение

Использование многофункциональных комплексов при реализации технологий точного земледелия для посева сельскохозяйственных культур имеет ряд технологических, технических и экономических преимуществ. За один проход они выполняют ряд операций, включающих предпосевную обработку почвы, внесение удобрений, а также посев с сохранением необходимой для всходов влаги. При этом качество выполнения технологического процесса зависит от функционирования каждой составляющей агрегата. Одним из его конструктивно сложных и нагруженных элементов является сошник, который должен разрезать растительные остатки, минимально сдвигать почву и обеспечивать точное внесение семян на заданную глубину.

Для предотвращения поломок на каменистых почвах и обеспечения качества копирования по всей ширине захвата сеялки сошники содержат рычажно-пружинные механизмы, обеспечивающие необходимую силу давления на почву. Так, например, усилия предварительного поджатия пружин 48-ми дисковых сошников почвообрабатывающе-посевного агрегата АППМ-6 «Берестье» регулируются в зависимости от глубины заделки семян в пределах 500...1600 Н, причем для обеспечения заданной глубины укладки семян при высоких скоростях движения агрегата (более 5 м/с) значение указанного параметра необходимо увеличивать, что технически сложно реализовать [1]. Поэтому весьма актуальной является задача повышения точности копирования рельефа поля рабочими органами посевного агрегата при повышенных скоростях его движения.

Сошники индивидуального копирования со стрелчатой лапой и анкерного типа фирмы «Class» предназначены для независимого копирования контура поля и точного поддержания глубины заделки семян в посевном горизонте почвы благодаря параллелограммной конструкции копирующих рычагов и опорного колеса, расположенным

перед сошником [2]. Шарнирные соединения между кронштейном крепления рабочего органа к раме посевной машины и сошником подпружинены, что позволяет регулировать давление на почву для улучшения равномерности заделки семян на необходимую глубину. Конструкция позволяет снизить энергоемкость технологического процесса, увеличить производительность агрегата, снизить расход топлива и повысить урожайность выращиваемых культур.

Компания «Pottinger» в конструкциях своих сеялок использует натяжные пружины для одинакового давления на передние и задние сошники. Точное копирование поверхности почвы по направлению движения благодаря контурному ведению уплотнителя и регулируемому давлению на высевные сошники. Рычаги параллелограммного механизма имеют одинаковую длину, что обеспечивает вертикальное перемещение высевных секций, одинаковое давление сошников на каждый высевной элемент и точную глубину заделки семян [3].

В источниках [4] и [5] отмечено, что увеличение скорости движения посевных агрегатов выше нормативной приводит к неравномерному распределению семян по глубине. Согласно агротехническим требованиям отклонение глубины заделки семян от заданной должно быть не более ± 1 см (коэффициент вариации до 15 %). Несоблюдение этого условия при посеве зерновых культур приведет к снижению полевой всхожести в зависимости от вида культуры на 5–10 %. При этом снижение урожайности происходит более интенсивно – на 10–30 %. С повышением скорости наблюдается уменьшение глубины заделки семян в результате выглубления сошников, особенно дисковых, причем уменьшение скорости ниже средней на качество заделки семян не влияет. Так, например, сошники зерновой сеялки Астра СПЗ-3,6 производства ПАО «Эльворти» при скорости посева более 2,8 м/с начинают выглубляться и семена попадают не в ложе, а в сухой слой почвы. Различные модификации

посевного комплекса «Кузбасс-Т» имеют удовлетворительное качество посева при скоростях до 4,2 м/с. При увеличении рабочих скоростей точность копирования рельефа поля значительно снижается. Кроме того, при узкорядном посеве сошники переднего ряда разгружаются, так как они дополнительно присыпаются почвой сошниками заднего ряда, особенно на мягких почвах и больших скоростях.

Важной составляющей качественного посева является правильная установка прижимной силы [6]. На практике производители обычно устанавливают пружину, которая давит на секцию рядка с постоянным и обычно избыточным усредненным усилием без учета изменяющегося состояния и плотности почвы, а также снижения веса бункера. В результате этого происходит уплотнение почвы, что препятствует равномерному распределению корневой системы растения по зоне питания и снижает урожайность. Последствия подобного эффекта невозможно исправить, т. к. он становится очевидным только в конце вегетации. С избыточным прижимом приходится сталкиваться чаще, чем с недостаточным, который приводит к неравномерному заглублению семян, результатом чего становятся недружные всходы, что заметно уже в начале вегетационного периода. Компания АО «Геомир» предлагает решить проблему равномерного заглубления семян с использованием системы управления прижимным усилием. Посредством гидроцилиндров двустороннего действия с частотой срабатывания 12 Гц и датчиков нагрузки прижимное усилие регулируется для каждого сошника по величине до оптимального значения, обеспечивающего заданную глубину заделки семян. Контроль качества сева при изменении скорости агрегата осуществляется посредством специальных систем управления и мониторинга прижимной силы и элеваторных трубок, которые устанавливаются непосредственно в кабине трактора или в офисе на компьютере. Для работы этих сервисов требуется высокоточный приемник ГЛОНАСС или GPS, либо наличие на тракторе автопилота с коррекцией точности спутникового сигнала по базовой станции.

В работе [7] рассмотрены вопросы повышения качества функционирования электрогидравлического привода рабочих органов посевного агрегата АППМ-6 «Берестье» при бесконтактном копировании рельефа поверхности. Автор указывает, что использование активной системы высотного регулирования положения сошников с ультразвуковым датчиком расстояния упрощает конструкцию агрегата за счет исключения передних опорных колес, а также позволяет снизить коэффициент вариации глубины обработки почвы и повысить точность копирования рельефа поля в 7,4 раза. Указанный датчик можно установить на раме посевного агрегата в районе оси подвеса или за рабочей зоной сошников. Однако в проведенных с использованием математического моделирования теоретических исследованиях не учтено подпружинивание сошников и не рассматривались вопросы зависимости глубины заделки семян от скорости агрегата.

Авторы работы [8] в результате проведенных лабораторно-полевых испытаний посевного агрегата в составе комплекса АППМ-6 «Берестье» и трактора «Беларус 3022», оборудованного электрогидравлической системой высотного регулирования, установили, что активное управление положением оси подвеса позволяет повысить точность копирования рельефа поля и на 4,5 % увеличить количество семян, заделанных в рабочем слое.

Целью работы является повышение точности копирования рельефа поля посевным агрегатом с подпружиненными сошниками.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: выполнить математическое описание процесса функционирования посевного агрегата, оборудованного электрогидравлической системой высотного копирования рельефа поля; установить влияние изменения скорости движения на выглубление подпружиненных дисковых сошников; разработать рекомендации по повышению точности копирования и глубины заделки семян при высоких рабочих скоростях.

Теоретические исследования процесса функционирования системы управления рабочими органами посевного агрегата

Неровности почвы обуславливают продольно-угловые колебания тягового средства, передающиеся через соединительное устройство на несущую раму посевного агрегата, которая начинает совершать колебания относительно приводного колеса в зоне рабочих органов. При этом рабочие органы, расположенные в несколько

рядов на разном расстоянии относительно этого колеса, начинают изменять глубину обработки в зависимости от текущего положения несущей рамы. Поэтому для компенсации указанных колебаний целесообразно использовать активную систему управления навесным устройством, позволяющую регулировать положение оси подвеса сеялки относительно поверхности почвы.

Структурная схема электрогидравлической системы управления рабочими органами изображена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема электрогидравлической системы управления рабочими органами

Электрогидравлическая система управления навесным устройством содержит насос с приводным двигателем, электрогидравлический регулятор, гидроцилиндр, кинематически соединенный посредством силовой проводки с рабочим органом, а также контроллер.

Задающее воздействие в виде электрического сигнала, величина которого задается оператором, и сигнал обратной связи поступают в контроллер и полученный в результате их обработки управляющий сигнал подается на обмотки электромагнитов регулятора. Насос преобразует механическую энергию приводного двигателя в энергию потока жидкости, которая посредством указанного регулятора переходит через силовую проводку в энергию движения рабочего органа для коррекции его положения.

Блок-схема электрогидравлической системы высотного регулирования положения рабочих органов [7] изображена на рисунке 2.

Кинематическое возмущение X_0 со стороны поверхности поля и исполнительное перемещение гидроцилиндра X_A соответственно через коэффициенты передач K_2 и K_1 определяют высоту h , измеряемую с использованием акустических средств с выходным сигналом U_h . Этот сигнал обратной связи сравнивается с задающим воздействием W , что определяет рассогласование $e(t)$ в системе регулирования.

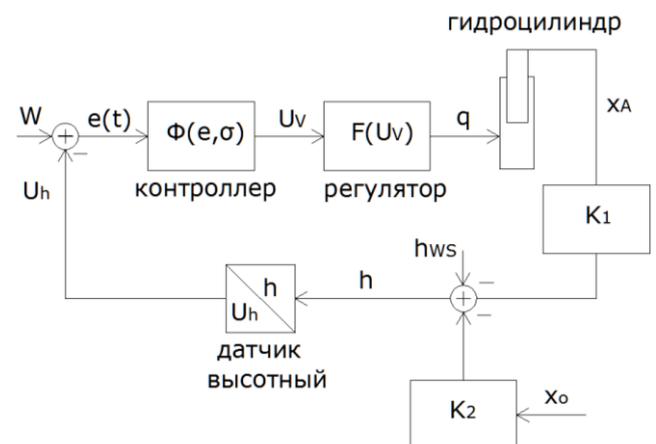


Рисунок 2 – Блок-схема электрогидравлической системы высотного регулирования положения рабочих органов

Контроллер согласно оператору $\Phi(e, \sigma)$ на основе соответствующего алгоритма формирует управляющее воздействие U_v . Электрогидравлический регулятор с передаточной функцией $F(U_v)$ реализует коррекцию положения штока гидроцилиндра посредством потока рабочей жидкости q .

Схема динамической системы для составления математического описания процесса функционирования электрогидравлической системы высотного регулирования положения рабочих органов отображена на рисунке 3.

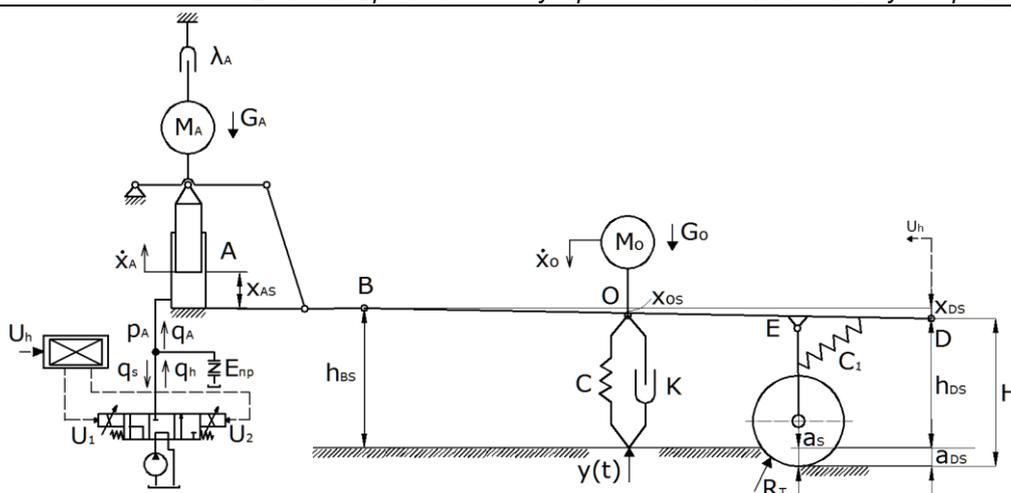


Рисунок 3 – Схема динамической системы электрогидравлической системы высотного регулирования положения рабочих органов

Указанная схема отражает принцип высотного позиционирования рабочих органов посевного агрегата без опорного колеса в районе соединительного устройства. На схеме отражены кинематические связи, весовые нагрузки, диссипативные и конструкционные параметры, а также перемещения характерных точек остова при его смещении из исходного положения в равновесное, или статическое (индекс «S»). Согласно приведенному рисунку точка B соединительного устройства расположена в установившемся состоянии на высоте h_{BS} при горизонтальном положении нижних тяг трактора, сосредоточенные массы обозначены M_O , M_A с векторами их перемещений dx_O/dt и dx_A/dt , коэффициент вязкого трения – λ_A , весовые нагрузки – G_O и G_A . При этом опора в точке O взаимодействует с рельефом поля, характеризующимся кинематическим возмущением $y(t)$, посредством звеньев с обобщенными жесткостью C и коэффициентом диссипации K резиновых шин. Рабочий орган с пружиной, имеющей жесткость C_1 , на который действует сила сопротивления R_T со стороны почвы, расположен в установившемся состоянии в точке E на глубине a_S . Датчик измерения высоты h_{DS} расположен в точке D.

На неравномерность глубины заделки семян существенное влияние оказывает устойчивость хода сошника по глубине, которая обусловлена величиной действующих на него сил. Для определения коэффициента передачи рычажного механизма k_Z , как отношения хода сошника к деформации пружины, выполнен кинестатический анализ сошниковой группы (рисунок 4).

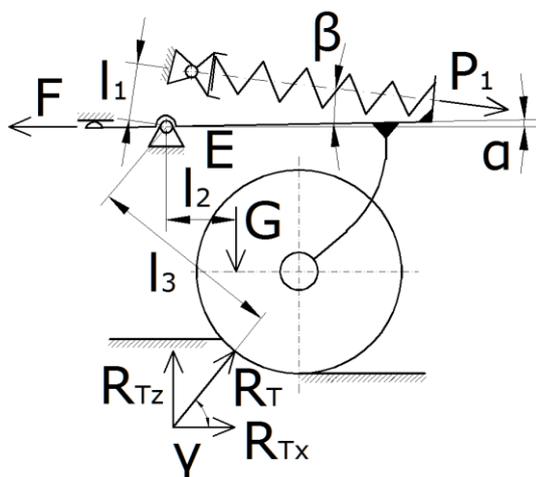


Рисунок 4 – Схема сил, действующих на дисковый сошник

Система уравнений, описывающая статическое равновесие элементов сошниковой группы, имеет вид:

$$\begin{cases} -P_1 \cos(\alpha + \beta) - F \cos \alpha + R_T \cos \gamma = 0; \\ -P_1 \sin(\alpha + \beta) - F \sin \alpha - G + R_T \sin \gamma = 0; \\ -P_1 l_1 - G l_2 + R_T l_3 = 0, \end{cases}$$

где P_1 – величина предварительного поджатия пружины сошника;
 F – сила тяги сошника;
 G – вес сошника;
 l_1, l_2 и l_3 – плечи действия соответствующих сил относительно оси подвеса.

Из приведенной системы уравнений определяются усилия F и P_1 . При составлении математического описания приняты следующие допущения: динамический процесс происходит в окрестностях установившегося движения привода при среднем положении поршня в гидроцилиндре; волновые процессы в гидравлических магистралях из-за их малой длины не влияют на динамику привода; модуль упругости рабочей жидкости является постоянной величиной, которая не зависит от давления и температуры; нерастворенный воздух в жидкости отсутствует; коэффициенты вязкости жидкости и расхода управляемых дросселей являются постоянными величинами; гидравлические потери в трубопроводах и каналах малы, поэтому ими можно пренебречь [9].

В расчетах приняты следующие основные и производные размерности физических величин: масса, кг; перемещение и линейные размеры, м; время, с; скорость, м/с; поток, м³/с; усилие, Н; напряжение, В; ток, А; активное сопротивление, Ом; давление и модуль упругости рабочей жидкости, Па; объем, м³; коэффициент вязкого трения кг/с и жесткость Н/м.

Процесс функционирования указанной системы описывается дифференциальными уравнениями первого и второго порядка или уравнениями равновесия для активных и инерционных сил, а также реакцией связи, а неразрывность циркулирующей рабочей жидкости при этом выражена уравнениями баланса расходов [7].

Активная площадь A и объем полости V_A обобщенного силового гидроцилиндра электрогидравлического привода с учетом длины напорной магистрали определяются из следующих соотношений:

$$A = 2 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \text{ и } V_A = 1,2A \cdot x_{A \max},$$

где D – диаметр штока.

Приведенные к штоку силового гидроцилиндра навесного устройства масса M_B и весовая нагрузка G_B согласно условиям равновесия механической системы и баланса кинетической энергии соответствуют следующим произведениям:

$$M_A = k_G^2 M_B \text{ и } G_A = k_G G_B,$$

где k_G – коэффициент передачи навесного устройства.

Давление рабочей жидкости в силовом гидроцилиндре в установленном режиме выразим через его конструкционные параметры:

$$p_{AS} = \frac{G_A}{A}.$$

Обобщенная жесткость опоры в точке O соответствует формуле:

$$C = \frac{R_{BS}}{x_{OS}},$$

где x_{OS} – смещение точки O остова из исходного в равновесное, или статическое положение, причем указанное смещение определяется графоаналитическим методом.

Изменение токов i_1 и i_2 в обмотках электромагнитов подъема и опускания регулятора с начальными условиями $i_1(0) = 0$, $di_1/dt(0) = 0$ и $i_2(0) = 0$, $di_2/dt(0) = 0$ описываются следующими уравнениями:

$$\frac{T di_1}{dt} + i_1 = \frac{U_1}{R};$$

$$\frac{T di_2}{dt} + i_2 = \frac{U_2}{R},$$

где T и R – постоянная времени и активное сопротивление обмотки электромагнита;

U_1 и U_2 – управляющие сигналы для электромагнитов подъема и опускания.

Управляющие воздействия со стороны электрогидравлического регулятора при перемещении навесного устройства в сторону подъема q_A и опускания q_S определяются выражениями:

$$q_A = k_q i_1 \text{ и } q_S = k_q i_2,$$

где k_q – коэффициент передачи электрогидравлического регулятора.

Баланс потоков рабочей жидкости в узле напорной линии гидросистемы привода с учетом приведенных выше выражений имеет вид:

$$k_q i_1 - k_q i_2 - A \frac{dx_A}{dt} - \frac{V_A}{E_{np}} \frac{dp_A}{dt} = 0$$

с начальными условиями $p_A(0) = 0$, $dp_A/dt(0) = 0$, причем $k_q i_{1max} = k_q i_{2max} = Q$.

Производная давления в указанном узле равна:

$$\frac{dp_A}{dt} = \frac{E_{np}}{V_A} \left(k_q i_1 - k_q i_2 - A \frac{dx_A}{dt} \right).$$

Движение штока силового гидроцилиндра с приведенными массой и весовой нагрузкой в условиях вязкого трения описывается дифференциальным уравнением:

$$M_A \frac{d^2 x_A}{dt^2} = p_A A - \lambda_A \frac{dx_A}{dt} - G_A$$

с начальными условиями $x_A(0) = x_{AS}$, $dx_A/dt(0) = 0$.

Приведенное ниже дифференциальное уравнение описывает колебания точки O остова сельхозмашины с приведенными массой

и весовой нагрузкой в условиях его базирования на резиновых шинах согласно упруго-вязкой модели [7]:

$$M_O \frac{d^2 x_O}{dt^2} = C(y - x_O) + K \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dx_O}{dt} \right) + G_O$$

с начальными условиями $x_O(0) = x_{OS}$, $dx_O/dt(0) = 0$.

Глубина обработки почвы, соответствующая расположению сошника (точка E), определяется отношением:

$$a = \frac{H - h_D}{k_{DE}},$$

где H – конструкционный параметр;

h_D – высота расположения датчика;

k_{DE} коэффициент передачи.

Приведенное ниже дифференциальное уравнение описывает движение пружины сошника:

$$M_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} = k_c R_T - C_1 x_d - K_1 \frac{dx_d}{dt} - P_1,$$

где k_c – коэффициент пропорциональности;

R_T – усилие сопротивления почвы;

M_d – масса сошника;

C_1 – жесткость пружины;

K_1 – коэффициент вязкого трения;

P_1 – усилие предварительного поджатия пружины.

Выражение для усилия сопротивления почвы согласно рациональной формуле В. П. Горячкина имеет вид:

$$R_T = fG + kabn + \varepsilon abV^2, \quad (1)$$

где f – коэффициент пропорциональности, аналогичный коэффициенту трения;

k – коэффициент удельного сопротивления почвы; a – глубина обработки почвы;

b – ширина захвата;

n – количество почвообрабатывающих органов;

ε – коэффициент скоростного сопротивления;

V – скорость движения агрегата.

Численное интегрирование дифференциальных уравнений осуществлено методом Рунге-Кутты второго порядка, а программирование выполнено на соответствующем языке в среде *MatLab* с возможностью графического отображения результатов моделирования.

Величину и скорость изменения кинематического возмущающего воздействия со стороны почвы можно описать гармоническим законом:

$$y(t) = A_y \sin \frac{2\pi}{T_y} t \text{ и } dy/dt = A_y \frac{2\pi}{T_y} \cos \frac{2\pi}{T_y} t, \quad (2)$$

где A_y , T_y – амплитуда и период кинематического возмущающего воздействия.

Ниже приведены исходные данные, использованные при вычислительных реализациях компьютерной модели: $D = 0,09$ м; $X_{Amax} = 0,2$ м; $k_G = 3,2$; $G_B = 120540$ Н; $M_B = 12300$ кг; $C = 6,5 \cdot 10^6$ Н/м; $T = 0,04$ с; $R = 1,7$ Ом; $U_{max} = 5,1$; $k_q = 3,3 \cdot 10^{-4}$ м³/(с·А); $V_A = 3,8 \cdot 10^{-3}$ м³; $E_{np} = 0,7 \cdot 10^9$ Па; $p_{AS} = 2,92 \cdot 10^6$ Па; $\lambda_A = 20000$ кг/с; $M_O = 10048$ кг; $G_O = 108950$ Н; $K = 50000$ кг/с; $H = 0,6248$ м; $h_D = 0,5735$ м; $k_{DE} = 1,026$; $x_O = 0,0168$ м; $M_d = 7,6$ кг; $k_c = 3,79$; $C_1 = 63950$ Н/м; $K_1 = 8500$ кг/с; $k_Z = 3,24$; $P_1 = 116$ Н; $f = 0,4$; $k = 38000$ Па; $b = 0,8$ м; $n = 48$; $\varepsilon = 39456$ Н·с²·м⁻⁴; $V = 5$ м/с.

На рисунке 5 изображен входной сигнал при гармоническом законе изменения возмущающих воздействий в случае вертикального перемещения опорно-приводных колес с резиновыми шинами.

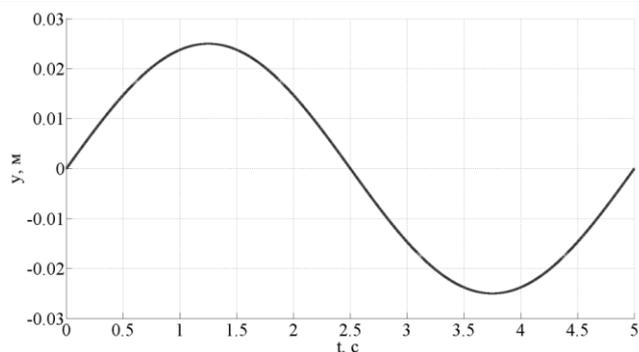


Рисунок 5 – Кинематическое возмущение на входе динамической системы

Графическая зависимость, которая отражает характер протекания колебательного процесса приведенной массы M_0 остова машины с учетом обобщенных жесткости C и коэффициента диссипации K резиновых шин при указанных возмущающих воздействиях, представлена на рисунке 6.

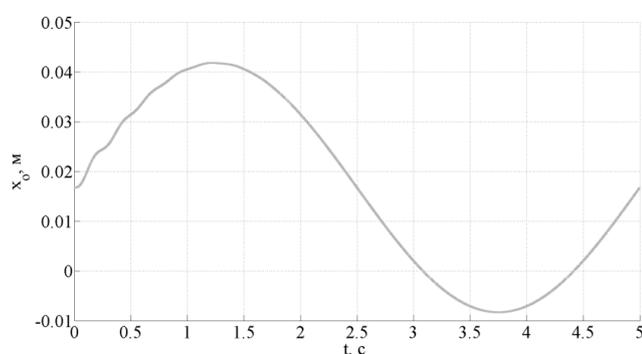


Рисунок 6 – Перемещение остова посевного агрегата

На рисунке 7 показаны процессы изменения токов управления в обмотках электромагнитов регулятора.

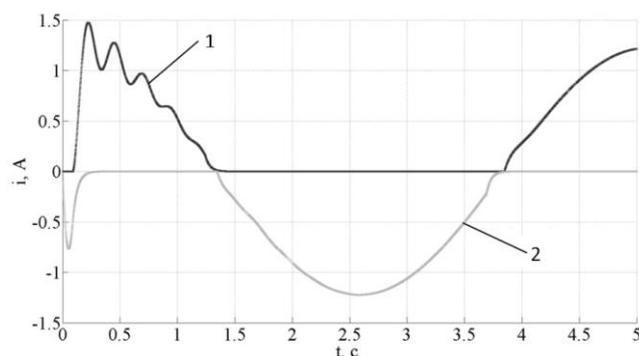
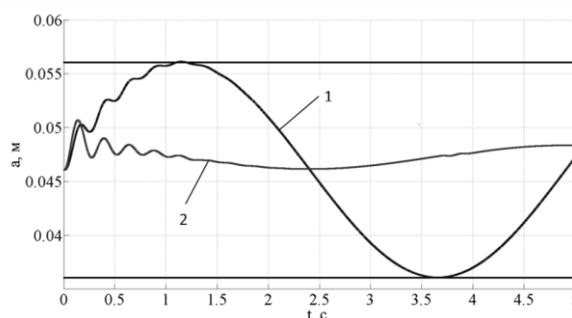


Рисунок 7 – Изменение токов управления электромагнитов подъема (1) и опускания (2) регулятора навесного устройства

Анализ приведенных зависимостей указывает на периодический характер управляющего сигнала, имеющего предельное нарастание амплитуды токов управления в обмотках электромагнитов подъема и опускания регулятора 1,5 А и 1,25 А соответственно.

Изменение глубины обработки почвы в случае замкнутой и разомкнутой систем управления при кинематическом гармоническом возмущающем воздействии, соответствующем выражению (1), с амплитудой $A_y = 0,025$ м и постоянной скорости движения посевного агрегата $V = 5$ м/с показано на рисунке 8.



1 и 2 – разомкнутая и замкнутая системы управления соответственно

Рисунок 8 – Изменение глубины обработки почвы

В таблице 1 приведены результаты теоретических исследований влияния структуры системы на статистические оценки качества обработки почвы при кинематическом гармоническом возмущающем воздействии.

Статистические показатели указанного процесса вычислены по известным формулам [7]:

$$\bar{a} = \frac{\sum a}{n}, \sigma = \sqrt{\frac{\sum (a - \bar{a})^2}{n}}, V_\sigma = \frac{\sigma}{\bar{a}} 100 \%,$$

где \bar{a} и n – среднее значение и количество измерений глубины обработки почвы;

σ – среднеквадратическое отклонение;

V_σ – коэффициент вариации.

Таблица 1 – Неравномерность глубины обработки почвы

| Структура системы управления | σ , м | V_σ , % | $[V_\sigma]$, % |
|------------------------------|--------------|----------------|------------------|
| Разомкнутая | 0,007 | 15,3 | 15 |
| Замкнутая | 0,0015 | 3,3 | |

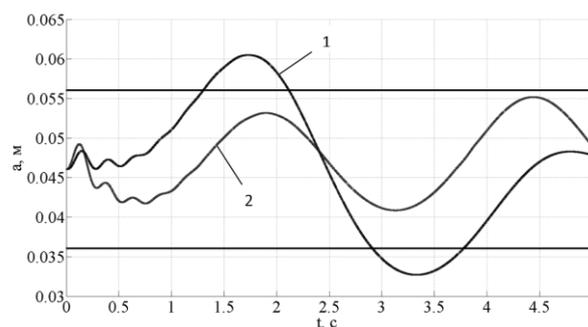
Сравнительный анализ приведенных в таблице результатов показывает, что агротехнические требования к глубине заделки семян выполняются при функционировании замкнутой системы, которая позволяет уменьшить коэффициент вариации глубины обработки в сравнении с разомкнутой системой на 12 %.

Величина изменения возмущающего воздействия по скорости движения посевного агрегата, описанная гармоническим законом, имеет вид:

$$V(t) = V_0 + A_V \sin \frac{2\pi}{T_V} t, \quad (3)$$

где A_V , T_V – амплитуда и период скоростного возмущающего воздействия.

Изменение глубины обработки почвы в случае замкнутой и разомкнутой систем управления при кинематическом и скоростном гармонических возмущающих воздействиях, описанных выражениями (2) и (3), с амплитудами соответственно $A_y = 0,025$ м и $A_V = 0,5$ м/с представлено на рисунке 9.



1 и 2 – разомкнутая и замкнутая системы управления соответственно

Рисунок 9 – Изменение глубины обработки почвы

В таблице 2 приведены результаты теоретических исследований влияния структуры системы на статистические оценки качества обработки почвы при указанных кинематическом и скоростном гармонических возмущающих воздействиях.

Таблица 2 – Неравномерность глубины обработки почвы

| Структура системы управления | σ , м | V_{σ} , % | $[V_{\sigma}]$, % |
|------------------------------|--------------|------------------|--------------------|
| Разомкнутая | 0,0083 | 17,9 | 15 |
| Замкнутая | 0,005 | 10,4 | |

Приведенные в таблице 2 результаты показывают, что изменение гармонических кинематических возмущающих воздействий со стороны почвы с амплитудой $A_y = 0,025$ м и скорости движения посевного агрегата в пределах $V = 4,5...5,5$ м/с вызывает снижение качества посева, т. к. разомкнутая система с подпружиненными сошниками не удовлетворяет агротехническим требованиям к глубине заделки семян.

Использование замкнутой системы управления обеспечивает соблюдение указанных требований при уменьшении коэффициента вариации глубины обработки почвы V_{σ} на 7,5 %, однако его величина возрастает на 7,1 % в сравнении с результатами, полученными при постоянной скорости движения посевного агрегата и аналогичными кинематическими возмущениями (см. табл.1). Это объясняется тем, что при изменении скорости движения агрегата происходит девиация усилия тягового сопротивления согласно выражению (1), что вызывает колебания подпружиненного сошника.

Заключение

1. В условиях кинематических гармонических возмущений от рельефа поверхности остов посевного агрегата совершает колебания, которые при отсутствии опорных колес со стороны соединительного звена влияют на точность позиционирования подпружиненных сошников. Активный контур высотного регулирования в составе замкнутой системы управления, содержащий в цепи обратной связи выходной сигнал датчика измерения высоты рамы сеялки, компенсирует отсутствие базирования на опорных колесах и позволяет удовлетворить агротехническим требованиям к глубине заделки семян при уменьшении коэффициента вариации в сравнении с разомкнутой системой на 12 %.
2. При возникновении возмущений от гармонического изменения скорости посевного агрегата возникают дополнительные колебания подпружиненных сошников вследствие изменения усилия сопротивления почвы, что приводит к снижению точности обработки почвы при посеве разомкнутой системой управления и несоблюдению агротехнических требований. Функционирование замкнутой системы управления в этом случае обеспечивает соблюдение указанных требований при уменьшении коэффициента вариации глубины обработки почвы на 7,5 %.

Список цитированных источников

1. Агрегат почвообрабатывающе-посевной АППМ-6 [Электронный ресурс] // ОАО "Брестский электромеханический завод". – Режим доступа: <http://www.bemzbrest.by/ru/katalog/selskoxozyajstvennaya-texnika/139-agregat-posevnoj-appm-6.html>. – Дата доступа: 25.03.2021.
2. Сошники индивидуального копирования Class [Электронный ресурс] // АГРОКАРАВАН. – Режим доступа: <http://www.bemzbrest.by/ru/katalog/selskoxozyajstvennaya-texnika/139-agregat-posevnoj-appm-6.html>. – Дата доступа: 25.03.2021.
3. Компании PÖTTINGER = Эффективный посев. Высокопроизводительные прицепные сеялки по мульче с рабочей шириной от 3 до 9 м. – [Б. м. : б. и., б. г.]. – 32 с.
4. Скорость посева зерновых культур [Электронный ресурс] // Direct.Farm. – Режим доступа: <https://direct.farm/post/5493>. – Дата доступа: 25.03.2021.
5. Непарко, Т.А. Техническое обеспечение процессов в растениеводстве : в 6 т. / Т. А. Непарко, А. В. Новиков, В. Я. Тимошенко. – Минск : БГАТУ, 2012. – Ч. 3. : лабораторный практикум. – 72 с.
6. Корф, Д. В. Преобразование сеялки / Д. В. Корф // Агро Бизнес – 2016. – № 6. – С. 134–139.

7. Савчук, С. В. Повышение качества функционирования электрогидравлического привода рабочих органов мобильных машин при бесконтактном копировании рельефа поверхности : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.02.02 / С. В. Савчук ; Обьединенный институт машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2019. – 21 с.
8. Бесконтактное копирование рельефа поверхности поля рабочими органами сельхозмашин с использованием акустических методов / Е. Я. Строк [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 6. – С. 35–39.
9. Гамынин, Н. С. Гидравлический привод систем управления / Н. С. Гамынин. – М. : Машиностроение, 1972. – 376 с.

References

1. Agregat pochvoobrabatyvayushche-posevnoj APPM-6 [Elektronnyj resurs] // ОАО "Brestskij elektromekhanicheskij zavod". – Rezhim dostupa: <http://www.bemzbrest.by/ru/katalog/selskoxozyajstvennaya-texnika/139-agregat-posevnoj-appm-6.html>. – Data dostupa: 25.03.2021.
2. Soshniki individual'nogo kopirovaniya Class [Elektronnyj resurs] // AGROKARAVAN. – Rezhim dostupa: <http://www.bemzbrest.by/ru/katalog/selskoxozyajstvennaya-texnika/139-agregat-posevnoj-appm-6.html>. – Data dostupa: 25.03.2021.
3. Kompanii PÖTTINGER = Effektivnyj posev. Vysokoproizvo-ditel'nye pricepnye seyalki po mul'che s rabochej shirinoy ot 3 do 9 m. – [B. m. : b. i., b. g.]. – 32 s.
4. Skorost' poseva zemnykh kul'tur [Elektronnyj resurs] // Direct.Farm. – Rezhim dostupa: <https://direct.farm/post/5493>. – Data dostupa: 25.03.2021.
5. Neparko, T. A. Tekhnicheskoe obespechenie processov v rastenievodstve : v 6 t. / T. A. Neparko, A. V. Novikov, V. YA. Timoshenko. – Minsk : BGATU, 2012. – CH. 3. : laboratornyj praktikum. – 72 s.
6. Korf, D. V. Preobrazovanie seyalki / D. V. Korf // Agro Biznes – 2016. – № 6. – S. 134–139.
7. Savchuk, S. V. Povyslenie kachestva funkcionirovaniya elektro-gidravlicheskogo privoda rabochih organov mobil'nyh mashin pri beskontaktnom kopirovanii rel'efa poverhnosti : avto-ref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.02 / S. V. Savchuk ; Ob"edinennyj institut mashinostroeniya NAN Belarusi. – Minsk, 2019. – 21 s.
8. Beskontaktnoe kopirovanie rel'efa poverhnosti polya rabochimi organami sel'hozmashin s ispol'zovaniem akusticheskikh metodov / E. YA. Strok [i dr.] // Traktory i sel'hozmashiny. – 2012. – № 6. – S. 35–39.
9. Gamyнин, N. S. Gidravlicheskiy privod sistem upravleniya / N. S. Gamyнин. – M. : Mashinostroenie, 1972. – 376 s.

Материал поступил в редакцию 12.01.2022

УДК 551.5, 697.1

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛИМАТА НА РАСХОД ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЖИЛЫХ ДОМАХ

А. А. Волчек¹, А. Г. Новосельцева²

¹Д-р. геогр. наук, профессор, декан факультета инженерных сетей и экологии

Брестского государственного технического университета, г. Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

²Магистр технических наук, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета, г. Брест, Беларусь, e-mail: any-novoselcev@yandex.ru

Реферат

В статье рассмотрено влияние климата на фактический расход тепловой энергии в энергоэффективных жилых домах на примере существующей застройки г. Бреста. Выявлена зависимость количества тепла вырабатываемого в отопительный сезон системой отопления жилого здания, от температуры наружного воздуха.

Ключевые слова: микроклимат, климат, температура наружного воздуха, расход тепловой энергии, городская климатология.

ASSESSMENT OF THE CLIMATE IMPACT ON HEAT CONSUMPTION IN ENERGY-EFFICIENT RESIDENTIAL BUILDINGS

A. A. Volchak, A. G. Novoseltseva

Abstract

The article discusses the influence of climate on the actual consumption of heat energy in energy-efficient residential buildings using the example of existing buildings city of Brest. Revealed the dependence of the amount of heat generated during the heating season by the heating system of a residential building on the outside air temperature.

Keywords: microclimate, climate, outdoor air temperature, heat energy consumption, urban climatology.

Введение

В настоящее время актуальной экологической проблемой урбанизированных территорий быстрорастущих городов является изменение микроклимата города. В городе формируются особые микроклиматические условия, присущие отдельным участкам городской территории. На формирование микроклимата города, помимо природных факторов, оказывают влияние условия, создаваемые городской застройкой, а также функционированием автотранспорта, теплостанций, промышленных и других предприятий. Температура воздуха в крупных городах по сравнению с его окрестностями в среднем выше на 1–4 °С [1]. Повышение температуры обусловлено нагревом элементов застройки за счет поглощения ими солнечной радиации и отражением радиации городскими поверхностями, а также уменьшением эффективного излучения тепла над городом. Такое повышение температуры воздуха городского пространства относительно окружающей его среды приводит к образованию так называемого «острова тепла», его размер зависит от метеорологических условий и особенностей города. «Остров тепла» разрушается ветром и атмосферными осадками, но устойчив в безветрие. Его формирование приводит к снижению комфортности городской среды для людей. Слишком высокие температуры летом и повышенная влажность зимой неблагоприятно влияют на здоровье горожан [1].

Мерами, которые могут улучшить городской микроклимат, являются увеличение растительности, устройство водоемов, вентиляционных отверстий, улучшение ориентации улиц зданий в пределах городской территории и др. Так уличная система, которая состоит из улиц-блоков, препятствует увеличению скорости ветра и сохраняет большее количество тепла в пределах городской территории (что усиливает эффект «острова тепла»), тогда как улицы, параллельные друг другу, позволяют усилить скорость ветра, что приводит к уменьшению эффекта «острова тепла» [2].

Климат в городах часто характеризуется различными показателями, чем те, которые указываются в климатических картах для определенных географических областей. Два города, расположенные рядом, могут иметь различные климатические условия; изучением факторов, влияющих на эту разницу, занимается городская климатология [2].

С 1 апреля 2013 г. по решению правительства в Республике Беларусь проектируются только энергоэффективные жилые дома с теплотреблением 40 кВт·ч/м². С учетом климатических условий для каждого областного центра разработаны свои нормативные требования к потреблению тепловой энергии на отопление [3]. Зачастую проектное энергопотребление здания отличается от эксплуатационного (фактического), это связано с изменением температуры наружного воздуха и отклонения её от среднемесячной нормы.

Энергопотребление зданий зависит от большого количества факторов: от площади здания, его строительного объема, компактности, степени остекленности фасадов и их ориентации по сторонам света, уровня теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, наличие теплопроводных включений в их составе, герметичности наружной оболочки, оснащенности здания приборами учета потребляемых энергоресурсов, эффективности инженерного оборудования, степени его автоматизации, качества управления и даже поведения жильцов. А также, кроме перечисленного, влияют климатические характеристики района строительства. При прочих равных условиях энергопотребление здания будет тем выше, чем в более холодном климате оно расположено [3, 4, 5, 6].

Целью исследования, как одного из важнейших аспектов, связанных с этой проблемой, является оценка влияния выбросов теплоты от жилой застройки в атмосферу за счет, в основном, отопления в отопительный сезон и за счет горячего водоснабжения здания. Поэтому важным является учет фактических выбросов теплоты в окружающую среду в зависимости от температур наружного воздуха в отопительный сезон, на примере реальной застройки [7].

Используемые данные

В качестве исследуемого объекта рассматривалась застройка из 10-этажных зданий 2015 г. постройки юго-западного микрорайона г. Бреста (ул. Махновича, ул. Грибоедова), которые расположены рядом друг с другом (рисунок 1). В таблице 1 приведены характеристики выбранных зданий.

Данные фактического расхода тепловой энергии были получены по теплосчетчикам, установленным в тепловом пункте каждого рассматриваемого дома.

Таблица 1 – Характеристики жилых зданий

| Местонахождение (адрес) жилого здания | Дата ввода в эксплуатацию | Этажность | Общая площадь, м ² | Расчетное (проектное) значение удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию отапливаемой площади здания, кВтч/м ² |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------|-------------------------------|--|
| Махновича, 16 | 11.2015 | 10 | 7575 | 31,4 |
| Махновича, 34 | 11.2015 | 10 | 5042 | 35,8 |
| Грибоедова, 27 | 10.2015 | 10 | 4406 | 31,4 |
| Грибоедова, 35 | 11.2015 | 10 | 5664 | 34,2 |
| Грибоедова, 37 | 10.2015 | 10 | 4408 | 31,4 |
| Грибоедова, 33 | 10.2015 | 10 | 5040 | 32,3 |
| Грибоедова, 29 | 10.2015 | 10 | 5040 | 34,5 |

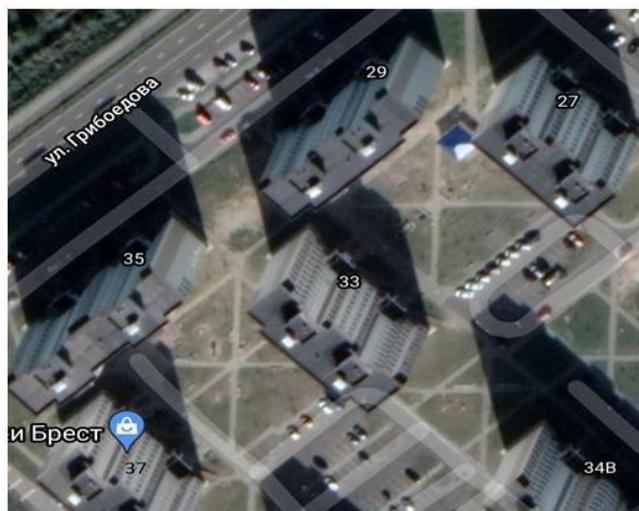


Рисунок 1 – Расположение домов по ул. Грибоедова на карте г. Бреста

Для нахождения зависимости между теплопотерями зданий и изменениями температуры воздуха из метеорологических ежемесячных были взяты значения среднемесячной температуры воздуха за отопительный период с 2015 по 2018 гг. по метеостанции Брест (таблица 2).

Методика исследования и анализ полученных результатов

В работе использована методика сравнительного анализа реальных наблюдений и фактических значений. За отопительный сезон самым холодным месяцем, как правило, является январь, поэтому и расходы тепловой энергии зданиями становится максимальными. В таблице 2 приведены фактические расходы тепловой энергии рассматриваемых зданий за отопительные сезоны 2015–2016 гг., 2016–2017 гг. и 2017–2018 гг. по месяцам и суммарные расходы. Из диаграммы (рисунок 2) видно, что чем ниже температура наружного воздуха, тем больше фактический расход тепловой энергии от жилого здания. Так, в январе 2017 года при температуре наружного воздуха –4,6 °С расход составил от 13582 до 18252 Гкал/ч на 1 м², что существенно выше значений расходов за январь 2016 и 2018 гг. с температурами –4,3 и –0,6 °С и расходами от 12027 до 15613 и от 11108 до 14234 Гкал/ч на 1 м² соответственно. Такая же тенденция прослеживается и в другие месяцы.

Фактические среднемесячные расходы тепловой энергии по всем домам за январь месяц составили: январь 2016 г. – 13324 Гкал/ч на 1 м² при среднемесячной температуре наружного воздуха – 4,3 °С; январь 2017 г. – 15595 Гкал/ч на 1 м² при среднемесячной температуре наружного воздуха – 4,6 °С; январь 2018 г. – 12818 Гкал/ч на 1 м² при среднемесячной температуре наружного воздуха – 0,6 °С. По полученным значениям видно, что изменение температуры

наружного воздуха существенно влияет на фактический расход тепловой энергии зданий в отопительный период.

Среднее значение тепловой энергии, выделяемой 10-этажной жилой застройкой по ул. Грибоедова за каждый отопительный сезон составляет: 2015–2016 гг. – 56010 Гкал/ч на 1 м² (средняя температура за отопительный сезон 3,1 °С); 2016–2017 гг. – 66528 Гкал/ч на 1 м² (средняя температура за отопительный сезон 1,5 °С); 2017–2018 гг. – 65958,6 Гкал/ч на 1 м² (средняя температура за отопительный сезон 1,8 °С). Тогда среднее значение тепловой энергии за три отопительных сезона 62832,2 Гкал/ч на 1 м², при общей площади жилой застройки 1,93 га. Таким образом, тепловыделения от типовой 10-этажной застройки, введенной в эксплуатацию после 2013 г., на 1 га составляют 32555,5 Гкал/ч на 1 м².

* 1 Гкал/ч = 1,163 МВт (здесь и далее).

Таблица 2 – Фактический расход тепловой энергии, температура воздуха

| Месяцы отопительного сезона | Расход тепловой энергии, Гкал/ч на 1 м ² | | | | | | | Средняя температура воздуха, °С |
|-----------------------------|---|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| | Махновича, 16 | Махновича, 34 | Грибоедова, 27 | Грибоедова, 35 | Грибоедова, 37 | Грибоедова, 33 | Грибоедова, 29 | |
| Октябрь 2015 | 0 | 0 | 8037 | 0 | 7427 | 2032 | 6115 | 7,0 |
| Ноябрь 2015 | 8280 | 10099 | 11114 | 3392 | 11618 | 10889 | 8603 | 5,1 |
| Декабрь 2015 | 8960 | 9970 | 10887 | 10494 | 11232 | 10065 | 8687 | 3,6 |
| Январь 2016 | 14483 | 14232 | 15613 | 9688 | 14367 | 12857 | 12027 | -4,3 |
| Февраль 2016 | 7980 | 6430 | 9319 | 7396 | 3422 | 13131 | 7373 | 3,1 |
| Март 2016 | 9476 | 11006 | 11779 | 9882 | 11352 | 11952 | 9300 | 3,9 |
| Сумма | 49179 | 51737 | 66749 | 40852 | 59418 | 60926 | 52105 | |
| Октябрь 2016 | 7773 | 6045 | 7227 | 5957 | 6300 | 7671 | 5914 | 6,9 |
| Ноябрь 2016 | 9537 | 13070 | 13777 | 11213 | 14052 | 13345 | 10349 | 2,4 |
| Декабрь 2016 | 11427 | 9921 | 11888 | 10406 | 10694 | 12137 | 10265 | 0,2 |
| Январь 2017 | 13582 | 14480 | 18252 | 15148 | 17858 | 16194 | 13652 | -4,6 |
| Февраль 2017 | 11420 | 11765 | 12783 | 10794 | 13149 | 12018 | 10382 | -1,8 |
| Март 2017 | 8609 | 8457 | 8550 | 7959 | 8875 | 8728 | 7103 | 5,9 |
| Сумма | 62348 | 63738 | 72477 | 61477 | 70928 | 70093 | 57665 | |
| Октябрь 2017 | 7314 | 6357 | 7027 | 6412 | 7321 | 6484 | 6327 | 9,0 |
| Ноябрь 2017 | 10036 | 9371 | 10656 | 9481 | 11402 | 10792 | 8990 | 4,1 |
| Декабрь 2017 | 11472 | 11075 | 12476 | 10964 | 12970 | 12786 | 10247 | 2,2 |
| Январь 2018 | 12643 | 12261 | 13883 | 11792 | 13804 | 14234 | 11108 | -0,6 |
| Февраль 2018 | 12215 | 12029 | 13575 | 11220 | 12713 | 13494 | 10632 | -3,7 |
| Март 2018 | 11926 | 11595 | 12431 | 10978 | 12269 | 12796 | 10529 | -0,2 |
| Сумма | 65606 | 62688 | 70048 | 60847 | 70479 | 70586 | 57833 | |

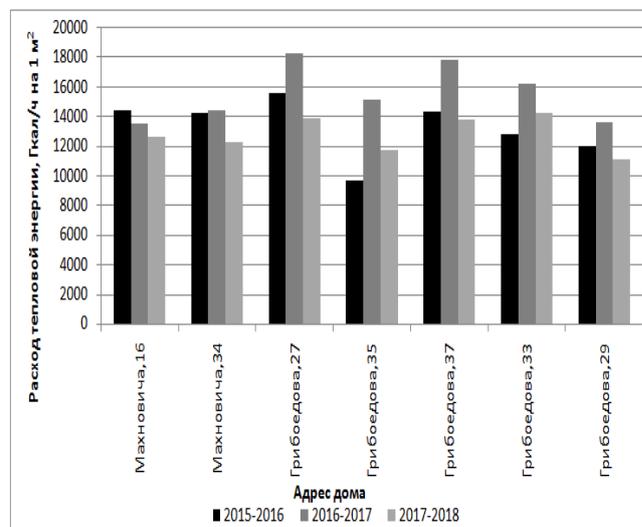


Рисунок 2 – Фактические расходы тепловой энергии жилых зданий за январь месяц по трем отопительным сезонам

Как видно из выше приведенных данных, теплопотери жилых зданий (эквивалентные расходам тепловой энергии на отопление зданий) в отопительный сезон достаточно значительны, особенно в современной многоэтажной городской застройке. В дальнейшем на основе этих данных предполагается поиск зависимости фактического выделения теплоты зданий от температуры наружного воздуха для зданий разных типов и годов постройки. Полученные данные можно будет использовать для оценки влияния выделения тепловой энергии зданий на климат как в отдельном микрорайоне, так и во всем городе.

Заключение

В статье приведены данные фактического расхода тепловой энергии в юго-западном микрорайоне г. Бреста (ул. Махновича и ул. Грибоедова) за отопительные сезоны с 2015 по 2018 гг., полученные по теплосчетчикам, расположенным в тепловом узле каждого дома. Показана зависимость увеличения выброса тепловой энергии от температуры наружного воздуха на примере существующей застройки. Так, фактические среднемесячные расходы тепловой энергии по всем домам за январь месяц составили: январь 2016 г. – 13324 Гкал/ч на 1 м² при среднемесячной температуре наружного воздуха – 4,3 °С; январь 2017 г. – 15595 Гкал/ч на 1 м² при среднемесячной температуре наружного воздуха – 4,6 °С; январь 2018 г. – 12818 Гкал/ч на 1 м² при среднемесячной температуре наружного воздуха – 0,6 °С. Такая же тенденция наблюдалась и в другие месяцы. Это подтверждает, что изменение температуры наружного воздуха существенно влияет на фактический расход тепловой энергии зданий в отопительный период, увеличивая его при более низких температурах наружного воздуха и уменьшая при повышении температуры. Расположение домов по ул. Грибоедова на одной строительной площадке позволило найти средний расход тепловой энергии на 1 га, выделяемый типовой 10-этажной застройкой, он составил 32555,5 Гкал/ч на 1 м² (за три отопительных сезона).

Таким образом, нагрузка на отопление/охлаждение зданий напрямую зависит от климатических условий, а городской микроклимат является одним из ключевых факторов, влияющих на энергопотребление зданий и тепловой комфорт для пользователей и жителей города. Данные этой статьи могут быть использованы в городской климатологии при определении воздействия жилой застройки на климат в городе.

Список цитированных источников

1. Хомич, В. А. Экология городской среды: учеб. пособие для вузов / В. А. Хомич. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2002. – 267 с.
2. Golany, G. Urban design morphology and thermal performance / G. Golany. – Atmos Environ, 1996. – 30 p.
3. Тепловая защита зданий. Правила определения: ТКП 45-2.04-196-2010. – Введ. 01.09.2010. – Минск : Минстройархитектуры, 2010 – 26 с.
4. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – Москва : АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.
5. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006. – Введ. 01.07.2007. – Минск : Минстройархитектуры, 2007 – 36 с.
6. Протасевич, А. М. Энергосбережение в системах теплогоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха / А. М. Протасевич. – М. : Инфра-М, 2012. – 286 с.
7. Табунщиков, Ю. А. Строительные концепции зданий XXI века в области теплоснабжения и климатизации / Ю. А. Табунщиков // АВОК. – 2005. – № 4. – С. 4–7.

References

1. Homich, V. A. Ekologiya gorodskoj sredy: ucheb. posobie dlya vuzov / V. A. Homich. – Omsk : Izd-vo SibADI, 2002. – 267 s.
2. Golany, G. Urban design morphology and thermal performance / G. Golany. – Atmos Environ, 1996. – 30 p.
3. Teplovaya zashchita zdaniy. Pravila opredeleniya: TKP 45-2.04-196-2010. – Vved. 01.09.2010. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2010 – 26 s.
4. Tabunshchikov, Yu. A. Energoeffektivnye zdaniya / Yu. A. Tabunshchikov, M. M. Brodach, N. V. SHilkin. – Moskva : AVOK-PRESS, 2003. – 200 s.
5. Stroitel'naya teplotekhnika. Stroitel'nye normy proektirovaniya: TKP 45-2.04-43-2006. – Vved. 01.07.2007. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2007 – 36 s.
6. Protasevich, A. M. Energoberezhenie v sistemah teplogazosnabzheniya, ventilyacii i kondicionirovaniya vozduha / A. M. Protasevich. – M. : Infra-M, 2012. – 286 s.
7. Tabunshchikov, YU. A. Stroitel'nye koncepcii zdaniy XXI veka v oblasti teplosnabzheniya i klimatizacii / YU. A. Tabunshchikov // AVOK. – 2005. – № 4. – S. 4–7.

Материал поступил в редакцию 06.12.2021

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЫБХОЗА «СЕЛЕЦ» НА СТОК РЕКИ ЯСЕЛЬДА

А. А. Волчек¹, С. И. Парфомук², Н. Н. Шешко³,
Н. Н. Шпендик⁴, Д. Н. Дашкевич⁵, С. В. Сидак⁶, М. Ф. Кухаревич⁷

¹ Д. геогр. н., профессор, декан факультета инженерных систем и экологии
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры природообустройства
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: optimum@tut.by

⁴ К. геогр. н., доцент, доцент кафедры теплогоснабжения и вентиляции
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: shpendik@tut.by

⁵ Ст. преподаватель кафедры природообустройства
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: dionis1303@mail.ru

⁶ Магистр физ.-мат. н., ассистент кафедры информатики и прикладной математики
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

⁷ Магистр тех. н., аспирант кафедры природообустройства
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

Реферат

В результате исследования выполнена комплексная оценка воздействия рыбхоза «Селец», расположенного в бассейне реки Ясельды в районе г. Березы, на гидрологический режим реки. Определены величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки, используемых для нужд рыбхозов, с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ и прудов, при обеспечении условия сохранения в реках экологического стока, что позволит определить наиболее эффективный режим наполнения рыбоводческих прудов. Полученные прогнозные оценки изменения стока реки Ясельды на период до 2035 года характеризуются незначительным изменением стока в среднем за год, но высока вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы (особенно в летние).

Ключевые слова: рыбоводное хозяйство, эвтрофирование, рекогносцировочное обследование, экологический сток, расход воды, математическая модель, водность года, поперечный профиль, верхний створ, нижний створ.

ASSESSMENT OF THE SELETS FISH FARM IMPACT ON THE YASELDA RIVER RUNOFF

A. A. Volchak, S. I. Parfomuk, N. N. Sheshko, N. N. Shpendik, D. N. Dashkevich, S. V. Sidak, M. F. Kukharevich

Abstract

A comprehensive assessment of the impact of the Selets fish farm located in the Yaselda River basin in the area of the Bereza city on the hydrological regime of the river was carried out. The values of permissible withdrawal of surface water from the river used for the needs of fish farms are determined taking into account evaporation losses from the water mirror and filtration from reservoirs and ponds, while ensuring the conditions for preserving ecological runoff in rivers. It will allow determining the most effective filling regime for fish ponds. The obtained forecast estimates of the Yaselda River runoff change for the period up to 2035 are characterized by a slight change in average year runoff, but there is a high probability of its unevenness and multidirection in seasons and months (especially in summer).

Keywords: fish farming, eutrophication, reconnaissance survey, ecological runoff, water consumption, mathematical model, water content of the year, transverse profile, upper section line, lower section line.

Введение

Рыбное хозяйство является уникальным видом производства и играет важную роль в продовольственном комплексе Республики Беларусь, которое обеспечивает население качественными продуктами питания. Для устойчивого обеспечения потребности населения Беларуси необходимо не менее 180 тыс. т рыбы и рыбной продукции в год. В настоящее время основная часть этого объема импортируется в виде продуктов глубокой заморозки. Доля собственной, наиболее ценной свежей и живой рыбы, около 8%. В то же время водный фонд Беларуси насчитывает более 10 тыс. озер общей площадью около 200 тыс. га, 150 водохранилищ общей площадью 80 тыс. га, 20,8 тыс. различных рек общей протяженностью 90,6 тыс. км [18]. Кроме того, насчитывается 21,86 тыс. га прудов рыбоводных хозяйств, 4,6 тыс. га прудов, а также 17,0 тыс. км каналов различного назначения. Большая часть производимой в республике рыбы (около 78%) выращивается в прудах, но площадь их не превышает 10% от всех имеющихся водоемов. Это свидетельствует об огромных резервах по выращиванию рыбы в озерах, водохранилищах, реках, мелиоративных каналах, потенциальные возможности которых используются недостаточно. Это позволит снабжать населения страны продуктами питания на основе рыбы и морепродуктов в необходимом количестве, высокого качества и по доступным ценам [19].

Рыбное хозяйство непосредственно связано с использованием водных ресурсов и предъявляет очень высокие требования к их режиму, количественному и качественному состоянию. Для успешного воспроизводства и нормального развития рыбы необходимы чистая вода с достаточным количеством растворенного кислорода и отсутствием вредных примесей, соответствующая температура и обеспеченность кормами. Нормативы качества воды для рыбоводственных объектов более строгие, чем для источников питьевого водоснабжения.

Вода содержит различные растворенные и взвешенные вещества, количество и состав которых определяют большое разнообразие ее химического состава. Этот состав зависит как от физических условий окружающей среды, так и от биологических и микробиологических процессов, протекающих в водоемах. Взаимообусловленное воздействие абиотических и биотических факторов, а также деятельность человека вызывают существенные различия в гидрохимическом режиме водоемов.

Большим своеобразием отличается гидрохимический режим рыбоводных прудов и мелких водоемов, периодически осушаемых в различные сезоны года, на почву и воду которых сильно влияет хозяйственная деятельность человека. Посадка в пруды большого количества рыбы на единицу площади, удобрение прудов и кормление рыбы также отрицательно влияют на качество воды. В результате поступления в воду легкоразлагающегося органического материала увеличивается

окисляемость, повышается водородный показатель воды (рН), отмечается увеличение суточных колебаний содержания кислорода, изменяются физические свойства воды, увеличивается ее цветность, снижается прозрачность. Поэтому при интенсификации рыбоводства необходимо своевременно принимать меры по оптимизации режима, обеспечению условий для нормальной жизнедеятельности водных организмов. Пригодность поверхностных вод для использования в рыбохозяйственных целях определяется их соответствием требованиям и нормативам государственного стандарта.

Вода водоисточника должна соответствовать нормам, обеспечивающим сохранность вида, плодовитость и качество потомства рыбы, биологические потребности выращиваемых видов рыб, необходимый уровень развития естественной кормовой базы. Она не должна быть источником заболеваний разводимых рыб. Перед использованием воды для разведения рыб следует провести гидрохимические, токсикологические и ихтиопатологические исследования, а также определить способы подготовки воды (аэрация, очистка и др.) до нормы.

Для рыбы наиболее важными условиями являются температура, прозрачность, газовый режим, содержание биогенных элементов. Связь гидробионтов с элементами внешней среды взаимообусловлена, и изменение одной системы связей неминуемо вызывает изменение другой. Поэтому, рассматривая влияние отдельных компонентов гидрохимического режима на жизнедеятельность гидробионтов, необходимо иметь в виду условность такого вычленения, ибо в природе все отношения организма и среды взаимосвязаны.

В жизни рыб температура воды имеет огромное значение, прежде всего в том, что она является непременным условием жизни. В отличие от многих других абиотических факторов температура действует не только в случае экстремальных значений, определяющих границы существования вида, но и в пределах оптимальной зоны в целом, определяя скорость и характер всех жизненных процессов. Влияние ее не ограничивается непосредственным воздействием на живые организмы, а сказывается и косвенно, через другие абиотические факторы. Поэтому температура является одним из универсальных экологических факторов, которое проявляется через воздействие на распределение гидробионтов в водоемах и скорость протекания различных жизненных процессов, количественно связанных с температурой.

Прозрачность воды является одним из основных критериев, позволяющих судить о состоянии водоема. Она зависит от количества взвешенных частиц, содержания растворенных веществ и концентрации фито- и зоопланктона. Влияет на прозрачность и цвет воды. Важным фактором, определяющим прозрачность воды в непроточных водоемах, являются биологические процессы. Таким образом, прозрачность воды может характеризовать уровень развития жизни в водоеме и выступать как показатель распределения света в толще воды, от которого зависит в первую очередь фотосинтез и кислородный режим водной среды.

Газовый режим водоема определяется растворимостью газов, которая, в свою очередь, зависит от природы газа, температуры воды, ее минерализации, а также давления. Наибольшее значение для водных организмов имеют кислород, углекислый газ и сероводород. От концентрации кислорода в воде зависит жизнедеятельность рыб. При уменьшении его ниже определенных границ падает интенсивность питания и использования пищи, в результате чего замедляется рост рыб, снижается устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды, в том числе к промышленным и бытовым загрязнениям.

В водоемах основным источником углекислого газа является бактериальное окисление органических веществ, а также дыхание водных организмов. Биопродуктивность водоемов определяется наличием диоксида углерода. В большой концентрации углекислый газ ядовит для животных, и по этой причине водоемы, пересыщенные углекислотой, лишены жизни. Отрицательное влияние высокой концентрации углекислоты на жизнедеятельность рыб заключается в том, что рыбы, находясь в угнетенном состоянии, хуже используют кислород, растворенный в воде и корм. При этом значение имеет не просто абсолютное содержание в воде кислорода и углекислота, а их соотношение.

Наиболее благоприятно для большинства рыб значение водородного показателя (рН), близкое к нейтральному. При значительных сдвигах в кислую или щелочную сторону возрастает кислородный

порог, ослабляется интенсивность дыхания рыб, а вода сама по себе может стать токсичной для рыб.

Солевой состав играет важную роль в жизни гидробионтов. При этом имеет значение как суммарное количество растворенных в воде минеральных солей, так и ионный состав воды. В рыбоводных хозяйствах качество воды оценивают и по общей жесткости. Существенное влияние на рыб оказывают микроэлементы, содержащиеся в воде, недостаток или избыток которых приводит к патологии в развитии, отравлениям и нередко – к гибели. Источником поступления микроэлементов в рыбу являются вода, растительность, естественный и искусственный корм.

Целью настоящей работы является оценка влияния рыбхоза «Селец» на сток реки Ясельда.

Экологическое воздействие рыбоводных хозяйств. Наиболее значимым экологическим фактором рыбоводной промышленности является локальное эвтрофирование водоемов. Источником эвтрофирования являются содержащиеся в кормах и используемые при выращивании рыбы питательные вещества, а также возникающие при их накоплении органические материалы. Загрязняющий эффект при разведении рыб приблизительно в два раза больше, чем при производстве говядины или свинины и в пять раз больше, чем при производстве куриного мяса. Хотя рыбы по сравнению с домашними животными активно употребляют в пищу питательные вещества, но при этом они не перерабатывают полностью употребляемый в пищу корм. Основными источниками эвтрофирования являются:

- растворение в воде несъеденного корма;
- не переработанные организмом питательные вещества в фекалиях рыб;
- побочные продукты обмена веществ и не используемые для роста питательные вещества в жидких выделениях.

Таким образом, самым важным для уменьшения экологических выбросов от рыбоводной промышленности является хорошая эффективность при использовании кормов, т. е. низкий кормовой коэффициент. При изготовлении кормов возникают и прочие факторы экологического загрязнения. Вредные экологические воздействия возникают, например, из-за химикатов, используемых на различных этапах производства:

- средства, препятствующие обрастанию водорослями сетки (делевых вкладышей) садков;
- моющие антибактериальные средства;
- чистящие средства;
- различные антибиотики.

Химические вещества при разведении рыбы используются для борьбы с болезнями, вызываемыми бактериями, плесневыми грибами и паразитами. На предприятиях с проточной водой наиболее распространены виды химикатов, используемых при проведении профилактических и лечебных мероприятий для рыбы и икры, используются формалин, соль, хлорамин, перекись водорода, йодофоры.

На предприятиях, использующих садки, использование лечебных химикатов обычно ограничивается употреблением лекарств вместе с кормами, так как применение ванн с использованием растворенных в воде антибактериальных средств практически невозможно. Садки также обрабатываются средствами против водорослей, которые могут выделять оксид меди, из-за чего содержание меди в донных отложениях вблизи рыбопитомников может увеличиться.

Еще одним источником экологического воздействия рыбоводных хозяйств являются отходы при разведении рыб. К ним относятся:

- мёртвые рыбы;
- твёрдые отходы, например, пакеты из-под корма и неиспользуемые ящики из-под рыбы;
- проблемные отходы, например, старые химикаты, аккумуляторы, лампы дневного света;
- ил, удаляемый из выростных водоемов.

Правильное хранение и переработка отходов являются частью процесса охраны окружающей среды.

Методы исследования и исходные данные

Выбор участка реки и место для установки постовых устройств выбирается выше забора воды и ниже точки сброса рыбхозов. Место гидрологических наблюдений должно удовлетворять двум основным условиям:

– режим реки в выбранном месте должен быть характерным по возможности для большого участка реки;

– выбранный участок должен быть удобен для наблюдений, обеспечивая наибольшую возможную их точность в данных условиях.

Выбору участка реки должно предшествовать предварительное всестороннее ознакомление с районом по литературным данным, архивным материалам и другим источникам и рекогносцировочное обследование реки.

В результате предварительного ознакомления с материалами по району предполагаемого гидрологического поста необходимо выявить:

- основные черты гидрологического режима реки: характер колебаний уровня, расход и мутность и т. п.;
- гидрографические и морфометрические характеристики участка;
- современное состояние и перспективы развития водного хозяйства;
- наличие знаков геодезической сети, высотных реперов, пунктов триангуляции и полигонометрии, могущих служить для планово-высотной привязки геодезической основы участка;
- наличие крупномасштабных карт, планов, профилей реки и т. п.;
- современное состояние путей сообщения и средств связи.

По результатам предварительного анализа намечается один или несколько участков реки, после чего производится рекогносцировка местности и окончательный выбор участка.

Рекогносцировочное обследование производится не только в пределах намеченного участка, а значительно шире. Длина участка рекогносцировочного обследования определяется местными условиями и особенностями водного объекта. Рекогносцировка участка обычно выполняется во время летней межени, когда наилучшим образом можно охарактеризовать рельеф русла, поймы и берегов, растительность, грунты и т.п. Характеристика состояния реки в половодье и зимний период выявляется путем опроса местного населения.

В процессе рекогносцировки участка производятся следующие работы:

- общий осмотр участка;
- глазомерная съемка с промерами глубин, определениями скоростей и уклонов;
- выявление основных характеристик гидрологического режима реки путем опроса местного населения.

Уклоны водной поверхности определяются геодезическими методами. На исследуемом участке реки одновременно забивают колья вровень с водной поверхностью через 50–100 м, а также во всех характерных точках перелома водной поверхности. Отметки площадок кольев определяют нивелированием IV класса, двойным ходом от репера основного поста, а сам уклон вычисляется по формуле:

$$I = \frac{H_B - H_H}{L}, \quad (1)$$

где H_B, H_H – отметки уровня воды соответственно в верхнем и нижнем створах;

L – расстояние между уклонными постами.

Измерения глубин рек является основной частью всех гидрометрических работ и производятся для составления поперечных и продольных профилей.

В связи с тем, что уровень воды является величиной динамической, то глубины, измеряемые в разное время, имеют различную глубину. Для устранения этих различий при обработке материалов измерений глубины приводят к одному расчетному (условному) уровню, соответствующему определенному моменту времени.

Глубина водного потока – это расстояние по вертикали от дна до поверхности воды, которая при глубине до 3 м и относительно небольшой скорости течения определяется с помощью гидрометрической штанги с точность отсчета до 1 см.

Основными приборами для измерения скоростей измерения течения воды в реках и каналах являются гидрометрические поплавки и гидрометрические вертушки.

Гидрометрические поплавки применяются для измерения скорости течения потока на поверхности, на различных глубинах и

средней скорости на вертикали, где невозможно измерить ее гидрометрическим прибором из-за малой глубины и помех в потоке.

Измерения скоростей течения на вертикалях обычно выполняют одной и той же вертушкой, последовательно перемещаемой в различные точки вертикали.

Перед измерением скоростей на каждой вертикали выполняются следующие работы:

- подготовка вертушки к измерению скорости, которая заключалась в сборке и проверке исправности электрической сети сигнализации и контрольного механизма;
- определение уровня воды на водомерном посту на начало и конец работы на вертикали;
- измерение глубины на вертикали;
- вычисление рабочей глубины на вертикали и расчет глубин погружения вертушки для измерения скоростей;
- измерение скорости течения.

В гидрометрическом створе намечаются скоростные вертикали в отдельных точках, которых измерялись скорости течения.

Перед измерением скорости течения на каждой скоростной вертикали вначале измеряют рабочую глубину, чтобы убедиться, что она совпадает с глубиной, полученной по промеру, или близка к ней.

При детальном способе скоростные вертикали назначаются через равные промежутки по ширине реки – через одну промерную вертикаль. Измерение скорости течения на вертикали производят при свободном от водной растительности русле в следующих пяти точках по глубине вертикали: у поверхности, на 0,2h, на 0,6h, на 0,8h и у дна. Этот способ дает наиболее точное значение средней скорости на вертикали.

Вычисляется средняя скорость на вертикали при открытом, не заросшем водной растительностью русле осуществляется по следующей формуле [15]:

$$V_{cp} = 0,05 \cdot V_{пов} + 0,347 \cdot (V_{0,2} + V_{0,6}) + 0,173 \cdot V_{0,8} + 0,083 \cdot V_{дн} \quad (2)$$

Из-за изменчивости гидравлических элементов во времени и пространстве расход воды не поддается прямым измерениям. Его значения получают в результате косвенных измерений элементов: расстояний, глубин и скоростей потока. На их основе расходы воды могут быть вычислены по следующей модели:

$$Q = \sum_{i=0}^N 0,5(V_i + V_{i+1}) \cdot f_{i+1}, \quad (3)$$

где V_i, V_{i+1} – проекция средних скоростей на граничных вертикалях; f_{i+1} – площадь между вертикалями.

Достоинство модели (3) перед другими подобными моделями в том, что данная модель допускает различную степень дискретизации поля скоростей и глубины: количество промерных вертикалей, как правило, назначается в 2–3 раза больше, чем скоростных, кроме того, она дает более точные результаты [15].

Вычисление расхода воды аналитическим способом производится в следующей последовательности [5, 8, 15]:

1. Определяется площадь отсеков между скоростными вертикалями f_j посредством планиметрирования частей поперечного профиля или аналитическим методом трапеций по формуле:

$$f_j = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_{j-1}} (h_{i,j} + h_{i+1,j}) \cdot b_{i,j}, \quad (j = 0, n), \quad (4)$$

где h_{ij} – глубина воды на i -ой вертикали j -го отсека, N_{j-1} – количество промерных вертикалей в отсеке (рисунок 1); b_{ij} – ширина между промерными вертикалями в j -ом отсеке.

2. Вычисляется средняя скорость на вертикали по формуле (2).
3. По рабочим глубинам всех промерных вертикалей со срезкой на расчетный уровень площади живого сечения между скоростными вертикалями.

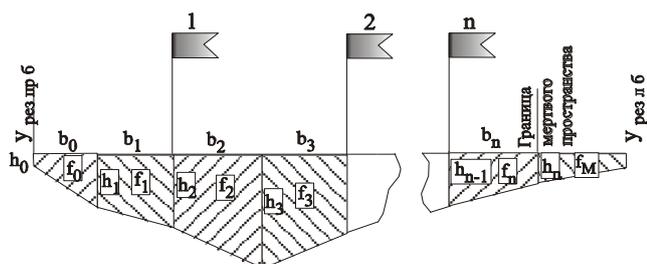


Рисунок 1 – Схема к вычислению частных площадей живого сечения

4. Средняя скорость $V_{j,s}$ в отсеке между скоростными вертикалями вычисляется как полусумма скоростей V_j и V_{j+1} :

$$V_{j,s} = 0,5(V_j + V_{j+1}), \quad (j = 0, n). \quad (5)$$

Частные расходы q_j находят как произведение $V_j f_j$, а полный расход как

$$Q = \sum_{j=0}^{n+1} q_j. \quad (6)$$

Таким образом, расчетная формула для полного расхода через все живое сечение приобретает вид:

$$Q = kV_i f_0 + 0,5 \sum_{j=1}^{n-1} (V_j + V_{j+1}) \cdot f_j + k^1 V_n \cdot f_n. \quad (7)$$

Ниже представлены результаты промерных работ, вычисленные скорости течения и расходы воды в расчетных створах рек. Построены поперечные профили рассматриваемых рек.

Алгоритм математической модели уровней и расходов. Для определения средней глубины потока и скорости для определения расходов воды различной обеспеченности в отдельном створе необходимо решение двух отдельных задач:

- устроить временный водомерный пост и измерить основные характеристики потока;
- определить водность года исследуемого водотока на текущий момент времени.

По результатам стандартных гидрометрических работ определяются отметки характерных точек русла, на основе которых строится поперечный профиль русла, и вычисляются площади поперечного сечения (ω), смоченный периметр (χ) и гидравлический радиус (R) для различной глубины наполнения по следующим формулам:

$$\omega = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i (y_{i+1} - y_{i-1})), \quad (8)$$

$$\chi = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}, \quad (9)$$

где X_i и Y_i – координаты i -ой точки рассматриваемого многоугольника (рисунок 2), м;

n – количество точек многоугольника.

Таким образом, задаваясь приращением глубины Δh , строится зависимость площади поперечного сечения ω и средней глубины h_{cp} . Приращение глубины принимается в зависимости от выраженности рельефа дна водотока, но рекомендуется принимать количество итераций $\tau > 25$, тогда $\Delta h = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{\tau}$. Аналогично определяется зависимость смоченного периметра χ и гидравлического радиуса R .

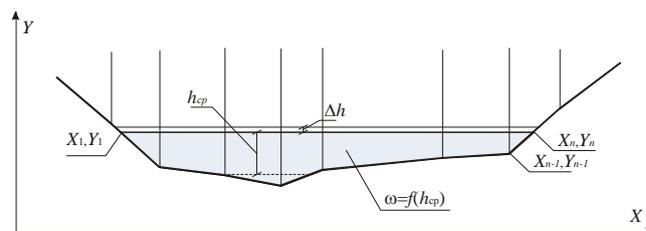


Рисунок 2 – Схема численной обработки данных промерных работ

Используя полученные массивы $[\omega, h_{cp}]$ и $[R, h_{cp}]$, выполняется оценка параметров регрессионной модели вида [12]

$$z = \alpha \cdot h_{cp}^2 + \beta \cdot h_{cp} + \varphi, \quad (10)$$

где z – прогнозируемый геометрический параметр русла; α, β, φ – константы регрессионного уравнения.

С помощью зависимости площади живого сечения от средней глубины в форме функции вида (10) находится численное решение уравнения Шези по средней глубине потока

$$Q_{P\%} = \omega_{P\%} C_{P\%} \sqrt{R_{P\%} i}, \quad (11)$$

где $C_{P\%}$ – коэффициент Шези, $m^{0.5}/c$;

$i = i_0$ – гидравлический уклон, при равномерном установившемся движении можно принять как средний уклон дна водотока (первое допущение).

Выполнив некоторые преобразования, получим из уравнения (11) систему уравнений:

$$\begin{cases} Q_{P\%} = \omega_{P\%} C_{P\%} \sqrt{R_{P\%} i} \\ \omega_{P\%} = \alpha_{\omega} \cdot h_{cp P\%}^2 + \beta_{\omega} \cdot h_{cp P\%} + \varphi_{\omega} \\ R_{P\%} = \alpha_R \cdot h_{cp P\%}^2 + \beta_R \cdot h_{cp P\%} + \varphi_R \\ C_{P\%} = \frac{R_{P\%}^{2.5\sqrt{n}-0.13-0.75\sqrt{R_{P\%}}(\sqrt{n}-0.1)}}{n} \end{cases} \quad (12)$$

Так как в уравнении (12) количество неизвестных больше, чем количество уравнений, то принимаем второе допущение, т. е. измеренные значения гидравлических характеристик стока $Q_{U3M}, R_{U3M}, \omega_{U3M}, C_{U3M}, i$ и искомая средняя глубина воды заданной обеспеченности относятся к одному гидрологическому сезону. Исходя из этого, шероховатость русла водотока определяется по формуле Н. Н. Павловского:

$$C_{U3M} = \frac{R_{U3M}^{2.5\sqrt{n}-0.13-0.75\sqrt{R_{U3M}}(\sqrt{n}-0.1)}}{n}, \quad (13)$$

где $C_{U3M} = \frac{Q_{U3M}}{\omega_{U3M} \sqrt{R_{U3M} i}}$ – коэффициент Шези определяемый на основе измеренных значений расхода и параметров поперечного сечения русла водотока, $m^{0.5}/c$.

Формула Н. Н. Павловского принята как наиболее устойчивая в условиях малых значений гидравлического радиуса.

Необходимо отметить, что при численном решении уравнения (12) необходимо учитывать границы применимости регрессионных уравнений, то есть решение данного уравнения должно находиться в пределах $0 < h_{cp P\%} < h_{cp max}$. Так как экстраполяция данных зависимостей может привести к ошибочным результатам.

На следующем этапе камеральной обработки проводятся исследования с целью выявления водности гидрологического года для исследуемой реки.

Для определения водности текущего года подбирается река-аналог, имеющая длинный ряд наблюдений за гидрологическим режимом. Как показал предварительный анализ, водность года с высокой достоверностью аппроксимации ($r > 0,75$) определяют месяцы, предшествующие расчетному. При определении параметров функции распределения (трехпараметрическое гамма распределение) применяется метод наибольшего правдоподобия, для которого имеется система уравнений.

Определения основных гидрологических характеристик рек. Согласно ТКП 45-3.04-168-2009, определение расчетных гидрологических характеристик должно основываться на данных гидрометеорологических наблюдений, в том числе регулярных наблюдений последних лет, опубликованных в специальных документах в области гидрологии; дополнительно должны учитываться данные инженерно-гидрометеорологических изысканий [13]. В связи с тем, что на р. Ясельда в створе г. Береза ведутся регулярные гидрологические наблюдения Республиканским центром по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, то определения расчетных гидрологических характеристик осуществлялось непосредственно по данным гидрологических наблюдений с учетом требований, изложенных в п.4.3 – 4.10 и 5.1.1 – 5.1.15 ТКП 45-3.04-168-2009 [13]. В настоящей работе использованы данные гидрометрических наблюдений за период с 1954 по 2018 гг., т.е. 65 лет, что достаточно для получения объективных статистических гидрологических характеристик по р. Ясельда в створе г. Береза.

Методика определения экологического стока рек. Разработанная нами методика определения детально изложена в работах [4, 7]. Остановимся вкратце на ее сути. Экологический сток – это то количество воды, которое должно оставаться в реке для обеспечения условий существования гидробионтов с одновременным сохранением ее необходимого качества. В этом случае сохраняются экосистемы пойм, а река остается элементом ландшафта. Таким образом, экологический сток обеспечивает количественное и качественное состояние водного объекта в самый маловодный период года.

В общем случае экологический (минимально допустимый) сток должен учитывать следующие факторы [10, 11, 14]:

- объем, необходимый для нормального развития гидробионтов. В этом случае требуется сохранять скорости течения воды в диапазоне: 0,25–0,6 м/с (0,25 м/с – нижний предел скоростного режима, при котором начинается бурное развитие фитопланктона), при глубине потока не менее 0,1–3 м. Важным периодом с точки зрения средообразующих функций является меженные периоды лета и зимы. Однако при средней мощности ледообразования от 17 до 45 см может наблюдаться гибель ихтиофауны;
- выполнение рекой ее природных функций. Речная сеть транспортирует вещества и энергию, таким образом, перераспределяя их во времени и в пространстве;
- внутригодовую изменчивость стока. Наличие изменчивости стока реки в течение года поддерживает естественную цикличность в развитии различных биологических видов;
- изменчивость стока по годам. Как и внутригодовая изменчивость, колебания объемов стока по годам позволяет обогащать пойменную часть водотока питательными веществами. Одновременно затопление уничтожает гидрофобные растения, заселяющие пойму за маловодный период.

Способ минимальных расходов предполагает, что размер минимального (экологического) стока принимается равным минимальному среднемесячному стоку 95 % обеспеченности [3]. Кроме того, объем экологического стока принимается в зависимости от вариации годового стока реки [9]. При значительной изменчивости годового стока экологический сток может доходить по абсолютному значению до минимального годового стока. Экологический сток определяется как доля от расчетной величины.

В Беларуси размер экологического стока принимается как 75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности. Но данный подход не в полной мере соответствует выше перечисленным требованиям, а именно: не обеспечивает внутригодовую изменчивость

стока, не учитывает многолетние циклы водности и в большинстве случаев не достигается минимальная скорость течения воды.

Применение способа натуральных исследований основано на выполнении полевых или лабораторных исследований. Способ наиболее часто применяется для важных с экологической точки зрения объектов. Сложность реализации его связана со значительными экономическими затратами, а также необходимостью проведения продолжительных непрерывных наблюдений. В настоящее время широко распространение получили автономные автоматизированные пункты гидрологического мониторинга, накапливающие всю необходимую информацию для достоверной оценки размеров экологического стока. При этом реализуются все требования, предъявляемые к величине экологически обоснованного минимального стока реки [2].

Однако, как и в иных отраслях народного хозяйства, остается проблема оценки предельных антропогенных нагрузок (объемов сброса сточных вод, их химического состава и режима сброса), обеспечивающих условия существования и развития геоценозов. Причем предельные экологически обоснованные характеристики водотока в каждом отдельном случае будут своими. Так, с точки зрения условий рыбного хозяйства, ключевым фактором будет являться количество кислорода, растворенного в воде; при этом геолого-минералогические условия могут существенно влиять на количество кислорода. Также стоит отметить, что данный способ не определяет подходов к определению экологического стока при различных обеспеченностях [1, 2].

Применение метода пропорциональных расходов основано на пропорциональном выделении экологического стока как доли стока реки в текущий момент времени. В этом случае используется некий коэффициент пропорциональности K , характерный для конкретных условий. С учетом коэффициента пропорциональности величина экологического стока $Q_i^{\text{эко}}$ в i -й интервал времени определится следующей зависимостью [11]:

$$Q_i^{\text{эко}} = Q_i \cdot K_i. \quad (14)$$

Применение данного подхода требует проведения натуральных исследований с привлечением специалистов биологического направления. Широкое применение указанный подход получил в Западной Европе. К недостаткам можно отнести отсутствие обоснованных подходов к оценке коэффициентов пропорциональности в различных природных условиях. При условии разработки нормативных подходов к определению данного коэффициента рассматриваемый подход может быть эффективным.

Способ повышения обеспеченности подразумевает выделение нижнего и верхнего предела изменения стока, практически встречающегося на реальной реке [16, 17]. Суть метода заключается в установлении нижнего предела экологически допустимого стока на уровне месячных расходов для года 99 % обеспеченности, так как эти условия являются предельными с точки зрения природопользования.

В качестве верхнего предела принимается расход 50 % обеспеченности. В этих условиях формируется нормальный режим обмена веществом и энергией в пределах геосистемы река-пойма. Как указано в работах [10, 11], наибольшая продуктивность речных и пойменных экосистем наблюдается при обеспеченности в пределах 40...60 %.

Определение параметров функции распределения экологического стока основывается на переносе обеспеченности среднегодового стока к заранее определенным обеспеченностям экологического стока. А именно, предполагается, что экологический сток 95 % обеспеченности соответствует среднегодовому стоку 99 % обеспеченности, а экологический сток 25 % обеспеченности принимается равным стоку 50 % обеспеченности. Имея две точки кривой функции распределения случайной величины, можно подобрать ее параметры. Однако применение данного подхода ограничивает диапазон применяемых теоретических кривых распределений (применимы только двух параметрические функции распределения). Кроме того, применение перехода и видится достаточно субъективным и не всегда может быть использовано в качестве проектного либо директивного. Применение данного подхода наиболее эффективно для крупных рек. В условиях Беларуси, где составление водохозяйственного

баланса нацелено в основном на малые или средние реки, применение этого метода не всегда эффективно и обоснованно [10].

Существующие подходы определения экологического стока регламентируют только минимальное значение стока реки. При этом отсутствует определение экологического стока при различных обеспеченностях. Наиболее эффективным способом определения экологического стока с учетом внутригодового распределения является способ повышения обеспеченности. Поэтому он использован в данной работе.

Одним из крупнейших производителей товарной рыбы в Республике Беларусь является ОАО «Опытный рыбхоз «Селец»», основанный в 1983 г. и являющийся крупнейшим как по занимаемым площадям для выращивания рыбы, так и по объемам продукции. В целом для рыбхоза в производстве товарной рыбы в Беларуси составляет 25 %. Основная специализация – производство и выращивание прудовой рыбы: карпа, толстолобика, белого амура. Общая площадь прудов составляет около 2500 га, нагульных прудов – 1823 га, питомных прудов – 677 га, при этом проектная мощность составляет 3116 т рыбы. Отдельные пруды здесь дают до 30 ц/га – почти вдвое больше норматива.

ОАО «Опытный рыбхоз «Селец»» расположен в бассейне реки Ясельды и является типичным для Белорусского Полесья рыбхозом. Бассейн реки Ясельды расположен в центральной части Брестской области и в основном приурочен к Полесской седловине. Водосбор занимает площадь в 7790 км². Рельеф равнинный. На повышенных участках территории преобладают песчаные грунты, на пониженных – торфяные. Лесами и болотами занято 60 % водосбора, лесами на суходолах – 27 %, болотами (в основном низинными травяными) – 34–35 %, в том числе около 7 % заболоченным лесом, озёрами – около 1 %. Характерно высокое стояние уровня поверхностных вод и богатый запас грунтовых вод верхних горизонтов, которые являются основным источником питания рек бассейна Ясельды [19].

Строительство водохранилища «Селец» продолжалось с октября 1977 г. по 1986 г. Оно предназначено для рыбоводного хозяйства, увлажнения сельскохозяйственных угодий, противопожарных и хозяйственных нужд. Основные характеристики водохранилища приведены в таблице 1, а его схема на рисунке 3.

Таблица 1 – Основные характеристики водохранилища «Селец»

| Характеристики | Величина |
|---|----------|
| Площадь водосбора в створе плотины, км ² | 681 |
| Объем годового стока 75 % обеспеченности, млн м ³ | 93,58 |
| То же , 50 % обеспеченности, млн м ³ | 101 |
| Максимальный расход воды весеннего половодья $P = 1 \%$, м ³ /с | 98,1 |
| Максимальный сбросной расход воды при ФПУ, м ³ /с | 68,0 |
| Среднемноголетний расход воды, м ³ /с | 3,52 |
| Вид регулирования стока | Сезонное |
| Длина, км | 11,3 |
| Ширина максимальная, км | 4,1 |
| Ширина средняя, км | 1,84 |
| Площадь зеркала при НПУ, км ² | 20,7 |
| Объем полный, млн м ³ | 56,3 |
| Объем полезный, млн м ³ | 41,5 |
| Отметка форсированного подпорного уровня ФПУ, м | 154,26 |
| Отметка нормального подпорного уровня, НПУ, м | 154,0 |
| Отметка уровня мертвого объема, УМО, м | 151,5 |
| Средняя глубина при НПУ, м | 2,7 |
| Глубина максимальная при НПУ, м | 5,4 |



Рисунок 3 – Схема водохранилища «Селец»

Река Ясельда и ее притоки принадлежат к типу равнинных рек, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. Режим стока в годовом разрезе характеризуется высоким весенним половодьем, относительно низкой летне-осенней меженью, нарушаемой почти ежегодно дождевыми паводками, и обычно несколько повышенной водностью в зимний период за счет таяния снега в период оттепелей [19].

Особенность режима реки – растянутое весеннее половодье, кратковременная летняя межень, которая нарушается дождевыми паводками и почти осенними ежегодными подъемами уровня воды. Весеннее половодье начинается в конце марта и длится до первой половины мая. Наивысший уровень половодья – в конце марта, среднее превышение уровня воды над межени в д. Хореве (в верховье) 1,4 м, в д. Городище (в нижнем течении) – 2,6 м, максимальное соответственно равно 1,7 и 3,1 м. На весенний период приходится 50 % годовых стоков, летне-осеннюю межень – 24 %, зимнюю – 16 %. Глубина реки в межень на перекатах составляет 0,5–0,9 м, а на плесах может достигать 1,5–2 м. Скорость течения реки в меженный период колеблется в пределах от 0,1 до 0,3 м/с. Замерзает река в начале декабря, ледоход в конце марта. Весенний ледоход 2–3 суток. Среднегодовой расход воды в устье 35,8 м³/с, наибольший (53 км от д. Сенин Пинского р-на 1958 г.) – 573 м³/с, наименьший (1958 г.) – 1,36 м³/с [19].

Результаты исследования и их обсуждения. Для количественной оценки влияния рыбхоза «Селец» на сток реки Ясельды 20.06.2021 г. нами выполнены гидрометрические измерения расхода воды в створах, расположенных выше и ниже рыбхоза. Верхний створ располагался в восточной части Пружанского района (Брестская область) на южной окраине деревни Рогачи вблизи моста через реку Ясельду (рисунок 4).



Рисунок 4 – Карта-схема расположения верхнего створа

Русло в пределах используемого створа имело прямолинейную форму на протяжении более чем трехкратной ее ширины. Ширина русла для участка створа составила в пределах 16–18 м. Берега высотой порядка 1–2 м представлены участками с большим уклоном,

высланными песчаными породами. Дно участка реки песчаное. На береговой линии и пойме присутствует травяная и кустарниковая растительность, а на некотором отдалении от русла присутствуют одиночные деревья. Водная растительность на исследуемом участке присутствовала в незначительном количестве (рисунок 5).



Рисунок 5 – Участок исследования в верхнем створе

По результатам промеров глубин в верхнем створе построен поперечный профиль реки Ясельды (рисунок 6) и определены основные характеристики на момент изысканий: расход воды $Q = 2,43 \text{ м}^3/\text{с}$; площадь поперечного сечения $F = 15,66 \text{ м}^2$; ширина реки по урезу воды $B = 16,35 \text{ м}$; средняя глубина потока $h_{\text{ср.}} = 0,96 \text{ м}$; средняя скорость течения воды $V_{\text{ср.}} = 0,16 \text{ м/с}$; максимальная скорость $V_{\text{max}} = 0,18 \text{ м/с}$; уклон водной поверхности $i_{\text{пов}} = 0,67 \text{ ‰}$.

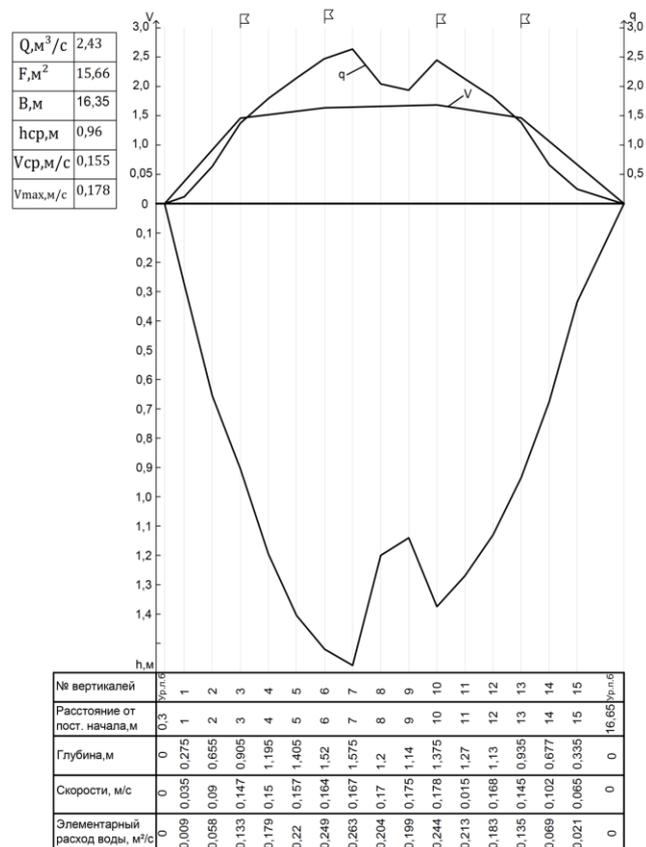


Рисунок 6 – Поперечный профиль реки Ясельды в верхнем створе

Нижний створ реки Ясельды размещен вблизи автомобильного моста, расположенного на северо-восточном въезде в город Березу (Брестская область) по дороге Р6 (рисунок 7).

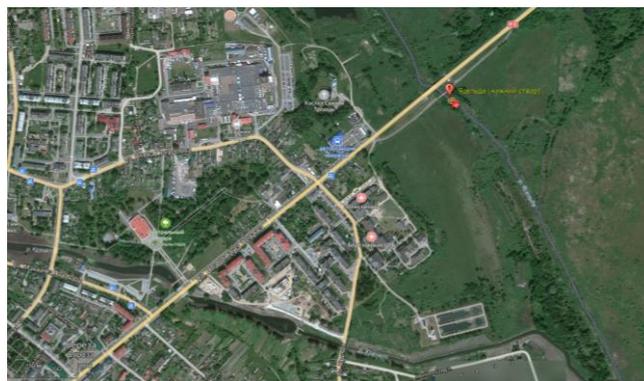


Рисунок 7 – Карта-схема нижнего створа реки Ясельды

Русло на участке створа относительно прямое. Ширина русла в створе варьируется от 7 до 10 метров. Левый и правый берег пологий и на всем протяжении створа торфянистый с большим количеством отложений органического происхождения. Берега и пойма в пределах створа покрыта кустарником и травяной растительностью. Помимо этого, на некотором расстоянии от русла имеются отдельные деревья. Водной растительности в значительном количестве не присутствовало. Речное дно в створе преимущественно илистое, особенно возле береговой линии (рисунок 8).

По результатам промеров глубин в верхнем створе построен поперечный профиль реки Ясельды (рисунок 9) и определены основные характеристики на момент изысканий: расход воды $Q = 2,20 \text{ м}^3/\text{с}$; площадь поперечного сечения $F = 6,38 \text{ м}^2$; ширина реки по урезу воды $B = 7,00 \text{ м}$; средняя глубина потока $h_{\text{ср.}} = 0,91 \text{ м}$; средняя скорость течения воды $V_{\text{ср.}} = 0,35 \text{ м/с}$; максимальная скорость $V_{\text{max}} = 0,45 \text{ м/с}$; уклон водной поверхности $i_{\text{пов}} = 1,18 \text{ ‰}$.

Сравнительный анализ исследуемых створов показал существенное их различие. Так участок реки в нижнем створе требует чистки русла. Из количественных характеристик обращает на себя внимание снижение расхода воды в нижнем створе $\Delta Q = -0,23 \text{ м}^3/\text{с}$. Это вызвано дополнительным испарением воды с поверхности водохранилища и рыбоводных прудов.

На основе данных по температуре воды и воздуха, относительной влажности воздуха и скорости ветра выполнена оценка испарения с водной поверхности за период с 1973 по 2013 гг. [19]. Расчетные величины приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Испарение с водной поверхности

| Надежность, % | Испарение с водной поверхности, мм |
|---------------|------------------------------------|
| 5 | 588 |
| 25 | 665 |
| 50 | 725 |
| 75 | 790 |
| 90 | 853 |
| 95 | 894 |

Верхний створ находится в подпоре со стороны водохранилища «Селец», что вызвало увеличение площади поперечного сечения по сравнению с нижним створом $\Delta F = 9,28 \text{ м}^2$ и ширины потока $B = 9,35 \text{ м}$ и как следствие увеличением уклона водной поверхности в нижнем створе $i_{\text{пов}} = 0,51 \text{ ‰}$, что привело к увеличению средней $V_{\text{ср.}} = 0,19 \text{ м/с}$ и максимальной $V_{\text{max}} = 0,27 \text{ м/с}$ скорости течения воды в нижнем створе.



Рисунок 8 – Участок исследования в нижнем створе

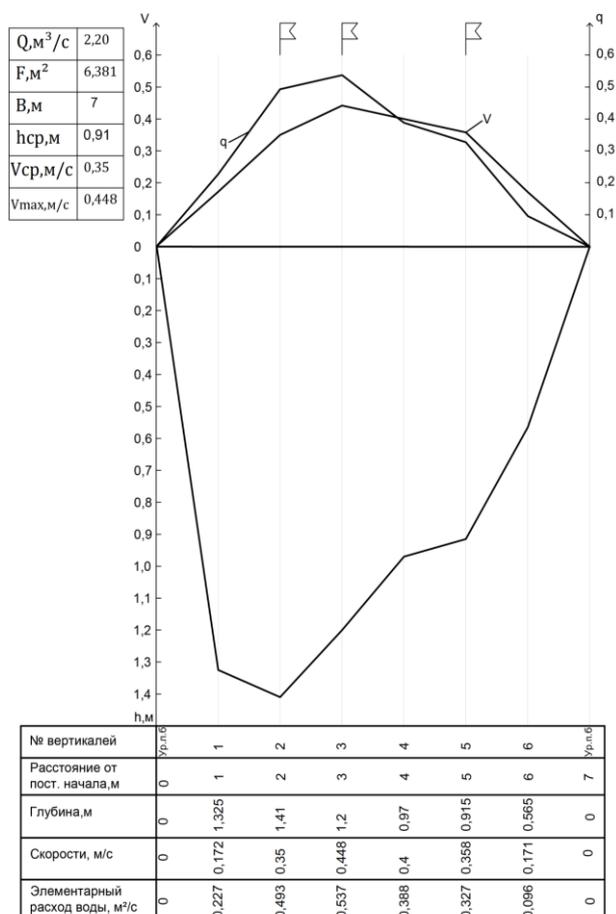


Рисунок 9 – Поперечный профиль реки Ясельды в нижнем створе

По результатам обработки данных гидрометрических измерений по методике, описанной выше, получены математические модели

(расходы/уровни/скорости) и кривые связи скорости/расхода и уровня воды в створе. В качестве особенности следует отметить, что применение кривых связи допустимо только в пределах установленного диапазона. Применение экстраполяции допустимо, однако может приводить к значительным отклонениям и погрешностям.

Для верхнего створа:

$$V = -0,0370h_{ср}^3 + 0,0519h_{ср}^2 + 0,1455h_{ср};$$

$$Q = 1,6653h_{ср}^3 + 1,0378h_{ср}^2 - 0,0113h_{ср}.$$

Для нижнего створа:

$$V = 0,1113h_{ср}^3 - 0,2736h_{ср}^2 + 0,5367h_{ср};$$

$$Q = 0,2075h_{ср}^3 + 2,7085h_{ср}^2 - 0,2417h_{ср}.$$

Данные, полученные при расчете экологического стока рек, позволили определить величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ. Результаты расчетов при условии обеспечения сохранения в рассматриваемых реках экологического стока с учетом внутригодового распределения для различных вероятностей превышения (обеспеченностей) приведены ниже.

Анализ гидрологических характеристик реки Ясельды проведен на расчетном участке реки ниже рыбхоза «Селец».

Данные о количественных характеристиках стока реки Ясельды по месяцам и в годовом разрезе представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Внутригодовое распределение стока реки Ясельды в средний по водности год

| Интервалы осреднения | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------|------|---------|------|------|------|---------|-----------|----------|---------|----------|------|
| ян-варь | фев-раль | март | апр-ель | май | июнь | июль | ав-густ | сен-тябрь | ок-тябрь | но-ябрь | де-кабрь | Год |
| Расход, м ³ /с | | | | | | | | | | | | |
| 4,45 | 4,36 | 6,83 | 9,64 | 4,74 | 3,10 | 2,86 | 3,27 | 4,40 | 4,48 | 4,40 | 4,62 | 4,75 |
| Коэффициент вариации, Cv | | | | | | | | | | | | |
| 0,70 | 0,64 | 0,66 | 0,82 | 0,43 | 0,43 | 0,65 | 0,73 | 0,71 | 0,63 | 0,70 | 0,69 | 0,31 |
| Коэффициент асимметрии, Cs | | | | | | | | | | | | |
| 1,72 | 0,93 | 1,38 | 2,96 | 0,75 | 0,23 | 1,68 | 1,42 | 0,50 | 1,02 | 2,22 | 2,37 | 0,48 |
| Коэффициент автокорреляции, r(1) | | | | | | | | | | | | |
| 0,27 | 0,28 | 0,36 | 0,28 | 0,27 | 0,20 | 0,22 | 0,50 | 0,71 | 0,30 | 0,10 | 0,01 | 0,34 |

Анализ внутригодового распределения стока реки Ясельды в створе города Березы, по месяцам показал, что на весенний период приходится 37 %, 36 % от годового стока соответственно, зимний сезон составляет 24 %, 25 % от годового стока, на летне-осенний сезон приходится 39 %, 38 % от годового стока.

Минимальные среднемесячные расходы воды 95 % обеспеченности. Характеристики минимального стока являются расчетными при гидрологическом обосновании различных водохозяйственных и водохранных проектов, а именно: проектирование гидростанций для выработки энергии, водоснабжение городов, сельских населенных пунктов, водного транспорта, рыбного хозяйства. В практике водохозяйственного проектирования основное применение находят величины минимального стока обеспеченностей в диапазоне 75–99 %, характеризующие годы с маловодной меженью сравнительно редкой повторяемости. При оценке наихудших условий для формирования качества воды обычно используется минимальный сток 95 %-ной обеспеченности (средняя повторяемость 1 раз в 20 лет), что является достаточно произвольным условием, требующим дифференциации в зависимости от тяжести негативных экологических и санитарно-технических последствий.

В таблице 4 приведены результаты расчета минимальных среднемесячных расходов воды 95 % вероятности превышения (обеспеченности) с учетом внутригодового распределения стока.

Таблица 4 – Минимальные среднемесячные расходов воды 95 % обеспеченности с учетом внутригодового распределения стока реки Ясельды, млн м³

| Интервалы осреднения | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|------|--------|------|------|------|--------|----------|---------|--------|---------|-------|
| ян-варь | фев-раль | март | апрель | май | июнь | июль | август | сентябрь | октябрь | ноябрь | декабрь | Год |
| 7,47 | 6,19 | 6,14 | 14,66 | 9,21 | 5,48 | 3,85 | 3,08 | 8,49 | 6,23 | 4,42 | 4,89 | 80,12 |

Экологический сток рек в различные по водности годы. Рассмотрим определение экологического стока реки Ясельды в створе города Березы. Расчетный период принят с 1954 по 2018 гг. Наиболее эффективно описывает исходные данные функция плотности распределения случайной величины Крицкого – Менкеля. Решая уравнения, получаем две функции плотности распределения экологического стока. Как видно из рисунка 10, для экологического стока кривая несколько сместилась влево и приобрела вид, близкий к нормальному закону распределения.

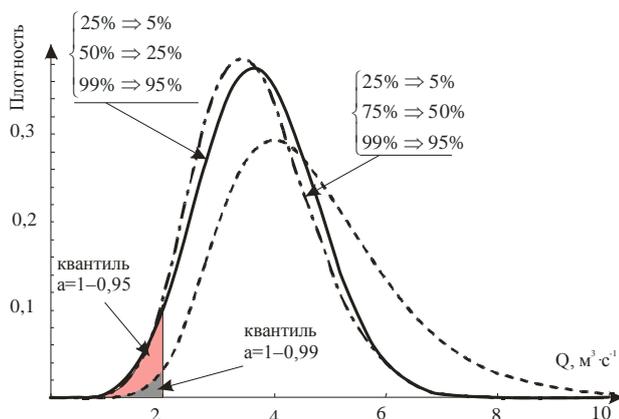


Рисунок 10 – Кривые плотности распределения среднегодового стока (штриховая) и экологического стока (штрихпунктирная и сплошная)

Учитывая результаты проведенных натурных исследований и используя метод переноса обеспеченностей, нами проведены гидрологические расчеты по определению экологического стока реки Ясельды с учетом внутригодового распределения стока для различных вероятностей превышения (обеспеченностей), результаты которых приведены в таблице 5–6.

Таблица 5 – Экологический сток с учетом внутригодового распределения, м³/с/ млн. м³

| Интервалы осреднения | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|-------|--------|-------|-------|------|--------|----------|---------|--------|---------|-------|
| ян-варь | фев-раль | март | апрель | май | июнь | июль | август | сентябрь | октябрь | ноябрь | декабрь | Год |
| 95 % вероятности превышения (обеспеченности) | | | | | | | | | | | | |
| 2,21 | 1,83 | 1,82 | 4,33 | 2,72 | 1,62 | 1,14 | 0,91 | 2,51 | 1,84 | 1,31 | 1,44 | 1,97 |
| 5,80 | 4,81 | 4,77 | 11,39 | 7,16 | 4,26 | 2,99 | 2,40 | 6,60 | 4,84 | 3,44 | 3,80 | 62,25 |
| 75 % вероятности превышения (обеспеченности) | | | | | | | | | | | | |
| 3,27 | 2,71 | 2,69 | 6,42 | 4,03 | 2,40 | 1,69 | 1,35 | 3,72 | 2,73 | 1,94 | 2,14 | 2,92 |
| 8,59 | 7,13 | 7,07 | 16,87 | 10,60 | 6,31 | 4,43 | 3,55 | 9,77 | 7,17 | 5,09 | 5,62 | 92,21 |
| 50 % вероятности превышения (обеспеченности) | | | | | | | | | | | | |
| 4,13 | 3,42 | 3,40 | 8,10 | 5,09 | 3,03 | 2,13 | 1,70 | 4,69 | 3,45 | 2,44 | 2,70 | 3,69 |
| 10,85 | 9,00 | 8,93 | 21,30 | 13,38 | 7,96 | 5,60 | 4,48 | 12,34 | 9,05 | 6,42 | 7,10 | 116,4 |
| 5 % вероятности превышения (обеспеченности) | | | | | | | | | | | | |
| 6,32 | 5,24 | 5,20 | 12,42 | 7,80 | 4,64 | 3,26 | 2,61 | 7,19 | 5,28 | 3,75 | 4,14 | 5,65 |
| 16,62 | 13,78 | 13,68 | 32,63 | 20,50 | 12,20 | 8,58 | 6,86 | 18,90 | 13,87 | 9,84 | 10,88 | 178,3 |

Таблица 6 – Величины допустимого изъятия поверхностных вод из рек с учетом сохранения экологического стока, млн м³

| Интервалы осреднения | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|--------|------|------|------|--------|----------|---------|--------|---------|-------|
| ян-варь | фев-раль | март | апрель | май | июнь | июль | август | сентябрь | октябрь | ноябрь | декабрь | Год |
| 95 % вероятности превышения (обеспеченности) | | | | | | | | | | | | |
| 1,65 | 1,36 | 1,35 | 3,08 | 1,52 | 0,51 | 0,12 | 0,01 | 1,46 | 1,16 | 0,90 | 1,07 | 14,20 |
| 75 % вероятности превышения (обеспеченности) | | | | | | | | | | | | |
| 2,23 | 1,85 | 1,84 | 4,23 | 2,25 | 0,95 | 0,42 | 0,26 | 2,13 | 1,66 | 1,25 | 1,46 | 20,51 |
| 50 % вероятности превышения (обеспеченности) | | | | | | | | | | | | |
| 2,63 | 2,17 | 2,16 | 5,00 | 2,73 | 1,23 | 0,62 | 0,42 | 2,58 | 1,98 | 1,48 | 1,71 | 24,71 |
| 5 % вероятности превышения (обеспеченности) | | | | | | | | | | | | |
| 5,29 | 4,38 | 4,35 | 10,23 | 6,02 | 3,19 | 2,00 | 1,52 | 5,61 | 4,21 | 3,06 | 3,46 | 53,30 |

Оценки изменения гидрологического режима рек под влиянием природных и антропогенных факторов. Оценка изменения стока выполнена по реке Ясельде для гидрологического поста города Березы в среднемесячном и среднегодовом разрезах для периода с 1986–2015 гг. по отношению к периоду с 1961–1986 гг. Исходные гидрологические данные взяты из официальных изданий Белгидромета – гидрологических ежегодников и детально изложена в работах [4, 7].

Итоговые обобщенные результаты по оценке изменения стока за период с 1961 по 2015 гг. по реке Ясельде в створе города Березы в таблице 7, 8.

По результатам оценок изменения стока за период с 1961 по 2015 гг. можно сделать следующие обобщенные выводы:

- среднегодовой сток изменился незначительно в пределах точности измерений;
- произошло значительное снижение стока весеннего половодья – на 66 %, с более ранним наступлением его пика; вызвано как климатическими изменениями, так и антропогенными воздействиями в виде регулирования стока водохранилищем;
- произошло увеличение стока в зимний период – на 39,4 %, вызванное частыми зимними оттепелями;
- сток в летний период изменился значительно более чем 98 %, что вызвано попусками воды с водохранилища «Селец».

Таблица 7 – Изменения стока реки Ясельды в створе города Березы за период с 1961 по 2015 гг.

| Характеристика | Значения расходов воды за периоды (1986–2015), (1961–1985), м ³ /с, разница, % | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---|----------|-------|--------|-------|------|------|--------|----------|---------|--------|---------|
| | ян-варь | фев-раль | март | апрель | май | июнь | июль | август | сентябрь | октябрь | ноябрь | декабрь |
| Q _{ср.} | 4,60 | 4,24 | 6,95 | 8,96 | 4,69 | 3,26 | 3,04 | 3,45 | 4,69 | 4,58 | 4,37 | 4,59 |
| Q ₁₉₆₁₋₁₉₈₅ | 4,27 | 3,60 | 8,63 | 12,5 | 5,33 | 3,07 | 2,31 | 2,13 | 2,37 | 3,33 | 4,47 | 4,86 |
| Q ₁₉₈₆₋₂₀₁₅ | 4,88 | 4,78 | 5,56 | 6,00 | 4,15 | 3,41 | 3,65 | 4,55 | 6,63 | 5,62 | 4,29 | 4,36 |
| Δ% | 14,3 | 32,8 | -35,6 | -52,1 | -22,1 | 11,1 | 58,0 | 114,6 | 180,0 | 68,8 | -4,0 | -10,3 |

Выполнены прогнозные оценки изменения речного стока реки Ясельды на период до 2035 года. При этом использовались результаты оценки фактического изменения климата и речного стока за период с 1961 по 2015 гг. и уточненный прогноз изменения климата на период до 2035 года с учетом мультимодельного ансамбля из четырех сценариев, рекомендуемого МГЭИК, а также региональной изменчивости климата (таблица 9) [4].

Таблица 8 – Изменение характерных видов стока реки Ясельды в створе города Береза за период с 1961 по 2015 гг., м³/с/%

| Вид стока | | | |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Средний годовой | максимальный весеннего половодья | минимальный летне-осенней межени | минимальный зимней межени |
| 4,79/1,7 | 20,8/-66,0 | 1,72/98,2 | 2,63/39,4 |

Обобщение результатов расчетов прогнозного изменения стока в бассейнах реки Припять на период до 2035 года приведено в таблице 3.20 и на картахосхемах в [4].

Таблица 9 – Прогноз изменения поверхностного стока до 2035 года реки Ясельды в створе города Березы, в % от современного состояния

| Зима | Весна | Лето | Осень | среднегодовой |
|------|-------|-------|-------|---------------|
| -0,3 | -27,0 | -41,7 | -23,3 | -23,1 |

Прогноз стока на период до 2035 года для реки Ясельды в основном подтвердил выявленные тенденции его изменения за период с 1961 по 2015 гг. При незначительном изменении стока в среднем за год высока вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Особенно значительно может измениться сток в летние месяцы.

Следует отметить, что прогнозные оценки изменения стока рек в условиях изменяющегося климата следует рассматривать как вероятностные, связанные с допущением ряда неопределенностей, исходя из различных факторов, основные из которых это:

- погрешность выявленных тенденций изменения метеорологических и гидрологических характеристик с учетом оценки статистической значимости этих тенденций;
- неопределенность и неоднозначность сценариев изменения климата;
- неопределенность результатов расчетов с использованием гидрологических моделей для прогнозирования стока, обусловленную как погрешностями самих моделей и их верификации, так и с неопределенностями используемых в них данных и коэффициентов;
- неопределенность прогнозов влияния факторов антропогенной нагрузки на водные ресурсы с учетом изменения климата.

Значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании развития ОАО «Опытный рыбхоз «Селец» и водохозяйственных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речным бассейном.

Следует отметить, что рыболовные меры и условия для роста рыбы, улучшающие кормовую эффективность, направлены на уменьшение экологического воздействия на водные объекты. Для этого используют биологические и технические методы. Биологические методы направлены на снижение экологической нагрузки от рыболовства и влияют непосредственно на процесс разведения рыбы. Такие методы предназначены для того, чтобы сделать более эффективным сам процесс разведения рыбы, при котором всё большая часть производственной нагрузки, например, питательных веществ из кормов для рыб, соединяется с конечной продукцией, уменьшая этим долю экологической нагрузки. Повышение эффективности процесса благодаря биологическим методам также зачастую улучшает экономическую рентабельность предприятия.

Технологические методы направлены на снижение экологической нагрузки и напрямую не влияют на процесс разведения рыбы. Такими методами являются методики по обработке отработанной воды, выбор местонахождения рыболовного предприятия, а также применяемые технологии рыболовства.

Насыщение воды кислородом и аэрация также могут уменьшить используемый объем воды, что позволит использовать более эффективные методы обработки отработанной воды. Уровень содержания кислорода в бассейне может быть увеличен с помощью увеличения оборота воды в бассейне, с помощью аэрации, а также с помощью оксигенации.

Заключение

Проведена комплексная оценка воздействия рыбхоза «Селец», расположенного в бассейне реки Ясельды в районе города Березы, на гидрологический режим реки для повышения эффективности управления водными ресурсами с учетом обеспечения экологического функционирования водных объектов, в ходе которой решены следующие задачи:

- выполнен анализ гидрологического режима расчетных участков рек, используемых для нужд рыбхозов, расположенных в бассейне реки Ясельды, состоящий из анализа имеющейся гидрологической информации, установлен репрезентативный период для расчета гидрологических характеристик, который составляет 65 лет и принят с 1954 по 2018 гг., определены основные гидрологические характеристики, включающие среднегодовые значения стока, коэффициенты вариации, асимметрии, автокорреляции;
- проведены натурные исследования участков реки, в ходе которых заложены створы выше и ниже участка забора воды для нужд рыбхоза. Построены поперечные профили. Для створов рассчитаны гидрологические характеристики, которые включают в себя распределение в поперечных сечениях водотоков местных продольных осредненных скоростей течения воды и расходов воды. Проведенные натурные исследования позволили определить расходы воды на исследуемых участках выше и ниже рыбхозов в период исследований;
- выполнены гидрологические расчеты по определению минимальных среднемесячных расходов воды 95 % вероятности превышения (обеспеченности) и экологического стока с учетом внутригодового распределения стока различной обеспеченности;
- разработаны математические модели для участков, расположенных ниже и выше рыбхоза, в виде математических моделей, позволяющих в зависимости от средней глубины воды в створе определить скорости течения и расходы воды;
- оперативные гидравлические расчеты с целью оценки воздействия заборов воды рыбхозом на изменение гидрологического режима водных объектов (глубин воды, скоростей течения и расходов воды) осуществляются на основе разработанных математических моделей как разницы расчетных параметров для заложённых створов ниже и выше рыбхозов;
- определены математические зависимости для глубины, скорости течения и расходов воды в исследуемых створах ниже рыбхозов, соответствующих экологическому стоку, с использованием результатов гидрологических расчетов и математических моделей водных объектов;
- определены величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки, используемых для нужд рыбхозов, с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ и прудов, при обеспечении условия сохранения в реках экологического стока, что позволит определить наиболее эффективный режим наполнения рыболовческих прудов.

Полученные результаты актуальны на ближнюю перспективу (10 лет), однако, возможно, требуют некоторых корректировок в будущем в связи с прогнозируемыми изменениями климата. Прогнозные оценки изменения стока реки Ясельды на период до 2035 года характеризуются незначительным изменением стока в среднем за год, но высока вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Особенно значительно может измениться сток в летние месяцы. Усиление неравномерности внутригодового распределения стока и увеличение рисков наводнений, обусловленных резкими оттепелями в зимний период, более ранним наступлением весеннего половодья и увеличением интенсивности дождевых паводков может привести к увеличению рисков экстремальных явлений, в том числе возникновения маловодных периодов, повышается вероятность наступления длительных маловодных периодов. Во время маловодных периодов может произойти существенное уменьшение стока малых рек, ухудшение экологического состояния и рекреационного потенциала рек и прилегающих территорий, изменение гидрогеологического режима грунтовых вод, истощение почвенного покрова в пойме и т. п.

Хоть прогнозные оценки изменения стока рек рассматривают как вероятностные, связанные с допущением ряда неопределенностей, тем не менее, разработка и реализация мер по адаптации к изменению климата в части уточнения водохозяйственных балансов рыбхозов является актуальной задачей.

Работа выполнялась в рамках НИР «Оценка воздействия рыбхозов, расположенных в бассейне реки Припять, на гидрологический режим водных объектов» № госрегистрации 20212617

Список цитированных источников

1. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems / A. H. Arthington [et al.] // *Ecological Applications*. – 2006. – No. 16(4). – P. 1311–1318.
2. CIS Guidance Document n°31. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive : Technical Report 2015 - 086 / Martina Bussetini [et al.] ; European Commission. – Luxembourg : European Union, 2015. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/271769108>. – Date of access: 09.01.2021. – doi: 10.2779/775712
3. Владимиров, А. М. Сток рек в маловодный период года / А. М. Владимиров. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 295 с.
4. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 225 с.
5. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учебное пособие / А. А. Волчек. – Москва : КНОРУС, 2021. – 418 с.
6. Волчек, А. А. Оптимизация управления природопользованием и эколого-экономическими системами регионов : монография / А. А. Волчек, Ан. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Москва ; Берлин : Дерект-Медиа, 2021. – 148 с.
7. Волчек, А. А. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // *Водное хозяйство России*. – 2007. – № 1. – С. 50–62.
8. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: учебное пособие / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека. – Москва : КНОРУС, 2021. – 520 с.
9. Лалыкин, Н. В. Определение резервируемого стока малых рек Молдавии / Н. В. Лалыкин // *Рациональное использование поверхностных и подземных вод : сборник научных трудов*. – М. : Гидрометеиздат, 1986. – С. 44–49.
10. Маркин, В. Н. Внутригодовое распределение экологического стока малых рек [Электронный ресурс] / В. Н. Маркин. – Режим доступа: http://www.msuee.ru/science/1/tom/1/1_12.doc. – Дата доступа: 28.04.2013.
11. Маркин, В. Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки [Электронный ресурс] / В. Н. Маркин. – Режим доступа: <http://www.msuee.ru/kmirz/Htmls4/Markin/DopVozd.htm>. – Дата доступа: 04.05.2005.
12. Статистические методы в природопользовании : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Валуев [и др.]. – Брест : БПИ, 1999. – 252 с.
13. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения : ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). – Введен 2010-07-01. – Мн. : Стройтехнорм, 2010. – 55 с.
14. Ткачев, Б. П. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы / Б. П. Ткачев, В. И. Буланов. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2002. – 114 с.
15. Учебная гидрометрическая практика : учебное пособие / А. А. Волчек [и др.] ; под ред. А. А. Волчека. – Минск : РИВШ, 2020. – 260 с.
16. Фащевский, Б. В. Проблемы экологического нормирования водного режима рек / Б. В. Фащевский // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 1993. – № 5. – С. 12–18.
17. Фащевский, Б. В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока / Б. В. Фащевский. – Минск : БелНИИНТИ, 1989. – 51, [2] с.
18. Энциклопедия : в 3 т. / редкол.: Т. В. Белова [и др.]. – Минск : Беларуская Энциклапедыя імя П. Броўкі, 2010. – 504 с.
19. Ясельда / И. В. Абрамова [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека, И. И. Кирвеля, Н. В. Михальчука ; Национальная академия наук Беларуси, Полесский аграрно-экологический институт. – Минск : Беларуская навука, 2017. – (Реки Полесья). – 416 с.

References

1. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems / A. H. Arthington [et al.] // *Ecological Applications*. – 2006. – No. 16(4). – P. 1311–1318.
2. CIS Guidance Document n°31. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive : Technical Report 2015 - 086 / Martina Bussetini [et al.] ; European Commission. – Luxembourg : European Union, 2015. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/271769108>. – Date of access: 09.01.2021. – doi: 10.2779/775712
3. Vladimirov, A. M. Stok rek v malovodnyi period goda / A. M. Vladimirov. – L. : Gidrometeoizdat, 1976. – 295 s.
4. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetom izmeneniya klimata / A. A. Volchek [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 225 s.
5. Volchek, A. A. Gidrologicheskie raschety : uchebnoe posobie / A. A. Volchek. – Moskva : KNORUS, 2021. – 418 s.
6. Volchek, A. A. Optimizaciya upravleniya prirodnopol'zovaniem i ekologo-ekonomicheskimi sistemami regionov : monografiya / A. A. Volchek, An. A. Volchek, P. V. SHvedovskij. – Moskva ; Berlin : Derekt-Media, 2021. – 148 s.
7. Volchek, A. A. Ocenka transformacii vodnogo rezhima malyh rek Belorusskogo Poles'ya pod vozdeystviem prirodnyh i antropogennyh faktorov (na primere r. YAsel'da) / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // *Vodnoe hozyajstvo Rossii*. – 2007. – № 1. – S. 50–62.
8. Gidravlika, gidrologiya, gidrometriya: uchebnoe posobie / A. A. Volchek [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka. – Moskva : KNORUS, 2021. – 520 s. – (Bakalavriat i magistratura).
9. Lalykin, N. V. Opredelenie rezerviruемого stoka malyh rek Moldavii / N. V. Lalykin // *Racional'noe ispol'zovanie poverhnostnyh i podzemnyh vod : sbornik nauchnyh trudov*. – M. : Gidrometeoizdat, 1986. – S. 44–49.
10. Markin, V. N. Vnutrigodovoe raspredelenie ekologicheskogo stoka malyh rek [Elektronnyj resurs] / V. N. Markin. – Rezhim dostupa: http://www.msuee.ru/science/1/tom/1/1_12.doc. – Data dostupa: 28.04.2013.
11. Markin, V. N. Opredelenie ekologicheskii dopustimogo vozdeystviya na malye reki [Elektronnyj resurs] / V. N. Markin. – Rezhim dostupa: <http://www.msuee.ru/kmirz/Htmls4/Markin/DopVozd.htm>. – Data dostupa: 04.05.2005.
12. Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii : uchebnoe posobie dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij / V. E. Valuev [i dr.]. – Brest : BPI, 1999. – 252 s.
13. Raschetnye gidrologicheskie harakteristiki. Poryadok opredeleniya : ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). – Vveden 2010-07-01. – Mn. : Strojtekhnorm, 2010. – 55 s.
14. Tkachev, B. P. Malye reki: sovremennoe sostoyanie i ekologicheskije problemy / B. P. Tkachev, V. I. Bulanov. – Novosibirsk : GPNTB SO RAN, 2002. – 114 s.
15. Uchebnaya gidrometricheskaya praktika : uchebnoe posobie / A. A. Volchek [i dr.] ; pod red. A. A. Volcheka. – Minsk : RIVSH, 2020. – 260 s.
16. Fashchevskij, B. V. Problemy ekologicheskogo normirovaniya vodnogo rezhima rek / B. V. Fashchevskij // *Melioraciya i vodnoe hozyajstvo*. – 1993. – № 5. – S. 12–18.
17. Fashchevskij, B. V. Ekologicheskoe obosnovanie dopustimoi stepeni regulirovaniya rechnogo stoka / B. V. Fashchevskij. – Minsk : BelNIINTI, 1989. – 51, [2] s.
18. Enciklopediya : v 3 tomah / redkol.: T. V. Belova [i dr.]. – Minsk : Belaruskaya Encyklopedyja imya P. Broўki, 2010. – 504 s.
19. YAsel'da / I. V. Abramova [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka, I. I. Kirvelya, N. V. Mihal'chuka ; Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Poleskij agrarno-ekologicheskij institut. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2017. – (Reki Poles'ya). – 416 s.

Материал поступил в редакцию 09.02.2022

ЭКОНОМИКА

УДК 005.5-047.36

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА И КОРРЕКТИРОВКИ ПРОЦЕССОВ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

И. М. Гарчук

К. э. н., заведующий кафедрой менеджмента Брестского государственного технического университета,
г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: garchuk_im@mail.ru

Реферат

Приведена схема развития процессов стратегического управления, включающая проведение диагностики объекта исследования, т. е. измерение и оценку процессов управления; обобщение и анализ результатов оценки; выполнение мониторинга и при необходимости корректировку процессов управления, что позволяет выполнить комплексную оценку действующей в организации системы стратегического управления, построить ее траекторию развития, выявить проблемные зоны в управлении и разработать мероприятия, направленные на развитие стратегического управления организацией. Обоснована необходимость проведения мониторинга для получения достоверных и достаточных данных о состоянии системы через определенные промежутки времени. Определена важность подготовки и накопления информации, что определяет целесообразность создания банка данных по результатам проводимого мониторинга и позволяет отслеживать динамику развития процессов управления организацией. Рассмотрена методика корректировки процессов стратегического управления и определена величина корректирующего воздействия для восстановления их показателей по плановой траектории развития.

Ключевые слова: стратегическое управление организацией, диагностика, мониторинг, корректировка, программа развития, эффективность, процессы управления.

MONITORING AND ADJUSTMENT METHODOLOGY
PROCESSES OF STRATEGIC MANAGEMENT OF THE ORGANIZATION

I. M. Garchuk

Abstract

The scheme of development of strategic management processes is given, which includes diagnostics of the object of research, i.e. measurement and evaluation of management processes; generalization and analysis of evaluation results; monitoring and, if necessary, adjustment of management processes, which allows performing a comprehensive assessment of the strategic management system operating in the organization, building its development trajectory, identifying problem areas in management and developing measures aimed at the development of strategic management of the organization. The necessity of monitoring is justified in order to obtain reliable and sufficient data on the state of the system at certain intervals of time. The importance of preparing and accumulating information is determined, which determines the feasibility of creating a data bank based on the results of monitoring and allows you to track the dynamics of the development of the organization's management processes. The method of adjusting the processes of strategic management is considered and the value of the corrective effect for restoring their indicators according to the planned development trajectory is determined.

Keywords: strategic management of the organization, diagnostics, monitoring, adjustment, development program, efficiency, management processes.

Введение

Оценка эффективности процессов стратегического управления может проводиться путем сравнения результатов работы с поставленными целями программы развития организации. Оценка используется в качестве механизма обратной связи для корректировки процессов управления и должна проводиться системно и непрерывно для всех специальных функций управления (политики, маркетинга, закупок, реализации, финансов, управления человеческими ресурсами, системы менеджмента качества, производства). Для обеспечения выполнения программы развития организации необходимо контролировать посредством мониторинга развитие каждой специальной функции управления.

Мониторинг и корректировка процессов стратегического управления

Развитие стратегического управления организацией обеспечивается при согласованном функционировании составляющих элементов системы управления и основывается на информационном обеспечении процесса принятия управленческих решений. Наличие точной и достоверной информации о процессах, происходящих в системе стратегического управления, позволяет выполнить их измерение, анализ и оценку с помощью интегрального показателя эффективности управления – уровня управляемости, оценивающего и прогнозирующего состояние целевой функции системы стратегического управления, объединяющей техническую, социальную, организационную и экономическую подсистемы управления на конкретный интервал времени [1].

Разработка и реализация программы развития стратегического управления включает проведение диагностики объекта исследования, т. е. измерение и оценку процессов управления; обобщение и анализ результатов оценки; выполнение мониторинга и при необходимости корректировку процессов управления (рисунок 1).

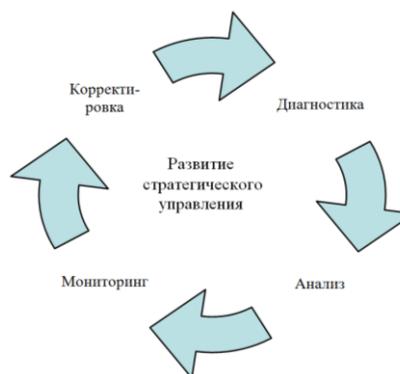


Рисунок 1 – Схема развития процессов стратегического управления
Примечание – Источник : собственная разработка на основе [2]

Приведенная схема дает возможность получить комплексную оценку действующей в организациях системы стратегического управления,

построить ее траекторию развития на 1 год – 5 и более лет, выявить проблемные зоны в управлении и отрицательные воздействия, препятствующие развитию управления, и на основании полученных результатов планировать мероприятия, направленные на развитие стратегического управления организацией. На рисунке 2 построена траектория развития процессов стратегического управления организацией.

Диагностика стратегического управления представляет собой совокупность последовательных мероприятий, направленных на получение достоверной информации, позволяющей оценить эффективность управления в начальный момент времени. На основе выполненного анализа результатов диагностики разрабатывается программа развития стратегического управления за конкретный интервал времени, которая определяет перечень заданий, действий, ответственных за реализацию намеченных целей [3].

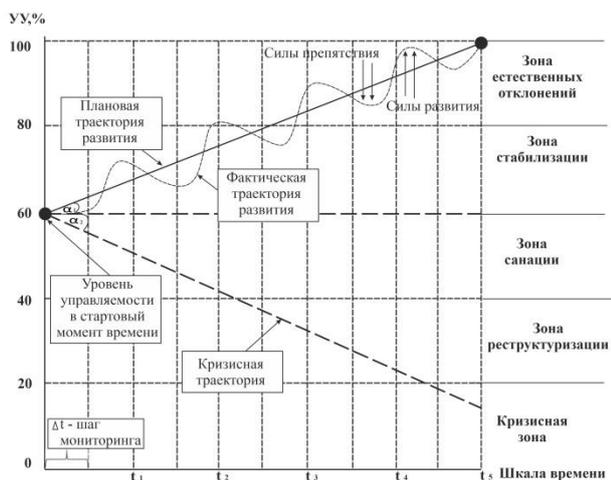


Рисунок 2 – Траектория развития процессов стратегического управления

Примечание – Источник : собственная разработка на основе [4]

Ключевым моментом в реализации программы развития стратегического управления является проведение мониторинга каждой функции управления, который представляет собой наблюдение и оценку для получения достоверных и достаточных данных о состоянии каждой функции управления через определенные промежутки времени. Мониторинг предоставляет руководству организации необходимые данные и информацию для принятия результативного решения. Мониторинг определяет оценку степени достижения целей и позволяет своевременно корректировать процессы управления на каждом интервале времени. Важность мониторинга заключается в том, что он является необходимым условием обеспечения прозрачности и достоверности производимых измерений в процессах управления и определения уровня управляемости (УУ) [5].

Особое место в мониторинге занимает подготовка и накопление информации, что определяет целесообразность создания банка данных по результатам проводимого мониторинга и позволяет отслеживать динамику развития процессов управления организацией. Мониторинг предполагает активный обмен информацией между всеми участниками реализации программы развития на всех этапах стабилизации процессов управления. Изменение времени проведения мониторинга процессов управления с постоянным шагом является шагом квантования, выбор которого зависит от времени стабилизации процессов управления. Правильный выбор шага квантования должен помочь увидеть, распознать проблему и восстановить процессы управления в зоне устойчивого развития, т. е. в период управления мониторинг должен осуществляться несколько раз, для того чтобы выявить ситуацию, внести корректировки и удостовериться, что система управления восстановлена. В этой связи необходим расчет контрольных точек, расположенных внутри шага квантования, для настройки процессов управления и их корректировки [6].

В процессе исследования динамики продвижения по траектории развития с помощью мониторинга можно увидеть, что фактическая траектория развития смещается вниз или вверх (рисунок 2). Это означает, что возникают силы, действующие на снижение уровня управляемости (отрицательные силы) и создающие барьеры

сопротивления силам, действующим на развитие (положительные силы). Под воздействием отрицательных сил траектория развития смещается вниз, и если не принять вовремя необходимых управленческих решений по стабилизации, то траектория развития может попасть в кризисную зону или зону банкротства. Для того чтобы избежать такого положения и выйти к концу заданного интервала времени (на рисунке t_5) на заданный уровень, равный 100 %, необходим постоянный мониторинг за динамикой изменения траектории развития и ее корректировка. В этой связи внутри шага квантования определяются контрольные точки, которые позволят вовремя увидеть проблему, устранить ее и достичь заданной величины траектории развития. В каждой контрольной точке с помощью мониторинга проводится сравнение полученных фактических приращений уровня управляемости ($\Delta УУ_{ф}$) и плановых приращений ($\Delta УУ_{пл}$) и проводится при необходимости корректировка [7].

Как показывает практика проведения мониторинга, корректировка процессов стратегического управления возникает при отклонении фактических уровней управляемости ($УУ_{ф}$) от плановых ($УУ_{пл}$) в интервале времени шага квантования. Таким образом, определяется величина корректирующего воздействия ($\Delta УУ_{кор}$) и составляется персонализированная программа для восстановления движения по плановой траектории развития. После определения величины недостатка уровня управляемости формируется его величина на следующий интервал времени (следующая контрольная точка). Совокупность приращений на величину корректирующих воздействий должна обеспечить выход уровня управляемости на плановую траекторию развития. Если в следующей контрольной точке не происходит выхода уровня управляемости на плановую траекторию развития, то процедура корректировки повторяется.

При совпадении уровня управляемости фактического с плановым настройка процессов управления завершается, т. е. восстанавливается в соответствии с программой и выходит на плановый режим развития. При завершении настройки завершается процедура расчета и корректировки величины показателей процессов стратегического управления.

Корректировка процессов управления должна осуществляться через информационный преобразователь, который позволяет высшему звену управления организацией сопоставлять характеристики производственно-хозяйственной деятельности с показателями процессов управления. В плановом периоде показатели развития организации определяются показателями производственно-хозяйственной деятельности и уровнями управляемости, зафиксированными в стартовых условиях измерения. Таким образом, появляются три информационных потока, сопровождающие процессы управления и позволяющие обобщать и анализировать изменения, происходящие в производственно-хозяйственной деятельности организации.

Оперативный информационный поток собирает всю оперативную информацию о функционировании организации, группирует ее, преобразовывает и представляет во все функциональные подразделения, где информация зарождается, трансформируется и используется для анализа и исследования в процедурах оценки и корректировки. Функционирующий информационный поток накапливается, обобщается в интервалах оперативного управления и передается в информационный поток текущего управления. Аналогичные действия проходят и с информационным потоком текущего управления. Он накапливается, обобщается и трансформируется во все функциональные подразделения, где востребован для анализа и использования в процедурах текущего управления и корректировки текущих процессов управления. Функционирующий текущий информационный поток накапливается в интервалах стратегического управления и передается в его информационный поток. Показатели, характеризующие процессы стратегического управления, измеряются в уровнях управляемости и характеризуют эффективность функций управления. Практически они фиксируют изменения, происходящие в производственно-хозяйственной деятельности организации за интервал времени Δt и определяют, как данные изменения повлияли на оценку эффективности управления.

Вся система работы мониторинга запускается сигналом к измерению и обработке информации в каждой контрольной точке и реализует алгоритмы измерения и преобразования показателей и характеристик управления, т. е. фиксируются показатели производственно-хозяйственной деятельности, переводятся в значения уровней управляемости и анализируются. На основании полученных значений определяются задания и выдаются к реализации исполнителям.

Корректировка показателей стратегического управления возникает в процессе изменения значения уровня управляемости на последующем шаге измерения более чем на 0,07 относительных единиц (7 %) от заданных нормальной траекторией развития.

При измерении очередного показателя стратегического управления производится его сравнение с заданным значением (формула 1):

$$\pm \Delta YU_{cm}(\Delta t) = YU_{cm}^{пл}(t_j) - YU_{cm}^ф(t_{j+1}), (1)$$

где ΔYU_{cm} – приращение уровня управляемости в стратегическом режиме управления;

$YU_{cm}^{пл}$ – плановый уровень управляемости в стратегическом режиме управления;

$YU_{cm}^ф$ – фактический уровень управляемости в стратегическом режиме управления;

t_j – стартовый момент времени измерения процессов стратегического управления;

t_{j+1} – время с учетом шага мониторинга.

Как показали исследования, выполнение мониторинга только по шагам квантования становится недостаточным для достижения нормальной траектории развития, поэтому он повторяется на текущем уровне управления, а при необходимости и на оперативном уровне.

Корректировка процессов текущего управления возникает при изменении интервальных показателей уровня управляемости более чем на 0,05 относительных единиц (5 %) от заданных нормальной траекторией развития (формула 2):

$$\pm \Delta YU_{mek}(\Delta t) = YU_{mek}^{пл}(t_j) - YU_{mek}^ф(t_{j+1}), (2)$$

где ΔYU_{mek} – приращение уровня управляемости в текущем режиме управления;

$YU_{mek}^{пл}$ – плановый уровень управляемости в текущем режиме управления;

$YU_{mek}^ф$ – фактический уровень управляемости в текущем режиме управления;

t_j – стартовый момент времени измерения процессов текущего управления;

t_{j+1} – время с учетом шага мониторинга.

Таким образом, корректировка процессов управления происходит до тех пор, пока фактические уровни управляемости, измеряемые в оперативном, текущем и стратегическом режимах, не сравниваются с плановыми уровнями управляемости траектории развития.

Заключение

Проведенный анализ движения по траектории развития позволил сделать вывод, что эффективное стратегическое управление достигается за счет проведения персонализированного мониторинга процессов управления не только в полугодовых интервалах измерения, но и при необходимости в контрольных точках, что дает возможность установить персональную ответственность исполнителей за работу каждой функции управления (ФИО исполнителя). В каждой временной точке мониторинга проводится сравнение полученных фактических и плановых приращений уровней управляемости. При снижении уровня управляемости и выявлении точки, отмечающей отклонение значения от плановой траектории развития, соответственно происходит отклонение от запланированных показателей и мероприятий по развитию стратегического управления. Это означает, что мероприятия программы, разработанные на основе полученного значения уровня управляемости в стартовой точке, не позволили достичь необходимого значения или ответственные за данные мероприятия и исполнители не приложили необходимых усилий для их выполнения, поэтому траектория развития процессов управления сместилась вниз. В этой связи определяется величина корректирующего воздействия и составляется персонализированная программа действий для восстановления движения по плановой траектории развития. Совокупность приращений на величину корректирующих воздействий должна обеспечить выход уровня управляемости на плановую траекторию развития. Если на следующем

шаге мониторинга руководство организации не прикладывает усилий для реализации программы, траектория развития опускается еще ниже и может попасть в кризисную зону. В этой ситуации необходимы кардинальные действия, требующие значительных трудовых, финансовых и социально-психологических затрат.

Таким образом, использование методического обеспечения создает основу для оценки степени достижения запланированных мероприятий развития каждой функции управления и своевременной корректировки траектории развития на заданном интервале времени, что в результате приводит к уменьшению управленческих ошибок.

Список цитированных источников

1. Методология измерения и практикум по управлению организацией (в стартовых условиях устойчивого развития организации) / О. А. Высоцкий [и др.]; под ред. О. А. Высоцкого. – Минск : Право и экономика, 2016. – 270 с.
2. Гарчук, И. М. Менеджмент процесса устойчивого развития производственной организации / И. М. Гарчук // Перспективные направления развития региональной экономики : сборник материалов V Республиканской научно-практической конференции, Брест, 22 мая 2015 г. / Брестский государственный университет ; редкол.: Д. А. Петрукович [и др.]. – Брест, 2015. – С. 28–30.
3. Гарчук, И. М. Показатели и методы измерения процессов управления стратегией устойчивого развития организации / И. М. Гарчук // Zarządzanie. Teoria i Praktyka. – 2016. – № 18. – С. 41–46.
4. Высоцкий, О. А. Теория измерения управляемости хозяйственной деятельностью предприятий / О. А. Высоцкий ; под науч. ред. Р. С. Седегова. – Мн. : ИООО «Право и экономика», 2004. – 396 с.
5. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества: СТБ ISO 9004-2010 (ISO 9004:2009, IDT). – Взамен СТБ ИСО 9004-2001; введ. 01.01.2011. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь: БелГИСС, 2010. – 45 с.
6. Высоцкий, О. А. Основы устойчивого развития производственной организации / О. А. Высоцкий, И. М. Гарчук, Н. С. Данилова ; под науч. ред. В. Ф. Медведева ; Брестский государственный технический университет. – Минск : ИООО «Право и экономика», 2015. – 358 с.
7. Гарчук, И. М. Мониторинг процессов управления стратегией устойчивого развития предприятия / И. М. Гарчук // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2016. – № 3 : Экономика. – С. 51–54.

Список цитированных источников

1. Metodologia izmereniya i praktikum po upravleniyu organizacii (v startovyh usloviyah ustojchivogo razvitiya organizacii) / O. A. Vysockij [i dr.]; pod red. O. A. Vysockogo. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2016. – 270 s.
2. Garchuk, I. M. Menedzhment processa ustojchivogo razvitiya proizvodstvennoj organizacii / I. M. Garchuk // Perspektivnye napravleniya razvitiya regional'noj ekonomiki : sbornik materialov V Respublikanskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Brest, 22 maya 2015 g. / Brestskij gosudarstvennyj universitet ; redkol.: D. A. Petrukovich [i dr.]. – Brest, 2015. – S. 28–30.
3. Garchuk, I. M. Pokazateli i metody izmereniya processov upravleniya strategiej ustojchivogo razvitiya organizacii / I. M. Garchuk // Zarządzanie. Teoria i Praktyka. – 2016. – № 18. – S. 41–46.
4. Vysockij, O. A. Teoriya izmereniya upravlyaemosti hozyajstvennoj deyatel'nost'yu predpriyatij / O. A. Vysockij ; pod nauch. red. R. S. Sedegova. – Mn. : IOOO «Pravo i ekonomika», 2004. – 396 s.
5. Menedzhment dlya dostizheniya ustojchivogo uspekha organizacii. Podhod na osnove me-nedzhmenta kachestva: STB ISO 9004-2010 (ISO 9004:2009, IDT). – Vzamen STB ISO 9004-2001; vved. 01.01.2011. – Minsk : Gosudarstvennyj komitet po standartizacii Respubliki Belarus': BelGISS, 2010. – 45 s.
6. Vysockij, O. A. Osnovy ustojchivogo razvitiya proizvodstvennoj organizacii / O. A. Vysockij, I. M. Garchuk, N. S. Danilova ; pod nauch. red. V. F. Medvedeva ; Brestskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet. – Minsk : IOOO «Pravo i ekonomika», 2015. – 358 s.
7. Garchuk, I. M. Monitoring processov upravleniya strategiej ustojchivogo razvitiya predpriyatiya / I. M. Garchuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. – 2016. – № 3 : Ekonomika. – S. 51–54.

Материал поступил в редакцию 06.12.2021

МЕЖДУНАРОДНОЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И КИТАЯ: ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Н. В. Мартынович

Магистр экономических наук, аспирант кафедры логистики и ценовой политики
Белорусского государственного экономического университета, г. Минск, Беларусь e-mail: natamartinovitch@mail.ru

Реферат

В статье рассматривается развитие взаимоотношений между Республикой Беларусь и Китаем; проводится анализ ключевых событий, на основании которого выделяются этапы развития экономических отношений между двумя странами; приводятся примеры сотрудничества и совместных проектов. Производится сравнительный анализ и оценка товарооборота, стоимости экспорта и импорта Республики Беларусь и Китая.

Ключевые слова: сотрудничество, Республика Беларусь, Китай, этапы развития отношений, товарооборот, экспорт, импорт.

INTERNATIONAL ECONOMIC COOPERATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS AND CHINA: STAGES AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

N. V. Martynovich

Abstract

The article examines the development of relations between the Republic of Belarus and China; an analysis of key events is carried out, on the basis of which the stages of development of economic relations between the two countries are distinguished; examples of cooperation and joint projects are given. A comparative analysis and assessment of trade turnover, the value of exports and imports of the Republic of Belarus and China is carried out.

Keywords: cooperation, Republic of Belarus, China, stages of development of relations, turnover, export, import.

Введение

В условиях современного мира практически ни одна страна не может эффективно развиваться без взаимодействия с другими государствами. Страны объединяются исходя из своих геополитических или геоэкономических интересов. Для реализации данных интересов создаются различные экономические интеграционные союзы и объединения, которых в настоящее время в мире насчитывается более 50.

На данном этапе главным долгосрочным фактором развития мировой экономики является глобализация рынков товаров, услуг и капитала, которая определяет темпы экономического роста. Международные экономические отношения развиваются опережающими темпами: мировая торговля опережает внутреннее производство, а международные инвестиции – торговый обмен. В международных хозяйственных связях повышается роль развивающихся стран, в первую очередь азиатских, в частности Китая. В торговле товарами возрастает роль продукции обрабатывающей промышленности, основная часть которой приходится на изделия с высокой добавленной стоимостью. Расширение экспортной базы и импортных потребностей Китая ведет к увеличению его доли и значимости в мировой торговле, в том числе и в Республике Беларусь.

Оценка сотрудничества Республики Беларусь и Китая и этапы развития экономических отношений

Республику Беларусь и Китайскую Народную Республику объединяет многолетняя история успешного взаимодействия. Сотрудничество между Минском и Пекином началось еще в 90-е годы, когда Республика Беларусь активно поставляла в Китай оставшуюся в стране советскую военную технику. Дипломатические отношения между Республикой Беларусь и Китаем были установлены в 1992 году и в течение 29-летнего периода был пройден путь от дипломатического сотрудничества до стратегического партнерства.

В процессе анализа ключевых событий, последовательности развития отношений и их глубины было выделено четыре основных этапа:

– **I этап «Становление отношений», 1992–2004 гг.** На этом этапе происходило установление дипломатических связей, подписание различных межправительственных соглашений, среди которых соглашения о торгово-экономическом, научно-техническом сотрудничестве, о защите инвестиций, о взаимном признании документов об образовании и документов об ученых степенях, а также подписание меморандумов о сотрудничестве между министерствами и ведомствами.

– **II этап «Развитие отношений и торгово-экономического сотрудничества», 2005–2009 гг.** Этот период послужил развитию политических отношений: заключались соглашения, в том числе в экономической сфере, налаживались дальнейшие связи между министерствами и регионами. Так, в 2005 был подписан Меморандум о взаимопонимании по итогам переговоров о доступе к рынкам между Правительством Республики Беларусь и Правительством Китайской Народной Республикой, в 2006 г. – Меморандум о сотрудничестве с Федерацией машиностроительной промышленности Китая, в 2009 г. – Меморандум между Министерством транспорта и коммуникаций Республики Беларусь и Министерством коммуникаций Китайской Народной Республики о взаимопонимании по вопросам сотрудничества в области автомобильного транспорта, внутреннего водного транспорта и строительства соответствующей инфраструктуры и другие соглашения [1]. В 2007 году был создан Белорусско-Китайский межправительственный комитет по сотрудничеству, включающий в себя пять комиссий: торгово-экономическую, научно-техническую, по вопросам безопасности, образования и культуры, с целью координации деятельности в политической, экономической и других сферах сотрудничества [1]. В 2007 г. был подписан ряд соглашений между Правительством Республики Беларусь и Правительством КНР об оказании помощи посредством финансирования проектных и строительно-монтажных работ по модернизации цементной отрасли, Минской ТЭЦ-2, Гомельского областного клинического кардиологического диспансера. В 2009 г. были заключены первые соглашения между Правительством Республики Беларусь, Эксимбанком Китая и Государственным банком развития Китая (ГБРК) по предоставлению кредита и финансированию инвестиционных проектов [2].

– **III этап «Углубление отношений и экономическое взаимодействие», 2010–2014 гг.** На данном этапе отношения между странами становятся более тесными, особенно после запуска Китаем в конце 2013 года проекта нового «Шелкового пути» – китайской программы «Один пояс – один путь». Для этого периода характерны создание совместных предприятий и реализация совместных инвестиционных проектов, наиболее крупными из которых являются СЗАО «БЕЛДЖИ» и Индустриальный парк «Великий камень», а также предоставление китайскими банками связанных кредитов под инвестиционные проекты с участием Китая.

– **IV этап «Экономическое партнерство», 2015 – настоящее время.** На этом этапе отношения выходят на самый высокий уровень после состоявшегося с 28 сентября по 30 сентября 2016 года государственного визита Президента Республики Беларусь А. Г. Лукашенко в Китайскую Народную Республику, в ходе которого была подписана совместная декларация об установлении отношений доверительного всестороннего стратегического партнерства и взаимовыгодного сотрудничества. Также были подписаны соглашения и меморандумы о развитии сотрудничества в различных областях, в том числе в сферах промышленности и инвестиций, финансов, торговли, образования и науки, туризма [3]. Правительством Республики Беларусь был принят ряд концепций развития белорусско-китайских отношений на ближайшую и среднесрочную перспективу и утверждено большое количество законодательных актов и нормативных документов (одним из наиболее важных из которых является Директива № 5 Президента Республики Беларусь «О развитии двусторонних отношений РБ с КНР» от 31 августа 2015 г. [4]). Отношения с китайскими партнерами рассматриваются как приоритетные, производится реализация совместных проектов и привлечение кредитных ресурсов китайских банков. Так, в 2015 г. Государственным банком развития Китая была открыта кредитная линия на сумму 7 млрд. долл. США под гарантии Совета Министров Республики Беларусь. Также этот период отмечается ростом прямых иностранных инвестиций Китая во внутреннюю экономику Республики Беларусь.

В качестве примера успешного сотрудничества Республики Беларусь и Китая можно привести Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень» (Great Stone), расположенный в Смолевичском районе Минской области на площади восемь квадратных километров и имеющий особый правовой режим для обеспечения комфортных условий ведения бизнеса.

Приоритетными направлениями индустриального парка являются новые материалы, фармацевтика, хранение и обработка больших объемов данных, НИОКР, логистика, электроника, биотехнологии, электроника и телекоммуникации, электронная коммерция, производство, социально-культурная деятельность, тонкая химия и машиностроение. Стартовая сумма капиталовложений оценивается в 5–6 млрд долл. США. На территории парка планируется построить современный международный экогород с акцентом на высокотехнологичные и конкурентоспособные инновационные производства с высоким экспортным потенциалом [5].

Индустриальный парк «Великий камень» нацелен на привлечение иностранных инвестиций путем предоставления налоговых и иных льгот, либерализации валютного и таможенного контроля, апробирование новых способов государственного регулирования международной торговли, финансового сектора, корпоративного менеджмента, государственно-частного партнерства, управления структурными образованиями с особым режимом хозяйствования, городского планирования и так далее.

По состоянию на январь 2021 года парк насчитывал 52 компаний-резидента со среднесписочной численностью работников 1115 человек [6]. Среди резидентов парка можно отметить такие крупные компании, как ООО «БЕЛ ХУАВЭЙ ТЕХНОЛОДЖИС», ООО «Завод телекоммуникационного оборудования ZTE», производителя сельскохозяйственной техники Zoomlion, ООО «Чэнду Синьдзу Шелковый Путь Развитие», СЗАО «Авиационные технологии и комплексы», НТОО «Спутниковая связь Евразии» [5].

Парк, таким образом, должен стать экспериментальной площадкой накопления опыта международного сотрудничества, организации суперсовременного производства и подготовки национальных кадров.

Также в качестве успешного политического и экономического взаимодействия следует отметить участие Республики Беларусь в инициативе Председателя КНР Си Цзиньпина о возрождении Великого шелкового пути и концепцию «Один пояс и один путь», которое предоставляет множество возможностей, например, таких как развитие транспортно-логистической и производственной инфраструктуры Республики Беларусь.

Экономический пояс Шелкового пути (ЭПШП) – это актуальный долгосрочный геополитический проект, который обусловлен необходимостью расширения торгово-экономических связей, поиском новых рынков сбыта, а также с целью привлечения инвестиций.

Инициатива ЭПШП ориентируется на многостороннюю торговлю и практическое сотрудничество [7].

Статус «страны, расположенной вдоль Шелкового пути» позволяет Республике Беларусь развить логистический потенциал и получить доступ к ресурсам Фонда Шелкового пути, в который Китай внес 40 млрд долл. США.

Дополнительно Китай предлагает странам-участницам строительства «Одного пояса и одного пути» сотрудничество в областях сельского, лесного и рыбного хозяйств, животноводства, сельхозтехники, производства и переработки сельскохозяйственной продукции, а также заявляет о готовности активно содействовать сотрудничеству в сферах гидроэнергетики, атомной энергии, ветроэнергетики, солнечной энергии и других видов экологически чистой и возобновляемой энергии. Все эти направления, безусловно, интересны и актуальны для Республики Беларусь, которая заинтересована в китайских инвестициях, а также в развитии транспортно-логистической системы и инфраструктуры в целом.

Кроме того, Китай является для Республики Беларусь крупным источником кредитных ресурсов, которые привлекаются в первую очередь для модернизации предприятий и реализации инфраструктурных проектов, а также для запуска новых промышленных проектов с китайским участием. Например, под гарантии белорусского правительства Государственным банком развития Китая, АСБ «Беларусбанк» и Банком развития Беларуси были подписаны две 15-летние кредитные линии для реализации проектов в транспортной сфере, энергетике, промышленности, инфраструктуре, а также секторе малого и среднего бизнеса Беларуси на общую сумму 1 млрд долл. США.

Также подписан пакет кредитных соглашений между Белорусской железной дорогой и Эксимбанком Китая для финансирования обновления подвижного состава БЖД (приобретение 18 электровазозов) и электрификации участка железной дороги Молодечно – Гудогай. Общая сумма кредитов на эти проекты составляет 175 млн долл. США.

В рамках реализации концепции «Экономический пояс Шелкового пути» было заключено рамочное соглашение о содействии долгосрочному всестороннему сотрудничеству в развитии инфраструктуры белорусской железной дороги с привлечением кредитов Экспортно-импортного банка Китая на сумму до 500 млн долл. США.

С помощью так называемых «связанных кредитов» Китай вкладывает средства не столько в белорусскую экономику, сколько в экспорт собственных товаров и оборудования. Общая доля китайского оборудования, работ, услуг по договору кредитования должна составлять не менее 50 % от общей стоимости каждого согласованного индивидуального проекта. С другой стороны, сами по себе условия кредитам являются достаточно выгодными [2].

За последние 6 лет с 2015 по 2020 годы Республика Беларусь привлекла кредиты банков Китая, учитываемые в статистике внешнего государственного долга, в объеме 2555,1 млн долл. США, что составляет 17,3 % привлеченных внешних займов [8].

В качестве положительной тенденции последних двух лет можно отметить привлечение китайских ресурсов в виде несвязанных кредитов. Так, в апреле 2019 года было подписано соглашение о предоставлении Банком развития Китая «Беларусбанк» финансовых ресурсов на сумму 100 млн евро для развития национальной экономики. В декабре 2019 года между Министерством финансов Республики Беларусь и Шанхайским филиалом Банка развития Китая было подписано соглашение о предоставлении срочного кредита на сумму 3,5 млрд китайских юаней (эквивалент около 500 млн долл. США). Кроме того, Беларусь является получателем технико-экономической помощи со стороны Китая в объеме 130 млн долл. США ежегодно [9].

Дополнительным источником инвестиционных вложений Китая в производство товаров и услуг в Республике Беларусь являются прямые иностранные инвестиции (ПИИ). Если в 2010–2013 гг. доля китайских инвестиций в общем объеме поступивших прямых иностранных инвестиций во внутреннюю экономику Республики Беларусь составляла менее 1,0 %, то, начиная с 2014 года, наметился рост и к 2020 году доля ПИИ Китая выросла до 3,1 %.

В Республике Беларусь в 2010–2019 годах наблюдался рост количества компаний с участием китайского капитала. Однако их присутствие в белорусской экономике значительно ниже, чем компаний

с инвестициями из России, Литвы, Кипра, Латвии, Польши, Германии, Украины.

17 января 2019 года Республика Беларусь стала 70-м членом Азиатского банка инфраструктурных инвестиций, что открывает дополнительные возможности для финансирования инфраструктурных проектов в рамках инициативы «Один пояс – один путь» (модернизация транспортных коридоров, энергетической и городской инфраструктуры и т. п.).

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что интеграционные процессы между Китаем и Республикой Беларусь развиваются и поддерживаются как на уровне межгосударственных связей, так и на уровне частного бизнеса.

Внешняя торговля Республики Беларусь и Китая

Китай входит в десятку крупнейших торговых партнеров Республики Беларусь. По размеру товарооборота Китай занимает 3 место среди важнейших торговых партнеров нашей страны. Десятка основных торговых партнеров, а также показатели внешней торговли и внешнеторгового сальдо по состоянию на 2020 год представлены в таблице 1 [10].

Таблица 1 – Топ 10 торговых партнеров Республики Беларусь за 2020 год, млн долл. США

| Место | Страна | Импорт | Экспорт | Товарооборот | Сальдо |
|-------|----------------------|---------|---------|--------------|---------|
| 1 | Российская Федерация | 16387,2 | 13132,2 | 29519,4 | -3255,0 |
| 2 | Украина | 1397,2 | 3149,2 | 4546,4 | 1752,0 |
| 3 | Китай | 3751,0 | 749,3 | 4500,3 | -3001,7 |
| 4 | Германия | 1685,3 | 937,8 | 2623,1 | -747,5 |
| 5 | Польша | 1239,4 | 1250,1 | 2489,5 | 10,7 |
| 6 | Литва | 339,9 | 1037,5 | 1377,4 | 697,6 |
| 7 | Нидерланды | 388,4 | 685,9 | 1074,3 | 297,5 |
| 8 | Великобритания | 202,2 | 814 | 1016,2 | 611,8 |
| 9 | Казахстан | 100,8 | 747,1 | 847,9 | 646,3 |
| 10 | Италия | 687,3 | 90,5 | 777,8 | -596,8 |

Как видно из таблицы 1, на первом месте по объему товарооборота с Республикой Беларусь находится Россия. Китай занимает 3-е место после Украины, что подтверждает значимость торгово-экономического партнерства Беларуси и Китая. Товарооборот между Республикой Беларусь и Китаем за последние 10 лет представлен в таблице 2 [10].

Таблица 2 – Товарооборот Республики Беларусь и Китая в период 2011–2020 гг., млн долл. США

| Год | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Товарооборот | 2 830,4 | 2 806,0 | 3 290,0 | 3 013,5 | 3 182,2 | 2 585,6 | 3 106,8 | 3 640,0 | 4 480,9 | 4 500,3 |

Как видно из таблицы 2 объем товарооборота за последние 10 лет вырос в 1,5 раза и имеет тенденцию роста. За весь период сотрудничества в период с 1992 по 2020 год объем торговли вырос более чем в 100 раз – с 34 млн до 4,5 млрд долл. США в 2020 году.

Безусловно, присутствуют и негативные моменты сотрудничества, которые связаны с отрицательным сальдо внешнеторгового баланса и предоставлением связанных кредитов. Так, за 2020 год товарооборот Республики Беларусь и Китая составил 4 500,3 миллиона долл. США при отрицательном сальдо 3 001,7 млн долл. США. При этом следует отметить тенденцию роста как товарооборота между странами (таблица 2), так и рост белорусского экспорта в 2019 и в 2020 гг., в основном за счет калийных удобрений, белорусской сельхозпродукции и пищевой продукции.

Отрицательное сальдо внешнеторгового баланса в 2020 году отмечался с Россией, Китаем, Германией и Италией, причем значительный отрыв по отрицательному сальдо с близкими значениями показывали Россия и Китай (3255,0 и 3001,7 млн долл. США соответственно). При этом следует учитывать, что товарооборот Республики Беларусь и России в 6,5 раз больше, чем с Китаем, а объем экспорта в Россию в 17 раз больше, чем в Китай.

В структуре внешней торговли Республики Беларусь и Китая импорт значительно превышает экспорт (16,7 % и 83,3 % товарооборота между странами в 2020 году соответственно). Таким образом происходит накопление значительных убытков внешнеторговых

операций с Китаем. Данные по импорту и экспорту за период 2011–2020 гг. представлены в таблице 3 [10].

Таблица 3 – Объем экспорта и импорта между Республикой Беларусь и Китаем, млн долл. США

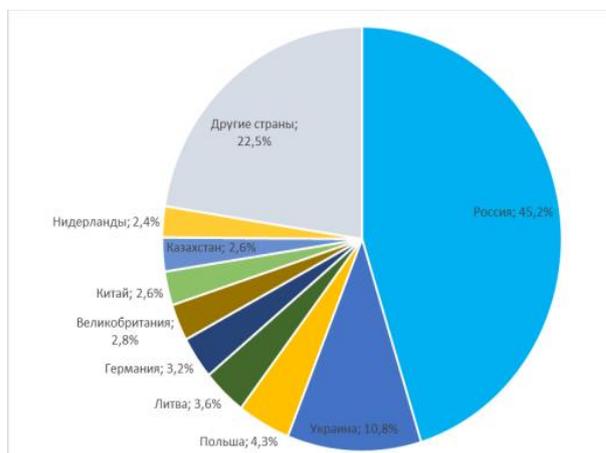
| Год | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Экспорт | 636,6 | 432,6 | 460,7 | 640,3 | 781,0 | 472,7 | 361,5 | 481,9 | 673,3 | 749,3 |
| Импорт | 2 193,8 | 2 373,5 | 2 829,4 | 2 373,2 | 2 401,2 | 2 112,9 | 2 745,3 | 3 158,2 | 3 807,6 | 3 750,9 |

Как видно из таблицы 3, динамика роста импорта значительно превышает динамику роста экспорта, что за последние 10 лет привело к росту торгового сальдо с 1557,3 млн долл. США в 2011 до 3001,7 млн долл. США в 2020 году в пользу Китая. При этом стоимость экспорта достаточно стабильна и находится в пределах среднего значения 569 млн долл. США со значением коэффициента вариации 24 %. В то же время стоимость импорта выросла за это время в 1,7 раз.

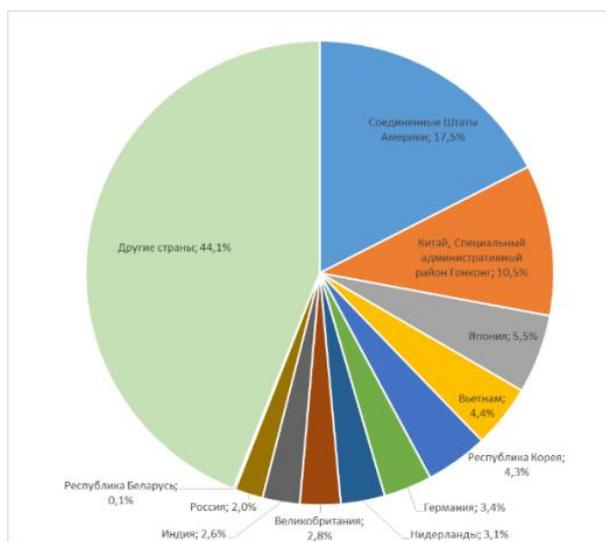
С целью анализа причин и факторов данного дисбаланса проведем анализ структуры экспорта и импорта Республики Беларусь и Китая.

Республика Беларусь экспортирует товары в 85 стран мира и занимает 63 место в рейтинге мирового экспорта, все продукты экспорта страны составляют 0,1 % мирового экспорта. Китай экспортирует товары в более 180 стран мира и занимает 1 место в мировом рейтинге с долей 15 % мирового экспорта.

На рисунке 1 показано распределение экспорта Республики Беларусь и Китая по странам.



а) экспорт Республики Беларусь [10]



б) экспорт Китая [11]

Рисунок 1 – Распределение экспорта товаров по странам в 2020 году, %

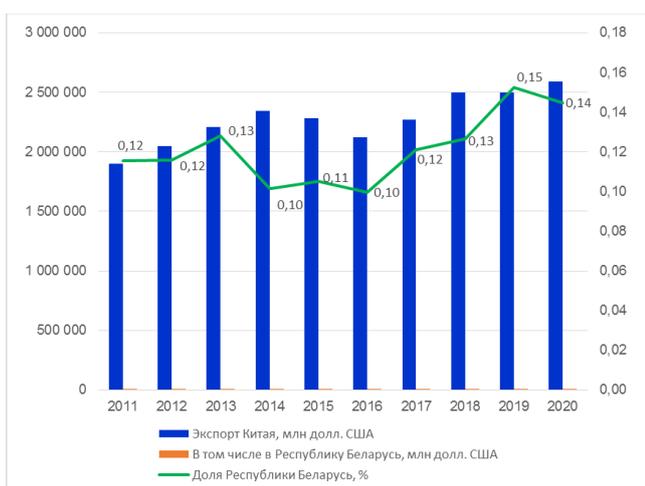
Как видно из рисунка 1, в экспорте Китая весомую долю занимают США (17,5 %) и Гонконг (10,5 %), экспорт диверсифицирован по странам. Республика Беларусь с долей 0,1 % не является значимым торговым партнером для Китая. В то же время экспорт Республики Беларусь ориентирован в первую очередь на Россию (45,2 % совокупной стоимости экспорта) и 10 основных стран-партнеров с долей от 2 до 10 % каждая, среди которых Китай находится на 7 месте по объему экспорта (2,58 %), а стоимость экспорта товаров в Китай находится на уровне таких стран, как Великобритания, Казахстан, Нидерланды.

При рассмотрении изменения доли экспорта в Китай в общей стоимости экспорта Республики Беларусь в период 2011–2020 г. (рисунок 2а) наблюдается рост доли Китая, начиная с 2015 года, что связано с уменьшением совокупной стоимости экспорта Республики Беларусь после 2012 года, в том числе в Россию, вследствие снижения средних цен на нефтепродукты и сокращения физических объемов поставок. Так, по данным 2020 года стоимость экспорта в Китай составила 749,3 млн долл. США, что приближено к максимальному значению 781 млн долл. США в 2015 г.

В экспорте Китая (рисунок 2б) доля Республики Беларусь стабильна и находится в пределах 0,1–0,15 % на протяжении последних 10 лет вне зависимости от изменений общего экспорта Китая. Из данных по распределению экспорта двух стран следует, что китайский рынок является значимым для Республики Беларусь, и, напротив, рынок Республики Беларусь с долей 0,1 % не вносит существенного вклада в стоимость экспорта Китая.



а) экспорт Республики Беларусь [10]



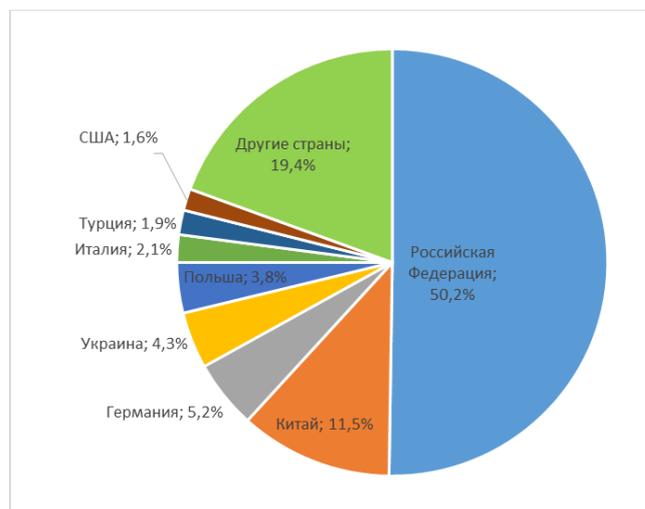
б) экспорт Китая [11]

Рисунок 2 – Экспорт Республики Беларусь и экспорт Китая в период 2011–2020 гг., млн долл. США

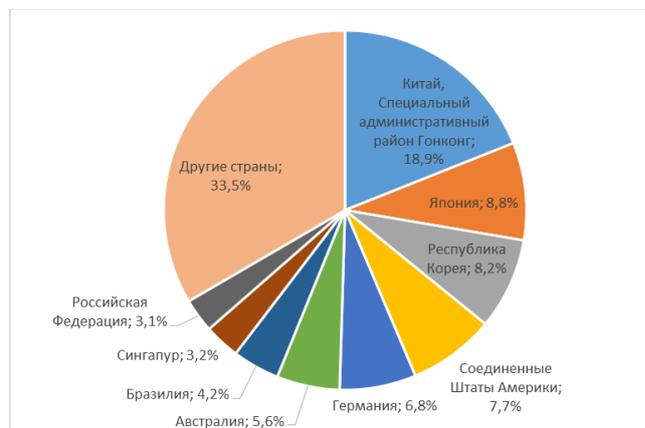
Таким образом, экспорт товаров в Китай характеризуется ростом и вносит весомый вклад в совокупную стоимость экспорта Республики Беларусь. Исходя из этого, можно сделать вывод, что для Республики Беларусь отношения с Китаем представляют интерес как в политической, так и в торгово-экономической сферах, для Китая – преимущественно в геополитической.

Что касается импорта, Республика Беларусь находится на 63 месте в мировом рейтинге импортеров и имеет долю 0,2 % мирового импорта. Все продукты импорта Китая составляют 11,7 % мирового импорта, а страна занимает 2 место среди мировых импортеров.

Импорт Республики Беларусь слабо диверсифицирован и зависит от импорта товаров из России (50,2 % общей стоимости импорта), также значительную долю 11,5 % занимает импорт из Китая (рисунок 3а), в общей сумме 62,7 % импорта производится из двух стран. В то же время 66,5 % импорта Китая составляет импорт из 9 стран, среди которых Гонконг, Япония, США, Германия, Россия (рисунок 3б).



а) импорт Республики Беларусь [10]



б) импорт Китая [11]

Рисунок 3 – Распределение импорта товаров по странам в 2020 году, %

Импорт Китая из Беларуси в 2020 году составлял 0,04 % общей стоимости импорта. Следовательно, Китай может без последствий для экономики отказаться от импорта товаров из Беларуси, за исключением калийных удобрений, и в короткие сроки перестроить свои логистические цепи поставок. И напротив, для Беларуси представляется сложным и экономически затратным смена торгового партнера, в особенности для товаров высокого передела и высокотехнологичных товаров, а также технологий, вследствие более высокой стоимости импорта из других стран, а также в условиях нарастающего санкционного давления со стороны ЕС и США.

На рисунке 4а представлены данные по совокупному импорту в Республику Беларусь и показана доля Китая в общем объеме импорта.

Как видно из рисунка 4а, при колеблющихся и имеющих общую тенденцию к снижению показателях импорта доля импорта из Китая показывает стабильный рост с 4,8 % в 2011 году до 11,5 % в 2020 году.



а) Импорт Республики Беларусь и доля Китая в общей стоимости импорта [10]



б) Импорт Китая и доля Республики Беларусь в общей стоимости импорта [11]

Рисунок 4 – Изменение показателей импорта Беларуси и Китая в период 2011–2020 гг., млн долл. США

Стоимость импорта Китая за последние 10 лет выросла на 17 % с 1 743 394,9 млн долл. США до 2 055 590,6 млн долл. США, что превышает более чем в 60 раз стоимость импорта. При этом доля Республики Беларусь в общей стоимости импорта Китая колеблется в низких значениях 0,02–0,04 % и незначительна для Китая.

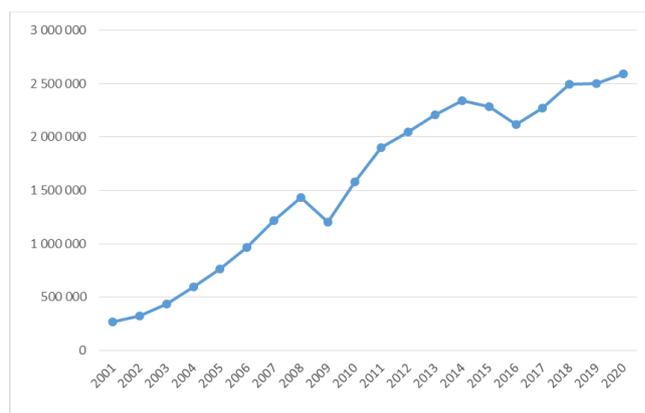
Исторический анализ показывает, что рост импорта из Китая во многом связан со значимыми политическими событиями в двусторонних отношениях, с заключением инвестиционных договоров и развитием совместных проектов, а также открытием кредитных линий китайскими банками. Так, после визита в 2005 г. Президента Республики Беларусь А. Г. Лукашенко в Китай была расширена номенклатура экспортных поставок и открыт доступ на белорусский рынок многим китайским товарам. Также заключенные соглашения по модернизации Минской ТЭЦ-2, цементных заводов повлекли за собой рост импорта товаров раздела «Машины, оборудование и механизмы».

Значительный рост импорта из Китая после 2010 года связан с заключением первых кредитных соглашений и открытием кредитных линий, являющихся связанными и обязывающими закупать китайские товары на сумму не менее 50 % от общей суммы предоставляемого кредита. Также на рост импорта повлияла реализация совместных инвестиционных проектов, одним из крупнейших среди которых является проект «Великий камень», предполагающих импорт китайских технологий, оборудования и услуг.

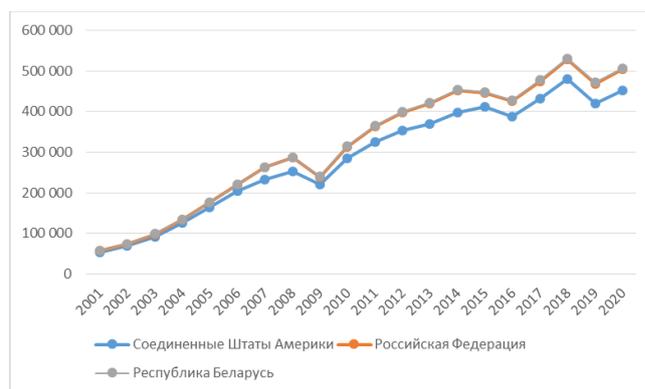
При этом следует отметить, что рост импорта из Китая характерен для всего мира (рисунок 5а).

Импорт Республики Беларусь из Китая полностью подчиняется общемировому тренду и соответствует тенденциям таких стран, как Россия и США (рисунок 5б).

Это говорит о том, что рост импорта китайских товаров в Республику Беларусь соответствует общемировым тенденциям вследствие экономической экспансии Китая, характерной для последних 20 лет после присоединения Китая к ВТО.



а) мировой импорт из Китая



б) тренды импорта США, РФ и Республики Беларусь из Китая

Рисунок 5 – Изменение мирового импорта из Китая в период 2001–2020 гг., млн долл. США

Белорусско-китайские отношения имеют большое значение для обеих сторон. Перспективой сотрудничества является дальнейшее углубление экономических взаимоотношений, реализуемое в следующих направлениях:

- привлечение прямых китайских инвестиций;
- реализация совместных инвестиционных проектов в различных сферах;
- таможенное регулирование;
- налоговое и законодательное регулирование;
- создание совместных предприятий;
- создание многосторонних инновационных площадок и бизнес-инкубаторов;
- трансфер технологий, а также импорт товаров высокого передела и высокотехнологичных товаров, что особенно важно в условиях нарастающего санкционного давления со стороны ЕС и США;
- увеличение экспорта белорусских товаров в Китай. По наметившейся тенденции ожидается рост поставок белорусской сельхозпродукции и древесины. Так, начиная с 2017 года произошло значительное наращивание экспорта мясомолочной продукции (в 460 раз с 443,4 тыс. дол. США в 2011 году до 204 133,5 тыс. дол. США в 2020 г.) и древесины (в 24 раза). Наиболее перспективными продуктами белорусского экспорта в Китай являются калийные удобрения, мясо и пищевые мясные субпродукты, молочная продукция и яйца птиц, пищевые продукты животного происхождения, а также масса из древесины или других материалов, пластмассы и изделия из них, древесина и изделия из нее. На рисунке 6 представлен экспортный потенциал Республики Беларусь в Китае по основным продуктам.

Как видно из рисунка 6, экспортный потенциал по калийным удобрениям реализован на 68 %, по маслу рапсовому – на 24 %, лесоматериалам – на 10 %, мясо-молочной продукции – 20 %. С учетом размеров китайского рынка Республика Беларусь имеет значительные возможности роста стоимости экспорта конкурентоспособных товаров.

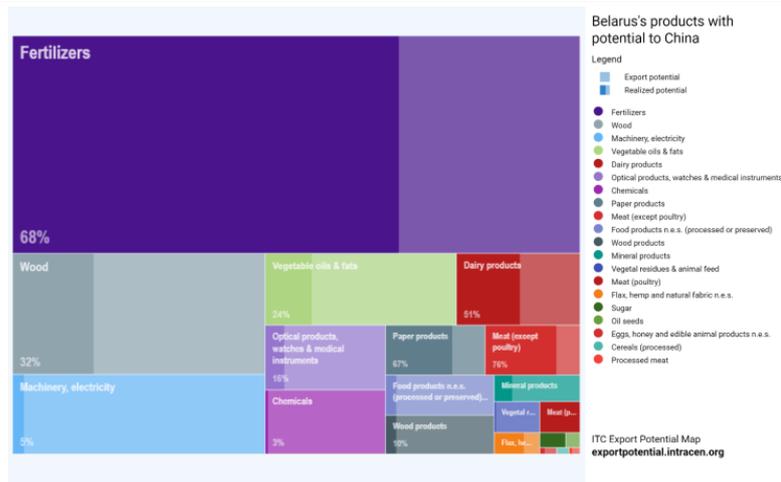


Рисунок 6 – Экспортный потенциал Республики Беларусь в Китае [11]

Заключение

Таким образом, основной целью сотрудничества между Республикой Беларусь и Китаем является получение странами экономических преимуществ и выгод. Реализация данной цели заключается в выборе направлений экономического сотрудничества, в которых возможно получение экономического эффекта за счет использования интеграционного потенциала и конкурентных преимуществ двух стран.

Возможности Республики Беларусь во внешнеэкономическом сотрудничестве с Китаем определяются следующими направлениями:

- наличие в Китае инновационных технологий и ресурсов для инвестирования в Республику Беларусь вследствие потребности Китая выводить излишки финансовых ресурсов из национальной экономики;
- включение Республики Беларусь через китайские инвестиции в глобальные цепи создания добавленной стоимости и дальнейшего проникновения в европейский регион;
- использование транзитного потенциала Республики Беларусь;
- близость основных принципов государственного строительства, принципиальное совпадение политики, стратегии и тактики в экономической сфере, а также методологии, приемов, средств и форм государственного влияния;
- трансфер передовых технологий.

Список цитированных источников

1. Белорусско-Китайский межправительственный комитет по сотрудничеству [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.belaruschina.by/ru/belarus_china/legal. – Дата доступа: 20.11.2021.
2. Грузинская, Е. Кредитно-инвестиционное сотрудничество Республики Беларусь и Китайской Народной Республики / Е. Грузинская // Банкаускі Веснік. – 2019. – № 2. – С. 67–72.
3. Государственный визит Президента Республики Беларусь Александра Лукашенко в Китайскую Народную Республику. Генеральное консульство РБ в Шанхае. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://shanghai.mfa.gov.by/ru/o_generalnom_consulstv/news/c04a1a03f2fa52ba.html. – Дата доступа: 18.10.2021.
4. О развитии двусторонних отношений Республики Беларусь с Китайской Народной Республикой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P01500005>. – Дата доступа: 06.11.2021.
5. Индустриальный парк «Великий камень». Общая информация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://industrialpark.by/o-parke/obshhaya-informaciya>. – Дата доступа: 24.10.2021.
6. Основные показатели деятельности резидентов Китайско-Белорусского индустриального парка «Великий камень» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/statistika-malykh-territory/osobyje-ekonomicheskie-zony/godovye-dannye/osnovnye-pokazateli-deyatelnosti-rezidentov-kitajsko-belorusskogo-industrialnogo-parka>. – Дата доступа: 28.11.2021.
7. Пояс и путь: возможности для Беларуси: материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 24 февраля 2017 г. / под ред. проф. А. А. Тозика. – Минск: РИВШ, 2017. – 186 с.
8. Внешний долг Беларуси. Министерство финансов Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://myfin.by/wiki/term/vneshnij-dolg-v-belarusi>. – Дата доступа: 20.11.2021.

<https://myfin.by/wiki/term/vneshnij-dolg-v-belarusi>. – Дата доступа: 20.11.2021.

9. Царик, Ю. Центр стратегических и внешнеполитических исследований [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://forstrategy.org/ru/posts/20201215>. – Дата доступа: 20.11.2021.
10. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by>. – Дата доступа: 02.11.2021.
11. Trade statistics for international business development [Electronic resource]. – Date of access: <https://www.trademap.org/Index.aspx>. – Дата доступа: 12.11.2021.

References

1. Belorussko-Kitajskij mezhpriatel'stvennyj komitet po sotrudnichestvu [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.belaruschina.by/ru/belarus_china/legal. – Data dostupa: 20.11.2021.
2. Gruzinskaya, E. Kreditno-investicionnoe sotrudnichestvo Respubliki Belarus' i Kitajskoj Narodnoj Respubliki / E. Gruzinskaya // Bankauski Vesnik. – 2019. – № 2. – S. 67–72.
3. Gosudarstvennyj vizit Prezidenta Respubliki Belarus' Aleksandra Lukashenko v Kitajskuyu Narodnuyu Respubliku. General'noe konsul'stvo RB v SHanhae. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://shanghai.mfa.gov.by/ru/o_generalnom_consulstv/news/c04a1a03f2fa52ba.html. – Data dostupa: 18.10.2021.
4. O razvitii dvustoronnih otnoshenij Respubliki Belarus' s Kitajskoj Narodnoj Respublikoj [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P01500005>. – Data dostupa: 06.11.2021.
5. Industrial'nyj park «Velikij kamen'». Obshchaya informaciya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://industrialpark.by/o-parke/obshhaya-informaciya>. – Data dostupa: 24.10.2021.
6. Osnovnye pokazateli deyatelnosti rezidentov Kitajsko-Belorusskogo industrial'nogo parka «Velikij kamen'» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/statistika-malykh-territory/osobyje-ekonomicheskie-zony/godovye-dannye/osnovnye-pokazateli-deyatelnosti-rezidentov-kitajsko-belorusskogo-industrialnogo-parka>. – Data dostupa: 28.11.2021.
7. Poyas i put': vozmozhnosti dlya Belarusi: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Minsk, 24 fevralya 2017 g. / pod red. prof. A. A. Tozika. – Minsk: RIVSH, 2017. – 186 s.
8. Vneshnij dolg Belarusi. Ministerstvo finansov Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://myfin.by/wiki/term/vneshnij-dolg-v-belarusi>. – Data dostupa: 20.11.2021.
9. Carik, Yu. Centr strategicheskij i vneshnepoliticheskij issledovanij [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://forstrategy.org/ru/posts/20201215>. – Data dostupa: 20.11.2021.
10. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.belstat.gov.by>. – Data dostupa: 02.11.2021.
11. Trade statistics for international business development [Electronic resource]. – Date of access: <https://www.trademap.org/Index.aspx>. – Data dostupa: 12.11.2021.

Материал поступил в редакцию 10.02.2022

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ И ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЛАСТНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В. В. Панасюк

Соискатель кафедры экономики организации Академии управления при Президенте Республики Беларусь, заместитель председателя Постоянной комиссии Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь по промышленности, топливно-энергетическому комплексу, транспорту и связи, г. Минск, Беларусь, e-mail: panasiukvasili@yandex.ru

Реферат

Энергетика является базовой отраслью и прямо влияет на деятельность всех секторов экономики. От слаженной работы всех структурных подразделений, входящих в энергосистему страны, зависит устойчивое социально-экономическое развитие и энергетическая безопасность как регионов, так и государства в целом. Особенность белорусской энергосистемы заключается в ее целостности, которая проявляется в общности целей и задач по надежному и бесперебойному снабжению качественной и экологически безопасной энергией потребителей. В статье проанализированы общие признаки организационно-правовой формы функционирования и основные цели деятельности областных энергосистем с учетом специфических особенностей электроэнергетической отрасли, отличающих ее от других отраслей экономики, а также определены важнейшие задачи на перспективу.

Ключевые слова: энергия, энергетическая безопасность, электроэнергетическая отрасль, функционирование, областные энергосистемы.

CONCEPTUAL FOUNDATIONS AND FEATURES OF THE FUNCTIONING OF REGIONAL ENERGY SYSTEMS

V. V. Panasiuk

Abstract

Energy is the basic industry and directly affects the activities of all sectors of the economy. Sustainable socio-economic development and energy security of both the regions and the state as a whole depend on the coordinated work of all structural units that are part of the country's energy system. The peculiarity of the Belarusian energy system lies in its integrity, which is manifested in the common goals and objectives for reliable and uninterrupted supply of high-quality and environmentally friendly energy to consumers. The article analyzes the general features of the organizational and legal form of functioning and the main goals of the regional energy systems, taking into account the specific features of the electric power industry, which distinguish it from other sectors of the economy, and also identifies the most important tasks for the future.

Keywords: energy, energy security, electric power industry, functioning, regional power systems.

Введение

Энергетика относится к основным отраслям национальной экономики Республики Беларусь и ее развитие определяется рядом концепций, стратегий и государственных программ, обеспечивающих достижение основных показателей общественного производства и повышения уровня жизни граждан [1]. От надежного и эффективного функционирования, степени развития всех субъектов хозяйствования, входящих в энергетическую систему страны, зависит устойчивое социально-экономическое развитие и энергетическая безопасность как регионов, так и государства в целом.

Энергетическая система Беларуси представляет собой динамично развивающийся высокотехнологичный комплекс, включающий электрические станции, котельные установки, электрические и тепловые сети, которые связаны общим режимом их работы на территории всей страны.

Основная часть

В настоящее время для управления электроэнергетической отраслью страны применяется трехуровневая схема: Министерство энергетики Республики Беларусь (далее Минэнерго РБ) – Государственное производственное объединение «Белэнерго» (далее ГПО «Белэнерго») – Республиканские унитарные предприятия (далее РУП «Облэнерго»). В общем виде компетенции распределены следующим образом: уровень государственного регулирования и проведения государственной политики относится к Минэнерго РБ, уровень технической политики развития объединенной энергосистемы и координация текущей операционной деятельности организаций, входящих в состав – ГПО «Белэнерго», уровень перспективного развития и управление текущей операционной деятельности областной энергосистемы – РУП «Облэнерго».

С учетом вышеизложенного, а также уставов ГПО «Белэнерго» [2], РУП «Облэнерго» [3], организационную структуру управления (далее – ОСУ) ГПО «Белэнерго» можно в общем виде представить следующим образом:

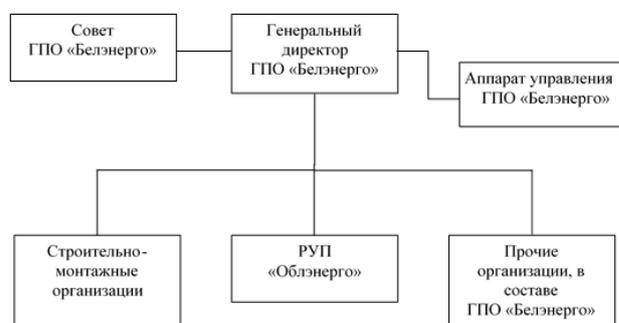


Рисунок 1 – Организационная структура управления ГПО «Белэнерго»

Рассматривая представленную на рисунке 1 ОСУ ГПО «Белэнерго» и согласно уставным документам, Минэнерго РБ осуществляет общее руководство энергетическим комплексом Республики Беларусь [1], а функции управления хозяйственной деятельностью белорусской энергосистемы выполняются ГПО «Белэнерго», которое непосредственно подчинено Министерству энергетики Республики Беларусь [2].

В состав ГПО «Белэнерго» входят: шесть областных предприятий электроэнергетики РУП «Облэнерго»; предприятие диспетчерского управления РУП «ОДУ»; строительно-монтажные, ремонтные, производственные, сервисные и образовательные организации; научно-исследовательские и проектно-исследовательские институты. А также в состав ГПО «Белэнерго» входит государственное предприятие «Белорусская АЭС» (далее БелАЭС) [2]. Анализируя ОСУ ГПО «Белэнерго», следует отметить четкое разделение функций проведения государственной политики и технической политики между Минэнерго РБ и ГПО «Белэнерго», но вместе

с тем, в части взаимодействия с РУП «Облэнерго» порой размыт функционал и многие функции могут дублироваться между отраслевым министерством, ГПО «Белэнерго» и областными энергосистемами.

Областные энергосистемы РУП «Облэнерго» созданы по территориальному принципу согласно административно-территориальному устройству страны и в едином технологическом процессе осуществляют комплексную деятельность, включая производство, передачу, распределение и сбыт электрической и тепловой энергии. Они являются вертикально интегрированными компаниями, включающими электростанции, электрические и тепловые сети.

К общим признакам организационно-правовой формы функционирования областных энергосистем можно отнести то, что они осуществляют свою деятельность в статусе юридических лиц; являются коммерческими организациями с самостоятельным финансовым балансом; владеют, пользуются и распоряжаются на праве хозяйственного ведения имуществом, которое находится в собственности Республики Беларусь. Имущество региональных энергосистем не входит в состав имущества ГПО «Белэнерго».

К обобщенным характеристикам РУП «Облэнерго» на микроуровне следует отнести то, что в своем составе они имеют обособленные структурные подразделения (филиалы), которые не являются юридическими лицами и наделены имуществом со стороны вышестоящей организации, но вместе с тем, во многих случаях представляют собой крупнейшие энергетические комплексы белорусской энергосистемы.

Согласно утвержденных Минэнерго РБ Уставов региональных энергосистем, на примере Минского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Минскэнерго» (далее РУП «Минскэнерго»), областные энергосистемы к основным целям своей деятельности относят надежное, качественное, безопасное, экономически эффективное функционирование и инновационное развитие производства, передачи, распределения и продажи электрической и тепловой энергии потребителям. А как коммерческие организации они стремятся получить максимальную прибыль от основных видов экономической деятельности [3].

Во исполнение основных целей своей деятельности РУП «Облэнерго» осуществляют следующие функции:

- производство, передача и распределение электрической и тепловой энергии;
- внедрение энергосберегающих и новых технологий;
- рациональное использование топливно-энергетических ресурсов и местных видов топлива;
- планирование и проведение технического обслуживания, материальное и техническое снабжение и топливообеспечение объектов электроэнергетики (электрических станций, котельных, электрических и тепловых сетей, энергетического и технологического оборудования) энергосистемы;
- обеспечение готовности объектов электроэнергетики к осенне-зимнему периоду;
- проведение анализа структуры потребления электрической и тепловой энергии, включая составление и анализ балансов электрической и тепловой энергии; разработку перспективных и годовых балансов энергии и их выполнение;
- содержание зданий, сооружений, оборудования при производстве, передаче, распределении и продаже электрической и тепловой энергии в соответствии с установленными требованиями;
- разработка и реализация комплекса мер по обеспечению здоровых и безопасных условий труда, соблюдение законодательства об охране труда, принятие необходимых мер по профилактике производственного травматизма и профессиональных заболеваний работников организаций, по пожарной безопасности и охране окружающей среды;
- развитие, внедрение современных интегрированных информационных систем и технологий (в том числе электронных услуг), автоматизации распределительных электрических сетей;
- покупка и продажа электрической и тепловой энергии, производимой на территории Республики Беларусь.

Также основными признаками деятельности РУП «Облэнерго» является то, что реализация основных целей и функционирование областных энергосистем осуществляется с учетом специфических особенностей электроэнергетической отрасли, характеризующих ее отличие от других отраслей экономики. К таковым можно отнести:

- ✓ невозможность работы «на склад готовой продукции» – запасов энергии, с учетом соблюдения постоянного баланса производства и потребления;
- ✓ прямая зависимость объемов производства от запросов потребителей и погодных условий, а не желания энергетиков;
- ✓ объективная необходимость планирования производства энергии с учетом утренних и вечерних часовых максимумов нагрузок и прогноза погодных условий, а не только в месячно-квартальном и годовом периоде, как это делается в других отраслях экономики;
- ✓ надежное, бесперебойное и безопасное снабжение энергией всех потребителей как обязательное условие стабильной работы всех отраслей экономики страны и повышения уровня жизни граждан.

Несмотря на довольно специфические особенности функционала своей деятельности, по итогам работы ГПО «Белэнерго» за 2020 год на заседании Совета объединения 19 февраля 2021 года генеральным директором ГПО «Белэнерго» Павлом Дроздом было отмечено, что «в ушедшем году выполнена наша основная задача – обеспечено надежное и бесперебойное электро- и теплоснабжение всех потребителей Белорусской энергосистемы. Самым важным событием стало включение 3 ноября первого энергоблока Белорусской АЭС в объединенную энергосистему» [4].

Ввод в коммерческую эксплуатацию двух энергоблоков БелАЭС суммарной установленной мощности 2400 МВт обеспечит около 40 % потребности страны в электрической энергии; снизит долю природного газа в производстве электроэнергии до 65 % против 98 % в 2019 году и объемы потребления природного газа до 4 миллиардов кубических метров с сокращением выбросов парниковых газов в атмосферу более, чем на 7 млн тонн в год; мобилизует областные энергосистемы оптимизировать действующие генерирующие мощности как по строительству пиково-резервных источников и электродкотлов для резервирования мощностей и выравнивания суточного графика нагрузок, а также масштабной реконструкции и строительству электросетевой инфраструктуры для значительного увеличения электропотребления.

Так, согласно статистическим данным энергетического баланса за 2020 год [5], по состоянию на 01.01.2021 г. общая характеристика областных энергосистем представлена в таблице 1.

В целях более полного концептуального представления о работе РУП «Облэнерго» необходимо рассмотреть их региональные особенности.

Одной из крупнейших областных энергосистем Беларуси по суммарной установленной мощности в 3400 МВт, а это более 38 % мощности всех электростанций, входящих в ГПО «Белэнерго», является РУП «Витебскэнерго». В данной энергосистеме передача и распределение электроэнергии осуществляется через линии электропередач (далее – ЛЭП) протяженностью 51 тыс. км, в структуру энергосистемы входит филиал самой крупной электростанции страны с установленной мощностью 2890 МВт – Лукомльская ГРЭС (таблица 1). В 2017 году в Витебской энергосистеме введены самые крупные гидроэлектростанции (далее – ГЭС) страны Полоцкая и Витебская ГЭС с установленной мощностью 21,66 и 40,0 МВт соответственно [6]. Согласно республиканским статистическим данным [5] и информации ГПО «Белэнерго» [2] выработка электроэнергии РУП «Витебскэнерго» по итогам 2020 года достигла более 12 млрд кВт*ч (таблица 2), что составляет более 35 % от выработки электроэнергии всеми электростанциями, входящими в состав ГПО «Белэнерго».

Таблица 1 – Общая характеристика областных энергосистем в 2020 г.

| | | Белэнерго | Брест-энерго | Витебск-энерго | Гомельэнерго | Гродноэнерго | Минскэнерго | Могилевэнерго |
|--|---------|-----------|--------------|----------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Установленная мощность | МВт | 8897 | 1159 | 3400 | 973 | 393 | 2405 | 567 |
| Мощность наиболее крупной электростанции | МВт | 2890 | 1095 | 2890 | 544 | 312 | 1035 | 297 |
| Установленная мощность возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) | МВт | 97,1 | 0,3 | 64,5 | 0 | 28,1 | 2,9 | 4 |
| Протяженность линий электропередачи | тыс. км | 281 | 40 | 51 | 43 | 38 | 69 | 39 |
| Воздушные ЛЭП напряжением 35–750 кВ | тыс. км | 37 | 5 | 5 | 7 | 5 | 9 | 6 |
| Воздушные ЛЭП напряжением 0,4–10 кВ | тыс. км | 202 | 35 | 41 | 37 | 28 | 44 | 17 |
| Протяженность тепловых сетей в однотрубном исчислении | тыс. км | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| Количество трансформаторных подстанций 35–750 кВ | ед. | 1358 | 189 | 216 | 251 | 166 | 312 | 224 |

Таблица 2 – Основные технико-экономические показатели областных энергосистем за 2020 г.

| | | Белэнерго | Брест-энерго | Витебск-энерго | Гомельэнерго | Гродноэнерго | Минскэнерго | Могилевэнерго |
|---|------------|-----------|--------------|----------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Выработка электроэнергии – всего в т. ч. АЭС в т. ч. ТЭС в т. ч. ВИЭ | млн.кВт*ч | 34036,6 | 5561,5 | 12163,8 | 2691,1 | 1863,5 | 9706,6 | 1710,6 |
| | млн.кВт*ч | 338,4 | | | | | | |
| | млн.кВт*ч | 33302,9 | 5560,8 | 11871,9 | 2691,1 | 1774,9 | 9706,4 | 1697,9 |
| | млн.кВт*ч | 394,1 | 0,7 | 291,9 | 0 | 88,6 | 0,2 | 12,7 |
| Конечное потребление первичной электроэнергии (из ТЭБ 2020) | млн.кВт*ч | | 2805 | 3963 | 7765 | 3926 | 11423 | 3326 |
| Отпуск теплоты – всего в т. ч. ТЭС в т. ч. РК | тыс.Гкал | 32000,6 | 2493 | 4996 | 5603 | 2863 | 12186 | 3859 |
| | тыс.Гкал | 28177,3 | 1751 | 4646 | 5345 | 2739 | 9907 | 3789 |
| | тыс.Гкал | 3823,3 | 742 | 350 | 258 | 124 | 2278 | 70 |
| Конечное потребление первичной теплоты (из ТЭБ 2020) | тыс.Гкал | | 5147 | 7606 | 10500 | 6624 | 18696 | 5650 |
| Расход условного топлива – всего | тыс.т у.т. | 12772,3 | 1805,2 | 4020,8 | 1774,9 | 753,2 | 3877,6 | 940,4 |
| Расход условного топлива на отпуск ЭЭ | тыс.т у.т. | 7443 | 1397,6 | 3191,4 | 446,3 | 274,3 | 1856,8 | 276,7 |
| Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии | г/кВт*ч | 238,5 | 262,4 | 280,5 | 188,1 | 167,7 | 206,2 | 185,3 |
| Расход условного топлива на отпуск ТЭ | тыс.т у.т. | 5329,2 | 407,6 | 829,4 | 928,6 | 478,9 | 2020,8 | 663,7 |
| Удельный расход условного топлива на отпуск теплоты | кг/Гкал | 166,9 | 164,13 | 166,19 | 166,02 | 167,86 | 166,29 | 172,15 |

Вместе с тем по технико-экономическим показателям (далее – ТЭП) следует отметить по Витебской энергосистеме довольно высокие удельные расходы топлива на отпуск электроэнергии на уровне 280,5 г/кВт*ч (таблица 2), что обусловлено большой долей собственной выработки электроэнергии на конденсационных энергоблоках и наличием в областной энергосистеме физически и морально устаревшего электрогенерирующего оборудования, установленного на крупных электростанциях. Для положительного влияния по оптимизации затрат на выработку электроэнергии в период до 2025 г. предусмотрен вывод из эксплуатации старых конденсационных энергоблоков на Лукомльской ГРЭС суммарной мощностью 600 Мвт и турбоагрегатов на Новополоцкой ТЭЦ суммарной мощностью 110 Мвт [7]. С учетом ввода БелАЭС в Витебской энергосистеме планируется ввод пиково-резервных энергоисточников на Лукомльской ГРЭС и Новополоцкой ТЭЦ установленной мощностью 150 и 100 Мвт соответственно, а также обновление электросетевого хозяйства по реконструкции ВЛ-330кВ «Лукомльская ГРЭС – Мирадино» и подстанций ПС-330кВ «Орша» и «Полоцк» [7].

В состав РУП «Брестэнерго» входят 7 электростанций с суммарной установленной мощностью 1159 МВт, в том числе вторая в стране по величине установленной мощности в 1095 МВт – Березовская ГРЭС, а также 3 крупных котельных с котлоагрегатами суммарной тепловой мощностью 2493 Гкал/час. На балансе предприятия более 40 тыс. км ЛЭП различного уровня напряжений (таблица 1), в том числе единственная региональная энергосистема в стране с наличием ЛЭП и подстанций с классом напряжения в 220 кВ [8]. Для встраивания БелАЭС в энергосистему страны в регионе устанавливается четыре

электрокотла, три из них уже введены в эксплуатацию, это: «Восточная районная котельная № 2 филиала Брестские тепловые сети», «Южная районная котельная» и «Западная мини-ТЭЦ» в г. Пинске; четвертый будет смонтирован на Березовской ГРЭС – и в итоге суммарная номинальная мощность установленных электрокотлов составит 140 МВт [9]. По ТЭП данной энергосистемы следует отметить относительно высокие удельные расходы топлива на выработку электроэнергии – 262,4 г/кВт*ч и самые низкие удельные расходы топлива на отпуск тепла – 164,13 кг/Гкал (таблица 2). Высокий расход топлива на выработку электроэнергии объясняется работой старых конденсационных энергоблоков на Березовской ГРЭС, которые планируется вывести из эксплуатации к 2025 году суммарной мощностью 430 МВт [7]. Самые низкие удельные расходы топлива по теплу обусловлены преимущественным отпуском тепла от котельных при отсутствии расходов на сетевые насосы теплофикационных комплексов. По развитию электросетевой инфраструктуры в Брестской областной энергосистеме к крупным проектам следует отнести строительство ВЛ-330 кВ «Березовская ГРЭС – Пинск – Микашевичи» протяженностью 177 км и масштабные мероприятия по модернизации сети 220 кВ с выводом из эксплуатации объектов данного класса напряжения [7].

Гомельская областная энергосистема включает в себя 6 электростанций суммарной установленной мощностью 973 МВт, в том числе самую крупную теплоэлектроцентраль (далее – ТЭЦ) в юго-восточном регионе страны – Гомельскую ТЭЦ-2 с установленной мощностью 544 МВт и отпуском более трети тепловой энергии в области (таблица 1). Новое оборудование, установленное на многих

энергоисточниках, и не привлечение мощностей данной энергосистемы в регулировании нагрузок позволяет получать относительно низкие удельные расходы топлива на производство электроэнергии и отпуск тепла на уровне 188,1 г/кВт*ч и 166,02 кг/Гкал соответственно (таблица 2). Протяженность ЛЭП всех классов напряжения составляет более 43 тыс. км (таблица 1), а количество трансформаторных подстанций насчитывает более 11 тыс. штук [10]. По развитию электросетевого хозяйства в данной энергосистеме масштабными являются сооружение ЛЭП-330 кВ «Мозырь –Микашевичи» и реконструкция ОРУ-330 кВ подстанции «Мозырь» с переводом ОРУ-330 кВ на «полупотную» схему с установкой выключателей 330 кВ, установкой автотрансформатора АТ- 3330/110 кВ мощностью 200 МВ*А, реконструкцией ОРУ-110 кВ с заменой выключателей на элегазовые [7]. Заслуживает внимания опыт големских энергетиков по лидерству среди предприятий отрасли ежегодно первыми в стране завершать подготовку к отопительному сезону, выполняя поручения облисполкома, по оформлению паспортов готовности прохождения отопительного сезона – к 1 сентября, а по объектам социальной сферы и жилищного фонда срок сокращен до 15 августа [11].

Республиканским унитарным предприятием «Могилевэнерго» эксплуатируется: 6 ТЭЦ, 3 районных котельных, обеспечивающих теплоснабжение в г. Могилеве, г. Бобруйске, г. Осиповичах и г. Костюковичи, а также три ГЭС [12]. Суммарная установленная электрическая мощность энергоисточников составляет 567 МВт; тепловая мощность – 3815 Гкал/ч. На балансе предприятия более 39 тыс. км электрических сетей различных классов напряжения (таблица 1). По балансу электрической энергии данная энергосистема дефицитна (таблица 2). РУП «Могилевэнерго» по сложившейся структуре генерации обеспечивает своих потребителей электроэнергией не только выработанной на собственных электростанциях, но и значительной части электроэнергией, поступающей из Витебской и Минской энергосистем, в том числе и БелАЭС [13]. Для оптимизации затрат на производство тепловой и электрической энергии в филиале «Могилевская ТЭЦ-2» запланирована установка турбоагрегата P-18/24-2,1/0,25 мощностью 20,2 МВт взамен отработавшей свой ресурс турбины Т-50/60 -130 ст.№3 [7]. По развитию и реконструкции электрической сети продолжается реконструкция подстанции ПС 330 кВ «Могилев» с применением выключателей-разъединителей (ДЦВ) 330 кВ и заменой двух трансформаторов АТ 330/110/10 кВ мощностью по 200 МВ*А с внедрением современных цифровых решений [7]. В 2021 году введен в эксплуатацию объект «Реконструкция ПС Могилев-330», и это первая в стране полностью цифровая трансформаторная подстанция класса напряжения 330 кВ [2].

Производственная характеристика РУП «Гродноэнерго» включает в себя более 38 тыс. км ЛЭП различного уровня напряжения и генерирующие мощности в размере 393 МВт, в том числе крупную тепловую станцию – Гродненскую ТЭЦ-2 установленной мощностью 312 МВт (таблица 1). В состав генерации также входят 8 ГЭС суммарной мощностью 19 МВт и ветроэнергетические установки (далее – ВЭУ), объединенные в «Новогрудскую ВЭС» общей мощностью 9 МВт [14]. Удельные расходы топлива на выработку электроэнергии на данном предприятии составляют 167,7 г/кВт*ч (таблица 2), это самые низкие в энергосистеме и обусловлены: отсутствием крупных конденсационных мощностей; работой без привлечения к регулированию нагрузок – максимально по тепловому графику оборудования ТЭЦ; постоянно проводимыми реконструктивными работами на существующих энергоисточниках с применением современных технологий. Так, в 2013 году на Гродненской ТЭЦ-2 введена газотурбинная установка мощностью 121,7 МВт. На этой же электростанции выполнена масштабная реконструкция турбоагрегата ПТ-60-130/13 с заменой вспомогательного оборудования и генератора, внедрением автоматизированной системы управления, позволившие улучшить экономичность эксплуатации турбины с увеличением мощности с 60 до 70 МВт. Благодаря реализации данного мероприятия выросла годовая выработка электроэнергии на ТЭЦ примерно на 32 млн. кВт*ч и снижен расход топлива [15]. Гродненскую энергосистему можно по праву назвать первопроходцем в стране по использованию ВИЭ. Впервые в Беларуси в 2011 году была введена ветроэнергетическая установка (далее – ВЭУ) мощностью 1,5 МВт в Новогрудском районе и с учетом успешной эксплуатации уже в 2016 году на площадке первой ВЭУ завершено строительство еще 5 установок аналогичной мощности с объединением их в единый энергокомплекс «Новогрудской ВЭС», которая позволяет ежегодно вырабатывать около

22 млн кВт*ч электроэнергии. Также в 2012 году на реке Неман была введена в эксплуатацию Гродненская ГЭС установленной мощностью 17 МВт, являясь на момент ввода самой крупной ГЭС в Беларуси и полученный здесь опыт строительства и эксплуатации был широко использован при реализации аналогичных проектов Полоцкой и Витебской ГЭС в РУП «Витебскэнерго» на реке Западная Двина. Огромный объем работы с решением множества сложнейших задач было выполнено руководителями и специалистами РУП «Гродноэнерго» для надежного функционирования БелАЭС и энергосистемы в целом, успешно реализовав инвестиционный проект «Строительство АЭС в Республике Беларусь. Выдача мощности и связь с энергосистемой», заказчиком которого было определено данное предприятие. В результате был введен в эксплуатацию узел – подстанция «Поставы-330 кВ», которая по двум воздушным ЛЭП-330 кВ непосредственно связывает БелАЭС с белорусской энергосистемой и является опорной подстанцией для передачи электроэнергии в Гродненскую, Витебскую и Минскую энергосистемы по 5-и воздушным ЛЭП-330 кВ [16].

РУП «Минскэнерго» – крупнейшее и особо значимое предприятие среди областных энергосистем страны обеспечивает надежное и бесперебойное энергоснабжение Минской области и более чем двухмиллионный мегаполис, столицу Республики Беларусь – город Минск, с охватом обслуживания 38 % населения страны и более 100 тысяч юридических лиц. Установленная мощность электростанций предприятия составляет 2405 МВт и сопоставима с суммарной мощностью двух энергоблоков первой в стране БелАЭС (таблица 1). В столичной энергосистеме вырабатывается более четверти производимой в Республике Беларусь электроэнергии и до 40 % производимой в ГПО «Белэнерго» тепловой энергии (таблица 2). В состав предприятия входят шесть теплоэлектроцентралей (далее – ТЭЦ), это Минские: ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4, ТЭЦ-5; Жодинская ТЭЦ, Борисовская ТЭЦ, среди которых самой крупной является Минская ТЭЦ-4 с установленной мощностью 1035 МВт (таблица 1). Также на балансе предприятия находятся крупные районные котельные в городах: Минск, Молодечно, Борисов; мини-ТЭЦ: в Вилейке, Молодечно, Солигорске, Слуцке. В данной областной энергосистеме электросетевая инфраструктура представляет собой протяженность ЛЭП всех классов напряжения около 70 тыс. км (включая более 16 тыс. км кабельных линий электропередачи), количество трансформаторных подстанций 35–750 кВ составляет 312 единиц (таблица 1), что в 1,5 раза больше, чем в крупной энергосистеме РУП «Витебскэнерго». В Минской энергосистеме расположены важнейшие энергетические узлы с крупнейшими подстанциями класса напряжения 330–750 кВ для надежного электроснабжения не только ответственных потребителей республиканского значения, таких как ОАО «Беларуськалий», но и для осуществления связи с областными энергосистемами страны и обеспечения межгосударственных перетоков [3]. Не менее грандиозна по величине и протяженности тепловых сетей, которая составляет более 3 тыс. км в однотрубном исчислении (таблица 1). Выполняя высокие требования к качеству и надежности энергоснабжения потребителей столицы, только филиалом «Минские кабельные сети» обеспечивается работа 36 подстанций 35–110 кВ, воздушных ЛЭП 0,4–10 кВ длиной 465 км, кабельных ЛЭП 0,4–110 кВ протяженностью 8223 км, с зоной обслуживания по состоянию на 01.01.2020 г. 929961 абонентов [17]. Масштабную работу по обеспечению теплоснабжением потребителей столицы (около 14 тыс. абонентов) с присоединенной суммарной тепловой нагрузкой 9956 Гкал/ч осуществляет филиал «Минские тепловые сети», вырабатывая собственное тепло, а также транспортируя его от Минских ТЭЦ-3 и ТЭЦ-4. Минские тепловые сети и Минская ТЭЦ-4 эксплуатируют уникальный комплекс теплоснабжения юго-западной части Минска по совместной работе ТЭЦ с пиковыми котельными Минских тепловых сетей. Следует отметить, что по величине и степени сложности схемы теплоснабжения столицы, обслуживаемой Минскими тепловыми сетями, она занимает второе (после Москвы) место среди стран СНГ и Балтии [18]. Несмотря на сложнейшую организационно-технологическую структуру Минская областная энергосистема достигает хороших ТЭП, где по итогам 2020 г. удельный расход условного топлива на производство электроэнергии составил 206,2 г/кВт*ч, а удельный расход условного топлива на производство тепловой энергии – 166,29 кг/Гкал (таблица 2), и это при условии постоянном привлечении крупных столичных ТЭЦ к регулированию

нагрузок и наличии дополнительных затрат на теплофикационных насосных. Для дальнейшего повышения экономичности работы в энергосистеме планируется вывод физического и морально устаревшего оборудования с установкой современных образцов на Минских ТЭЦ-3,4 и Жодинской ТЭЦ. В данной энергосистеме проводится масштабная работа по интеграции БелАЭС. Так, на ТЭЦ, входящих в состав РУП «Минскэнерго», для сглаживания ночных нагрузок введено электрокотлов суммарной мощностью в 360 МВт, а это 40% мощности электрокотлов, установленных на предприятиях ГПО «Белэнерго» [2]. Планируются большие объемы капиталовложений на реконструкцию Минской ТЭЦ-5, где в данном филиале предусматривается:

- установка пиково-резервных энергоисточников (далее – ПРЭИ) суммарной мощностью 300 МВт (ГТУ в количестве 6 шт. единичной мощностью по 54,2 МВт каждый) с подключением двух блоков ПРЭИ на напряжение 330 кВ и четырех блоков ПРЭИ на напряжение 110 кВ;
- установка автотрансформатора напряжением 330/110 кВ АТ мощностью 200 МВ·А с установкой выключателя 330 кВ и 110 кВ;
- реконструкция ОРУ 330 кВ с установкой трех элегазовых выключателей 330 кВ и подключением двух блоков ПРЭИ суммарной мощностью 100 МВт;
- реконструкция ОРУ 110 кВ с установкой четырех выключателей 110 кВ и подключением четырех блоков ПРЭИ суммарной мощностью 200 МВт [7].

В планах областной энергосистемы предусмотрено выполнение объемных мероприятий по реконструкции подстанций класса напряжения 330-750 кВ: ПС 750/330 кВ «Белорусская», ПС 330 кВ «Калийная», ПС 330 кВ «Минск Восточная», ПС 330 кВ «Молодечно», ПС 330 кВ «Слуцк (Слуцкая)» [7].

Основные направления развития в областных энергосистемах электрогенерирующих мощностей, электрических сетей и систем теплоснабжения на период до 2030 года конкретно определены в Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года, утвержденной Постановлением Министерства энергетики Республики Беларусь от 25 февраля 2020 года № 7 [19]. Реализация данного отраслевого программного документа повлияет на величины некоторых индикаторов энергетической безопасности, предусмотренных положениями Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь [20], с актуализацией методик расчета, так как в связи с интеграцией БелАЭС в энергосистему изменятся структуры электровыработки и потребления газа, будут введены пиково-резервные мощности и электрокотлы, а также кардинально видоизменена электросетевая инфраструктура.

Необходимо отметить, что, проводя анализ региональных особенностей РУП «Облэнерго», следует обратить внимание на развитие в каждом регионе передающей электросетевой инфраструктуры по причине того, что одним из главных источников генерации электроэнергии в стране будет являться БелАЭС с приростом межсистемных потоков между областными энергосистемами, и как следствие – ростом нагрузочных потерь при транспортировке электроэнергии по линиям в зависимости от удаленности потребителей. Также плановый рост отгрузки электрической энергии в сеть с учетом работы электрокотлов приведет к прогнозируемому увеличению технологического расхода электрической энергии на транспорт в электрических сетях по отношению к достигнутому в 2020 году – 8,16 %. Однако планируемые в РУП «Облэнерго» объемы реконструкции и модернизации электрических сетей и подстанций позволят снизить его значение до 8,01 % в 2025 г. [2].

Также обращает на себя внимание потребность в значительных капитальных затратах на реконструкцию и строительство сетей электроснабжения для нужд отопления и горячего водоснабжения с учетом обеспечения требуемой категоричности данных электроприемников. Решения по объемам электросетевого строительства должны приниматься на основании технико-экономического обоснования в первую очередь для новой жилой застройки. Целесообразно закладывать дополнительное электросетевое строительство при возведении новых районов многоэтажной и усадебной застройки при отсутствии сетей газо- и теплоснабжения.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что энергетика, являясь базовой отраслью, прямо влияет на деятельность всех секторов экономики и комфорт наших граждан. И от слаженной работы

всех структурных подразделений, входящих в энергосистему страны, зависит устойчивое социально-экономическое развитие и энергетическая безопасность как регионов, так и государства в целом.

Особенность белорусской энергосистемы заключается в ее целостности, которая проявляется в общности целей и задач по надежному и бесперебойному снабжению качественной и экологически безопасной энергией потребителей.

Областные энергосистемы являются вертикально интегрированными компаниями, включающими электростанции, электрические и тепловые сети, функционируют с учетом специфических особенностей объектов энергетики в части технологического единства генерации, передачи, распределения и потребления энергии и невозможности складирования энергии, но и выполняют собственные региональные задачи как на отраслевом, так и на местном уровне.

Важнейшими задачами областных энергосистем на перспективу являются диверсификация по топливно-энергетическим ресурсам с уменьшением зависимости от углеводородного сырья, увеличением удельного веса по использованию местных видов топлива и возобновляемых источников энергии, а также обеспечение эффективной интеграции БелАЭС с активным стимулированием электропотребления как реальным сектором экономики, так и населением. Для этого необходимо реализовать важнейшие инвестиционные проекты по вводу нового энергооборудования, модернизации действующих генерирующих мощностей, строительству и реконструкции линий электропередач, системно проводить масштабную цифровую трансформацию в энергетике.

На ближайшую перспективу необходимо дальнейшее совершенствование законодательной и нормативной базы по функционированию энергосистемы страны. Так, с учетом уже имеющейся практики реализации мероприятий по использованию атомной энергии возникла необходимость по комплексному изменению Закона Республики Беларусь «Об использовании атомной энергии». Особое внимание необходимо уделить разработке и принятию нормативно-правовых актов по реализации комплекса мероприятий, предусмотренных распоряжением Президента Республики Беларусь от 01.07.2020 № 119рп «О дополнительных мерах по решению актуальных вопросов жизнедеятельности населения» [21]. В нашей стране, в условиях отсутствия правовых основ рыночных отношений в электроэнергетической отрасли, до введения общего рынка газа и формирования общего электроэнергетического рынка в интеграционных формированиях Союзного государства и стран ЕАЭС необходима гармонизация законодательства со странами ЕАЭС по формированию актов, регулирующих общие энергетические рынки.

В целях дальнейшего развития энергетики необходимо принятие нормативно-правовых актов по разумному сочетанию рыночных принципов и государственного регулирования в отрасли. Так, согласно Указу Президента Республики Беларусь № 153 от 16 апреля 2021 г. «О развитии электроэнергетики» уже предусмотрена возможность владельцам блок-станций реализовывать избытки электроэнергии потребителям, а потребителям выбирать поставщика электроэнергии [22].

Вместе с тем, планомерно подходить к преобразованиям в отечественной электроэнергетике в связи с интеграционными процессами по созданию общего электроэнергетического рынка, возникает необходимость изменения структуры управления энергетической отраслью, где не только областные энергосистемы, но и крупные электростанции страны могли бы получить доступ к открытому рынку по продаже электроэнергии, что позволило бы улучшить экономичность работы субъектов хозяйствования энергетики и снизить энергоёмкость выпускаемой продукции.

Список цитированных источников

1. Министерство энергетики Республики Беларусь // Законодательство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://min-energo.gov.by>. – Дата доступа: 01.11.2021.
2. Сайт Государственного производственного объединения электроэнергетики «Белэнерго» // Основные сведения - ГПО «Белэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energo.by/content/about>. – Дата доступа: 01.11.2021.
3. Сайт Минского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Минскэнерго» // Основные сведения – РУП «Минскэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minkenergo.by>. – Дата доступа: 10.11.2021.

4. Ващило, С. Ключевые показатели достигнуты / С. Ващило // Информационно-аналитическое издание ГПО «Белэнэнерго» Энергетика Беларуси. – 2021. – 25 февр. – С. 1.
 5. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Энергетический баланс Республики Беларусь за 2020 год. – Режим доступа: <https://belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 10.11.2021.
 6. Сайт Витебского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Витебск-энерго» // Основные сведения – РУП «Витебскэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vitebsk.energo.by.> – Дата доступа: 12.11.2021.
 7. Об утверждении комплексного плана развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции [Электронный ресурс] : Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 1 марта 2016 г. № 169 // Министерство энергетики Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/>. – Дата доступа: 15.11.2021.
 8. Сайт Брестского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Брестэнерго» // Основные сведения – РУП «Брестэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.brestenergo.by.> – Дата доступа: 15.11.2021.
 9. Козлович, В. РУП «Брестэнерго»: новое оборудование определяет новые подходы к работе / В. Козлович // Беларусь сегодня. Газ. – 2020. – 22 дек. – С. 4.
 10. Сайт Гомельского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Гомельэнерго» // Основные сведения – РУП «Гомельэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gomelenergo.by.> – Дата доступа: 16.11.2021.
 11. Никитина, Е. Сильное звено экономики региона / Е. Никитина // Гомельская правда. Газ. – 2019. 30 окт. – С. 4.
 12. Сайт Могилевского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Могилевэнерго» // Основные сведения – РУП «Могилевэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mogilev.energo.by.> – Дата доступа: 17.11.2021.
 13. Макаренко, В. Время подвести итоги / В. Макаренко // Вечерний Могилев. Газ. – 2020. 23 дек. – С. 3.
 14. Сайт Гродненского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Гродноэнерго» // Общие сведения РУП «Гродноэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energo.grodno.by.> – Дата доступа: 17.11.2021.
 15. Шлык, Н. С уверенностью в завтрашнем дне / Н. Шлык // Гродзенская праўда. Газ. – 2019. – 18 дек. – С. 20.
 16. Кондратьева, Т. Комфорт в каждый дом / Т. Кондратьева // Беларусь сегодня. Газ. – 2018. – 22 дек. – С. 7.
 17. Сайт Минского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Минскэнерго» // Кабельные сети РУП «Минскэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minskenergo.by/filialy/minskie-kabelnye-seti.> – Дата доступа: 17.11.2021.
 18. Сайт Минского республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Минскэнерго» // Минские тепловые сети РУП «Минскэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minskenergo.by/filialy/minskie-teplovye-seti.> – Дата доступа: 17.11.2021.
 19. Концепция развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/uploads/files/>. – Дата доступа: 24.11.2021.
 20. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/uploads/files/>. – Дата доступа: 24.11.2021.
 21. О дополнительных мерах по решению актуальных вопросов жизнедеятельности населения [Электронный ресурс] : Распоряжение Президента Республики Беларусь от 01.07.2020 № 119. – Режим доступа: <https://president.gov.by/ru/documents/rasporyazhenie-no-119rp-ot-1-iyulya-2020-g.> – Дата доступа: 25.11.2021.
 22. О развитии электроэнергетики [Электронный ресурс] : Указ Президента Республики Беларусь № 153 от 16 апреля 2021 г. – Режим доступа: <https://president.gov.by.> – Дата доступа: 19.11.2021.
- References**
1. Ministerstvo energetiki Respubliki Belarus' // Zakonodatel'stvo [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://min-energo.gov.by.> – Data dostupa: 01.11.2021.
 2. Sajt Gosudarstvennogo proizvodstvennogo ob'edineniya elektroenergetiki «Belenergo» // Osnovnye svedeniya - GPO «Belenergo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.energo.by/content/about.> – Data dostupa: 01.11.2021.
 3. Sajt Minskogo respublikanskogo unitarnogo predpriyatiya elektroenergetiki «Minskenergo» // Osnovnye svedeniya – RUP «Minskenergo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://minskenergo.by.> – Data dostupa: 10.11.2021.
 4. Vashchilo, S. Klyuchevye pokazateli dostignuty / S. Vashchilo // Informacionno-analiticheskoe izdanie GPO «Belenergo» Energetika Belarusi. – 2021. – 25 fevr. – S. 1.
 5. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs] // Energeticheskij balans Respubliki Belarus' za 2020 god. – Rezhim dostupa: <https://belstat.gov.by/>. – Data dostupa: 10.11.2021.
 6. Sajt Vitebskogo respublikanskogo unitarnogo predpriyatiya elektroenergetiki «Vitebsk-energo» // Osnovnye svedeniya – RUP «Vitebskenergo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.vitebsk.energo.by.> – Data dostupa: 12.11.2021.
 7. Ob utverzhenii kompleksnogo plana razvitiya elektroenergeticheskoy sfery do 2025 goda s uchetom vvida Belorusskoj atomnoj elektrostancii [Elektronnyj resurs] : Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 1 marta 2016 g. № 169 // Ministerstvo energetiki Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://minenergo.gov.by/>. – Data dostupa: 15.11.2021.
 8. Sajt Brestskogo respublikanskogo unitarnogo predpriyatiya elektroenergetiki «Brestenergo» // Osnovnye svedeniya – RUP «Brestenergo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.brestenergo.by.> – Data dostupa: 15.11.2021.
 9. Kozlovich, V. RUP «Brestenergo»: novoe oborudovanie opredelyaet novye podhody k rabote / V. Kozlovich // Belarus' segodnya. Gaz. – 2020. – 22 dek. – S. 4.
 10. Sajt Gomel'skogo respublikanskogo unitarnogo predpriyatiya elektroenergetiki «Gomel'energo» // Osnovnye svedeniya – RUP «Gomel'energo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.gomelenergo.by.> – Data dostupa: 16.11.2021.
 11. Nikitina, E. Sil'noe zveno ekonomiki regiona / E. Nikitina // Gomel'skaya pravda. Gaz. – 2019. 30 okt. – S. 4.
 12. Sajt Mogilevskogo respublikanskogo unitarnogo predpriyatiya elektroenergetiki «Mogilevenergo» // Osnovnye svedeniya – RUP «Mogilevenergo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.mogilev.energo.by.> – Data dostupa: 17.11.2021.
 13. Makarenko, V. Vremya podvesti itogi / V. Makarenko // Vechernij Mogilev. Gaz. – 2020. 23 dek. – S. 3.
 14. Sajt Grodnenskogo respublikanskogo unitarnogo predpriyatiya elektroenergetiki «Grodnoenergo» // Obshchie svedeniya RUP «Grodnoenergo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.energo.grodno.by.> – Data dostupa: 17.11.2021.
 15. Shlyk, N. S uverenno' v zavtrashnem dne / N. SHLYK // Grodzenskaya praŭda. Gaz. – 2019. – 18 dek. – S. 20.
 16. Kondrat'eva, T. Komfort v kazhdyj dom / T. Kondrat'eva // Belarus' segodnya. Gaz. – 2018. – 22 dek. – S. 7.
 17. Sajt Minskogo respublikanskogo unitarnogo predpriyatiya elektroenergetiki «Minskenergo» // Kabel'nye seti RUP «Minskenergo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://minskenergo.by/filialy/minskie-kabelnye-seti.> – Data dostupa: 17.11.2021.
 18. Sajt Minskogo respublikanskogo unitarnogo predpriyatiya elektroenergetiki «Minskenergo» // Minskie teplovyje seti RUP «Minskenergo» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://minskenergo.by/filialy/minskie-teplovye-seti.> – Data dostupa: 17.11.2021.
 19. Konceptiya razvitiya elektrogeneriruyushchih moshchnostej i elektricheskij setej na period do 2030 goda [Elektronnyj resurs] // Ministerstvo energetiki Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://minenergo.gov.by/uploads/files/>. – Data dostupa: 24.11.2021.
 20. Konceptiya energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs] // Ministerstvo energetiki Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: <https://minenergo.gov.by/uploads/files/>. – Data dostupa: 24.11.2021.
 21. O dopolnitel'nyh merah po resheniyu aktual'nyh voprosov zhiznedeyatel'nosti naseleniya [Elektronnyj resurs] : Rasporyazhenie Prezidenta Respubliki Belarus' ot 01.07.2020 № 119. – Rezhim dostupa: <https://president.gov.by/ru/documents/rasporyazhenie-no-119rp-ot-1-iyulya-2020-g.> – Data dostupa: 25.11.2021.
 22. O razviti i elektroenergetiki [Elektronnyj resurs] : Ukaz Prezidenta Respubliki Belarus' № 153 ot 16 aprelya 2021 g. – Rezhim dostupa: <https://president.gov.by.> – Data dostupa: 19.11.2021.

Материал поступил в редакцию 21.12.2021

ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ВУЗА

Д. Б. Цеханович

Аспирант Московского педагогического государственного университета, преподаватель Московского высшего общеобразовательного командного училища, г. Москва, Россия, e-mail: komandor7932@mail.ru

Реферат

Работа любого вуза строится на формируемой его руководством педагогической системе. Эффективность такой системы будет определять уровень подготовки выпускаемого специалиста и его востребованность на рынке труда. Сегодня строго регламентированной модели системы нет, нет и единых среди исследователей взглядов на порядок ее формирования. Каждое учебное заведение выстраивает ее самостоятельно. Результат мы видим в отсутствии строгой стандартизации высшего профессионального образования.

В работе рассмотрены авторские модели педагогических систем вуза, отличающиеся своей дееспособностью и самодостаточностью. Указано на их способность прогнозировать и отражать выдвигаемые и постоянно ужесточающиеся требования общества к выпускаемому специалисту. Раскрыта состоятельность авторских систем в проблематике соответствия деятельности вузов современным образовательным стандартам.

Ключевые слова: педагогическая система, педагогический процесс, компонент, педагогическая система вуза, система, модуль.

APPROACHES TO THE FORMATION OF THE PEDAGOGICAL SYSTEM OF A MODERN UNIVERSITY

D. B. Tsekhanovich

Abstract

The work of any university is based on the pedagogical system formed by its leadership. The effectiveness of such a system will determine the level of training of the graduated specialist and his demand in the labor market. Today there is no strictly regulated model of the system, and there are no common views among researchers on the procedure for its formation. Each educational institution builds it independently. We see the result in the absence of strict standardization of higher professional education.

The work considers the author's models of the pedagogical systems of the university, which are distinguished by their efficiency and self-sufficiency. Their ability to predict and reflect the put forward and constantly tightening requirements of the society to the graduated specialist is indicated. The consistency of the author's systems in the problem of compliance of the activities of universities with modern educational standards is disclosed.

Keywords: pedagogical system, pedagogical process, component, university pedagogical system, system, module.

Введение

Современное прогрессивное развитие общества в значительной мере актуализирует необходимость в модернизации образования и потребность в принципиальном обновлении его содержания и структуры. Система образования под влиянием именно современного общества должна обеспечивать обучение и подготовку специалиста, в котором нуждается общество и рынок труда. Это должен быть высококвалифицированный, конкурентноспособный и, самое главное, востребованный специалист. Выпускнику современного вуза необходим такой потенциал знаний, умений и навыков, который он сможет применять не только для реализации своего основного профессионального труда, но и для его самосовершенствования – обеспечения способности самостоятельно повышать качество своей профессиональной деятельности. В таких жестких условиях возникает необходимость в принципиальном пересмотре педагогических систем вузов, выполняющих задачи по обучению и подготовке специалистов для труда в современном обществе. Новые педагогические системы должны учитывать все требования, предъявляемые им социальным заказом, а также иметь возможность с высоким уровнем достоверности спрогнозировать изменения в этих требованиях и, конечно же, оперативно отреагировать на них соответствующей образовательной реакцией.

Основой любой педагогической системы вуза является ее педагогический процесс, а это значит, что изменения или же дополнения должны коснуться в большей степени именно его. По мнению автора, такие изменения должны видаться не только в интеграции в уже сложившуюся и существующую форму педагогического процесса новых форм, методов, технологий работы со студентами в вузах. В данном контексте успешность и эффективность изменений может быть достигнута только комплексным охватом, пересмотром всех элементов как педагогического процесса, так и всей педагогической системы.

Основная часть

Педагогическая основа деятельности современного вуза

Практика деятельности вузов показывает, что единичные, точечные, некомплексные изменения, в основном, либо не приносят никакого требуемого в таких случаях эффекта, либо они настолько сливаются и адаптируются с уже имеющимися в составе системы элементами, что в полной мере теряют способность выполнить изначальную задачу. Естественно, что и изменить, повысить образовательный результат такие изменения не могут. Другими словами, направления реформирования с каждым днем все более устаревающих педагогических систем должны быть представлены в качестве обязательного их перехода в принципиально иное, новое состояние, которое просто обязано учитывать современные реалии и условия образовательной деятельности.

Автор уверен в том, что в основу новых педагогических систем необходимо заложить результат скрупулезного анализа развития подходов к формированию педагогических систем, начиная со второй половины уже прошедшего столетия. Свое целесообразное и актуальное отражение в основе формируемых систем вузов обязательно должны получить выявленные в ходе вышеуказанного анализа закономерности и тенденции развития и совершенствования педагогических систем тех лет. Ведь вполне очевидно то, что каждая из ее (педагогической системы прошлых лет – *авт.*) форм на определенном временном этапе соответствовала требованиям современности.

На разных этапах развития общества ему нужны были и по-разному подготовленные специалисты. Конечно же, задаваемый обществом уровень их подготовки был и остается по сей день высоким, различия лишь ориентация их в профессиональной деятельности.

Системный подход в профессиональном образовании высшей школы рассматривался как приоритетный во многих трудах на разных этапах становления педагогики. Взгляды многих авторитетных исследователей о природе системы деятельности вуза, ее наполнении и функционировании существенно различаются. Большое влияние

на формирование педагогической системы оказывали и востребованные и актуальные на соответствующих этапах развития типы педагогического процесса.

Сегодня на рынке труда, по мнению автора, наиболее востребованным специалистом следует считать специалиста, подготовленного в соответствии с таким типом педагогического процесса, как субъектно-ориентированный, предполагающий своим основным элементом педагогической системы образовательную среду вуза [1, с. 59–60]. В результате его задействования в обучении общество получает полноценного специалиста, который представляет интерес для работодателя и как личность, воспитанная и подготовленная к работе в социуме, обществе, коллективе, команде и пр., и как высококвалифицированный сотрудник, способный объективно и обдуманно ставить перед собой правильные задачи, планировать свою профессиональную деятельность по их выполнению, самостоятельно искать информацию и ресурсы, в которых нуждается он или коллектив, членом которого он является [2]. В дальнейшем именно субъектно-ориентированный тип педагогического процесса автор будет рассматривать как фундаментальный.

Педагогический процесс такого типа предполагает уход педагога высшей школы от непосредственного обучения студента, это выражается в простой передаче ему знания и комментировании этого знания. Теперь педагогу современного вуза необходимо организовать студенту необходимые условия, окружение и возможности, способствующие развитию его полноценной учебно-познавательной деятельности [3]. Говоря иными словами, функция преподавателя теперь заключается в необходимости погружения обучающегося в полноценную учебную атмосферу и образовательную среду вуза.

Автор, принимая во внимание взгляды о составе и функционировании педагогической системы таких исследователей, как В. А. Сластенин, А. Г. Ковалев, Н. В. Кузьмина, В. П. Беспалько, Л. А. Беляева, Л. П. Крившенко и др. указывает на возможность и необходимость формирования дееспособной и рациональной педагогической системы вуза именно на их основе и предлагает свою модель такой системы. Ее рациональность определяется, в основном, соответствием всем или большей части типов педагогического процесса (см. схему 1).

Изучая структуру предложенной автором модели педагогической системы, следует выделить несколько основополагающих компонентов:

Компонент 1-й – цель функционирования системы. Этот компонент следует рассматривать в качестве приоритетного, поскольку именно он задает единый для всех остальных компонентов системы ритм и направление функционирования и развития (он представляет в педагогической системе социальный заказ общества и усматривается

в качестве обязательного компонента всеми исследователями указанной проблематики).

Компонент 2-й – педагогический процесс, реализуемый в конкретных педагогических условиях. Наиболее обширный компонент, основывающийся на качестве взаимодействия обучающего, организующего, управляющего преподавателя и центра всего педагогического процесса и системы в целом – студента. Вполне очевидно, что взаимодействие указанных субъектов направленно на получение конкретного образовательного результата, и чем оно продуктивнее и эффективнее, тем выше уровень подготовки студента (указанный компонент, фигурирует во взглядах большинства ученых).

Компонент 3-й – субъекты педагогической системы (преподаватель и студент). Непосредственные участники педагогической системы и происходящих в ней процессов, оказывающих наибольшее влияние на образовательный результат. Следует подчеркнуть разницу в сущности 2-го и 3-го компонентов. Принципиальное отличие их в том, что компонент 3-й представляет из себя физические субъекты, а компонент 2-й условия, в которых они взаимодействуют (рассматриваемый компонент также фигурирует во всех моделях, предлагаемых различными исследователями). При рассмотрении 3-го компонента автор выделяет весьма значимую особенность предлагаемой им педагогической системы. Она связана с возможностью самой системы учитывать в качестве своего субъекта (но только обучающего, организующего, управляющего – не студента) элементов различных социальных институтов государства.

Компонент 4-й – содержание обучения. Здесь следует иметь ввиду комплекс знаний, умений и навыков, получение которых обучающимся в вузе гарантируется государством, обществом и системой образования (такой компонент большинства педагогических систем является ключевым в догматическом и формально-репродуктивном типах педагогических процессов).

Компонент 5-й – управление. В рамках педагогической системы управление предполагает целенаправленно организованную деятельность всех должностных лиц – от преподавателя, как первейшего лица, формирующего образовательный результат в обучающемся, и до управленческо-административного персонала вуза. Эта деятельность направлена на стабильное и устойчивое развитие и функционирование системы вуза (такой компонент в состав педагогической системы включают исследователи более позднего периода исследований педагогических систем). Естественно, что под управлением в этом контексте необходимо понимать и внешнее влияние общества на педагогическую систему вуза по средствам социального заказа, влияние некоторых социальных институтов государства.

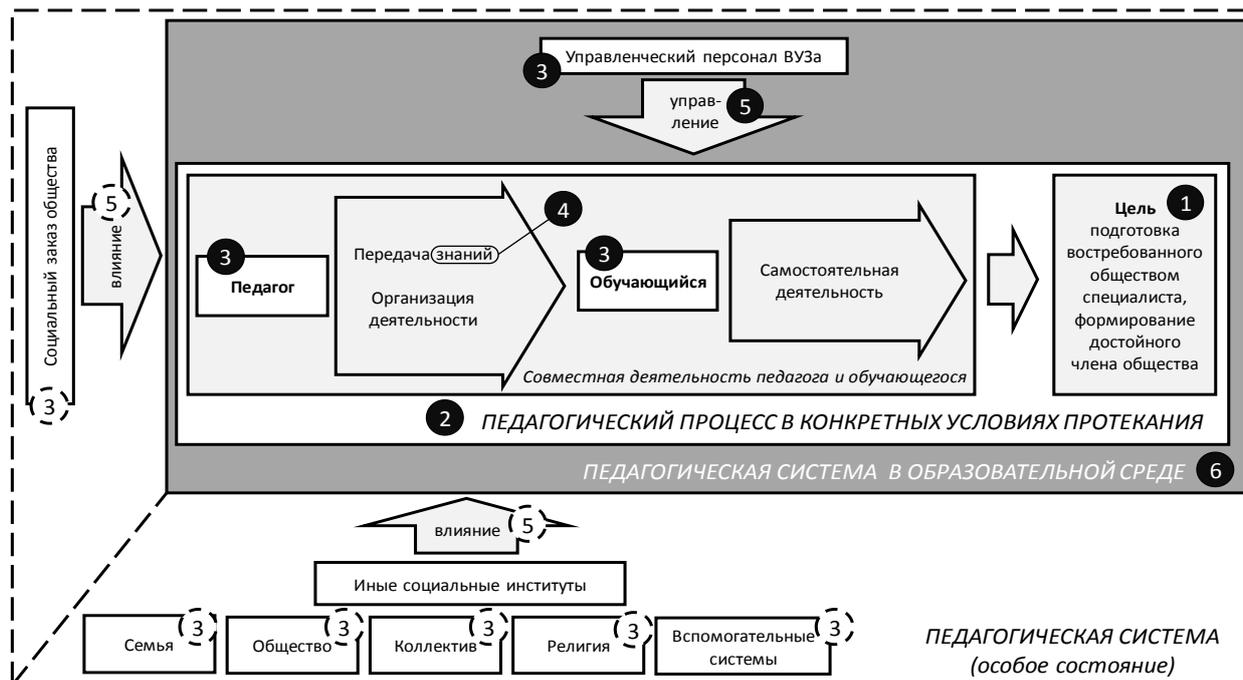


Схема 1 – Предлагаемая модель педагогической системы современного вуза

Компонент 6-й – образовательная среда. Современный компонент, выделяющий всю педагогическую систему как соответствующую своему времени. Другими словами, он обязателен и необходим для эффективной и соответствующей современным требованиям подготовки специалистов. Большинство ученых в образовательной среде вуза видят целенаправленно созданное окружение студента, плодотворно и значительно влияющее на результативность учебно-познавательной деятельности студента [4, с. 883–884]. Иными словами, под образовательной средой следует понимать комплекс особых условий, в которых протекает педагогический процесс вуза (автор считает необходимым указать на то, что в продуктивном и субъектно-ориентированном типах педагогического процесса данный компонент является основополагающим, при этом для педагогических систем, задействующих продуктивный тип, он имеет меньшую значимость).

Вполне логичным видится вопрос о том, как же производить управление педагогической системой? Автор считает, что наиболее результативным управлением системой следует считать влияние на нее, выражаемое в увеличении или же уменьшении значимости того или иного компонента педагогической системы. Степень (в смысле сила) этого влияния будет сказываться на оперативности управления.

Предложенная автором модель педагогической системы вуза содержит в своем составе практически все ключевые компоненты различных типов педагогического процесса. Принимая это во внимание, можно считать ее универсальной, позволяющей ее руководителю в рамках подчиненного вуза задействовать любой из известных типов педагогического процесса как в целом в вузе, так и по отдельным учебным дисциплинам. С таким условием рассмотренную универсальную модель системы можно считать самодостаточной и в целом состоятельной.

Умение специалиста встраиваться в систематически изменяющуюся в своих условиях трудовую деятельность является на сегодняшний день приоритетным качеством сотрудника любой сферы деятельности общества. А это умение и, самое главное, желание специалиста не будет действенным без применения педагогом мотивационных инструментов. В этой связи будет достаточно целесообразным включение в структуру педагогической системы вуза такого компонента, как мотивация. Это будет уже 7-й компонент. Главнейшая задача этого компонента заключается в усилении результата функционирования других компонентов педагогической системы.

Рассматривая мотивацию в контексте работы системы вуза, необходимо выделить следующие группы мотивов (см. схему 2).

Социальные мотивы – группа, представленная такими явлениями, как ответственность студента, его долг перед семьей, обществом, коллективом и т. д., понимание значимости личной образованности, признание социального положения окружающими и пр. Эту группу мотивов объединяет желание студента через образование утвердиться в социуме и получить свой социальный статус. Регулируют такие мотивы в студенте, по мнению автора, как социальные и общественные институты, членом которых студент является.

Общественные мотивы – группа, представленная стремлением обучающегося занять желаемую должность после окончания учебного заведения, его желанием получить признание и соответствующий общественный статус, получать удовлетворение от своей учебно-профессиональной деятельности. Рассматривая данную группу мотивов более пристально, можно обратить внимание на некую схожесть ее с социальными мотивами, однако различие есть, и оно видится в том, что регулятором этой группы выступает общество и его социальный заказ.

Управленческая мотивация – группа мотивов, регулирующих степень и качество взаимодействия студента с его окружением – преподавателем, коллективом педагогов, академической группой, руководством кафедры, факультета и пр. Эта же группа формирует конкретную позицию студента как по отношению к обучению в вузе, так и по любому иному вопросу. Регулятором силы влияния этой группы мотивов для труда студента выступает в основном руководство учебного заведения, факультета, кафедры и т. д. [5].

Если за центр мотивационного поля принять студента, то весь арсенал мотивационных влияний на него следует разделить на внешнюю мотивацию и мотивацию внутреннюю. Дело в том, что все рассмотренные выше мотивы определяют внешнее побуждение студента на успешное обучение в вузе. Квинт эссенцию всего побуждения аккумулирует в своей деятельности педагог, он ее и подает в трансформированном именно под конкретного студента виде. Внутреннюю мотивацию формирует в обучающемся сам студент, он ищет ее самостоятельно, он формирует ее под себя лично и самостоятельно. Реализация мотивационных инструментов педагогом в учебной деятельности вообще или же стимуляция их отдельных групп, элементов даст возможность педагогическому процессу в частности и педагогической системе в целом значительно повысить образовательные результаты подготавливаемых специалистов.

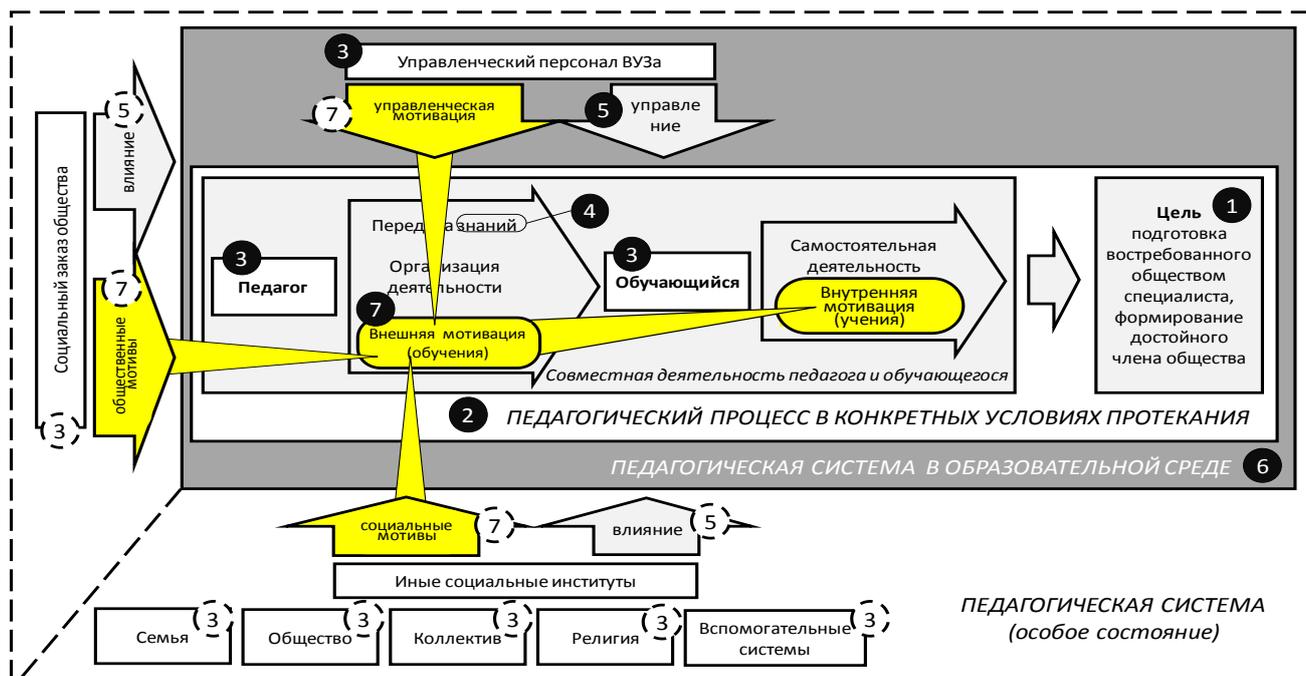


Схема 2 – Функционирование мотивационной компоненты в универсальной модели педагогической системы вуза

На сегодняшний день в мире наблюдается постоянно возрастающее влияние на молодежь. Прогрессивно развиваются все возможные источники информации, упрощается доступность к различным базам данных, стремительно совершенствуются различные компьютерные технологии и пр. Прогресс и технологии врываются в индивидуальное пространство человека, в семью. Описываемые явления, к большому сожалению, имеют разную степень значимости для разных слоев населения. Совершенно логично, что влияние развития современных технологий на человека в слабозаселенной местности протекает значительно слабее, и человек с меньшей финансовой достаточностью имеет менее значимые познания в области электронных технологий. Молодой человек, выросший в крупном городе, в огромной степени более развит в современном отношении к технологиям. Такой дисбаланс, естественно, порождает индивидуальные различия обучающихся уже в первые дни их обучения в образовательном учреждении. Принимая это явление в учет, можно предложить следующее – в процессе комплектования академических групп и изначальной организации системы работы вуза по подготовке специалистов следует обязательно принимать во внимание степень готовности конкретных студентов к учебно-познавательной деятельности, самостоятельному труду.

Такой учет, по мнению автора, следует реализовать временным разделением подкомпоненты «обучающийся» на два элемента: обучаемый и обучающийся (см. схему 3).

Следует понимать, что обучаемый – это студент, как правило, начального периода обучения в вузе, нуждающийся в квалифицированной помощи со стороны преподавателя. Такой студент на данном этапе его учебы не имеет навыков в поиске и оценке необходимого материала.

Еще один авторский вариант педагогической системы имеет в качестве своего самостоятельного, отдельного элемента модуль. Под модулем автор имеет ввиду комплекс компонентов, объединенных сходным или общим пониманием, а так же функционалом. Модуль допускает исключение одного или же нескольких своих компонентов без потери основного понимания его определения (см. схему 4).

Необходимость и актуальность предлагаемой модели системы вуза продиктована тем, что имеющиеся на сегодняшний день представления, подходы и взгляды на педагогическую систему, конечно же, в достаточной мере совершенны и адаптированы к требованиям своего времени. Однако все они имеют возможность учитывать прогрессирующее развитие общества, и условия деятельности своего

вуза достаточно условные и прозрачные. Для совершенствования такой системы и придания ей соответствующего современного, систематически ужесточающимся требованиям вида, ее необходимо дорабатывать – в практической плоскости такой работы это затребует значительного времени и ресурсов.

Для достижения большего соответствия, а так же быстрого отражения в составе уже существующей педагогической системы нового элемента и учета его функции, необходимо его включать в соответствующий по функциональному значению и смыслу модуль системы. Новый элемент в составе какого-либо модуля считать отдельным компонентом. Единственным обязательным компонентом педагогической системы будет педагогический процесс, поскольку он составляет фундамент любой модели педагогической системы вуза.

Управление системой модульной структуры, как, впрочем, и системой компонентного состава, необходимо организовать увеличением или уменьшением стимулирования того или иного модуля. Управление системой возможно и через влияние на отдельный компонент какого-либо модуля.

Модулями такой структуры педагогической системы вуза необходимо считать:

Компонент – педагогический процесс. Как уже было сказано, основа любой педагогической системы.

Модуль 1-й – обучение. Фундаментальным компонентом модуля следует считать преподавателя, поскольку именно он является тем основным лицом, которое влияет на образовательный результат. В составе модуля состоят компоненты: формы, способы передачи знаний преподавателем, содержание занятий, организационная деятельность обучающегося со стороны педагога, условия работы со студентом. Модуль допускает оперативное включение в свой состав и иных требующихся компонентов, а также компонентов, возможных к появлению в перспективе.

Модуль 2-й – учение. Фундаментальным компонентом модуля следует считать обучающегося. Именно обучающийся под влиянием преподавателя формирует образовательный результат. В составе модуля состоят компоненты: анализ получаемых знаний, поиск решений, формулирование соответствующих и актуальных целей. Учитываются обязательно и условия учебно-познавательной деятельности обучающегося. Как и предыдущий модуль, модуль рассматриваемый допускает оперативное включение в свой состав иных необходимых компонентов, а также компонентов, возможных к появлению в перспективе.

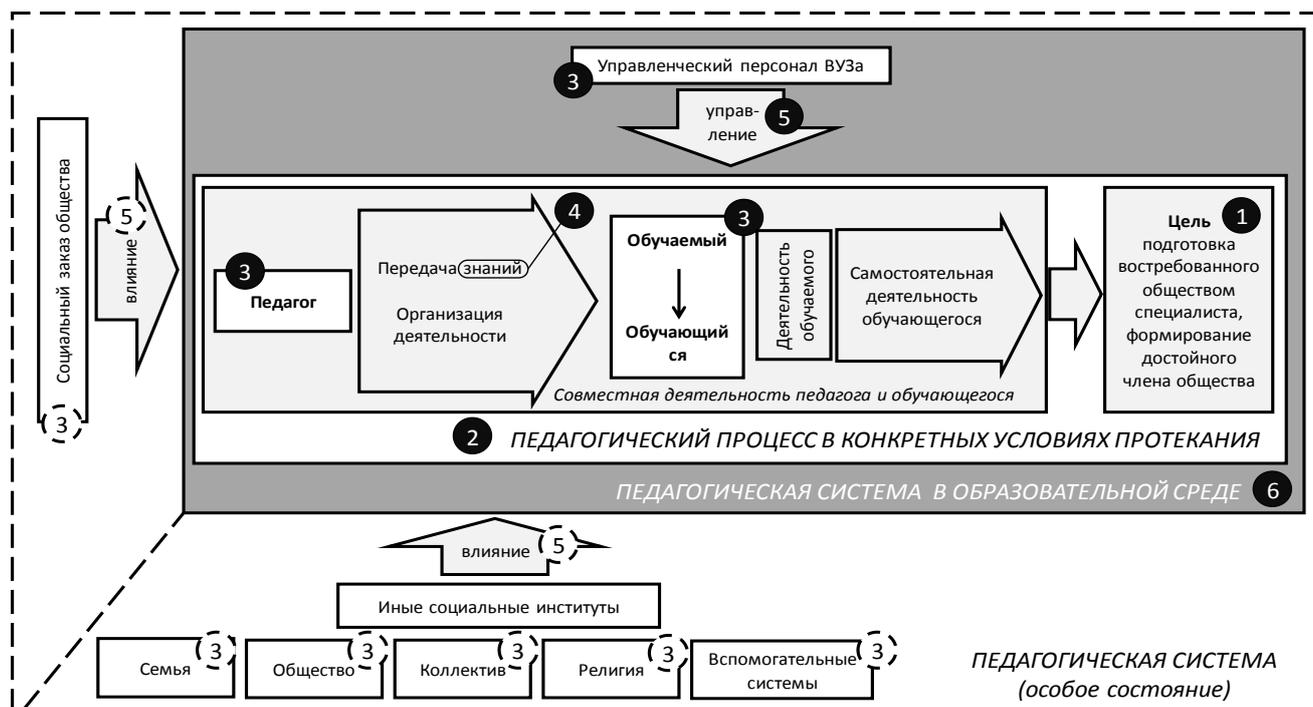


Схема 3 – Универсальная модель педагогической системы образовательной организации с учетом исходной готовности обучающегося

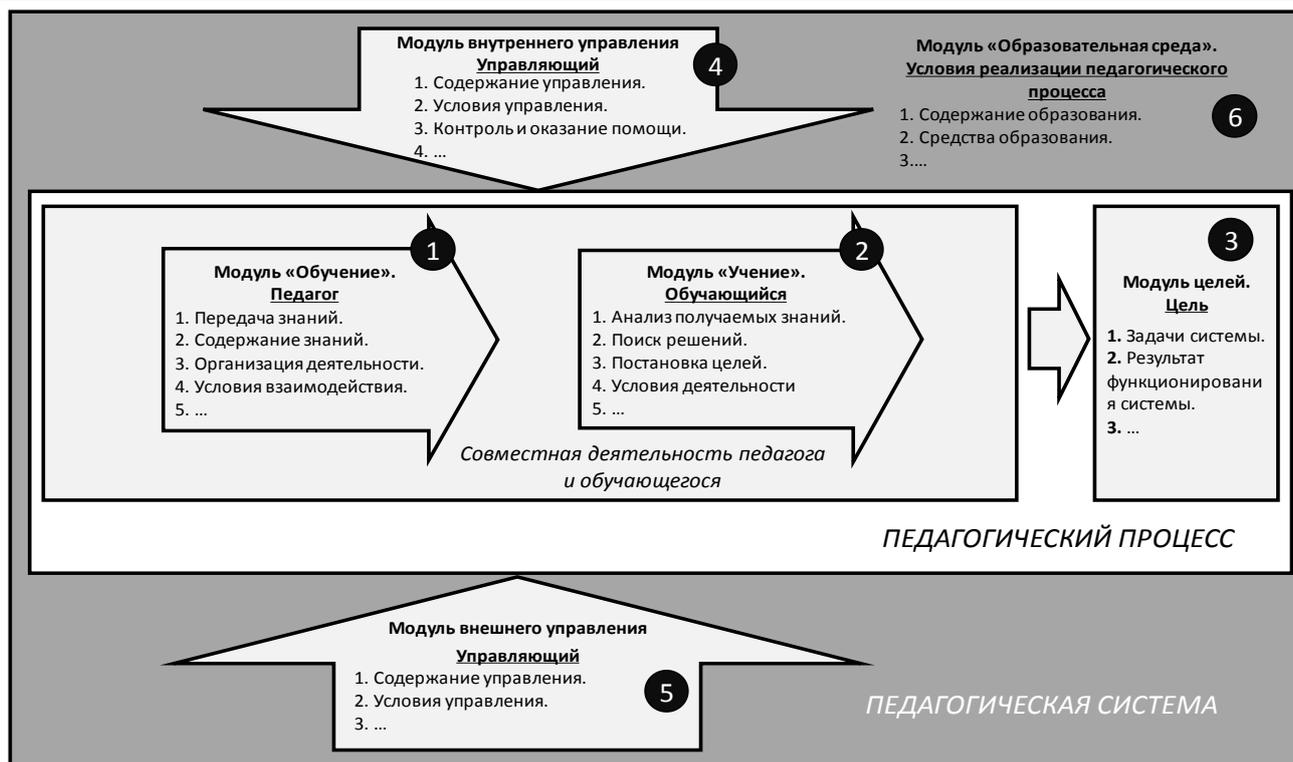


Схема 4 – Модель педагогической системы «модульной» структуры

Модуль 3-й – целевой. Модуль устанавливает конкретные цели и разделяет их на промежуточные задачи функционирования системы вуза. Естественно, что цели, преследуемые системой на разных этапах, скорее всего будут изменяться и дополняться, поэтому данный модуль такой процесс должен учитывать.

Модуль 4-й – внутреннего управления. Предполагает обязательное наличие организующей деятельности руководящего персонала вуза, регулирующей функционирование модулей педагогической системы. Здесь же следует указать и на деятельность руководства факультетов, кафедр и иных структурных подразделений образовательного учреждения.

Модуль 5-й – внешнего управления. Устанавливает управленческое воздействие на педагогическую систему вуза или отдельные ее модули (компоненты модулей) со стороны общества и его социального заказа. Модуль предусматривает влияние на систему вуза и со стороны некоторых социальных институтов государства.

Модуль 6-й – образовательная среда. Крайне значимый модуль педагогической системы современного вуза [4, с. 884–885]. В настоящее время именно он задает темп и ритм работы всей педагогической системы.

Заключение

Предлагаемый автором модульный вариант педагогической системы существенно отличается от уже существующих моделей систем возможностью оперативно учитывать в своем составе еще и иные – новые компоненты, возможные или спрогнозированные к появлению в будущем, как отражение требований современного общества. Такая система позволит и спрогнозировать появление новых компонентов или же укажет на необходимость таковых.

Автор акцентирует внимание на том, что, рассмотренные в работе модели педагогических систем не носят исключительный характер. Состав их и работу следует адаптировать руководством конкретного вуза под условия деятельности вуза. Следует указать и на необходимость придания таким сложным и неоднозначным системам, как педагогические возможности интегрироваться с педагогическими системами иных вузов и вузов более значимых статусов.

Список цитированных источников

1. Юдин, В. В. Субъектно-ориентированный тип педагогического процесса – ключевое направление реализации ФГОС / В. В. Юдин // Образовательная панорама. Ярославская область: пространство образовательных возможностей. – 2015. – № 1 (3). – С. 58–62.
2. Юдин, В. В. Технологическое проектирование педагогического процесса: Монография / В. В. Юдин. – Москва: Университетская книга, 2008. – 302 с. (с 80).
3. Рекомендации по организации педагогического процесса субъектно ориентированного типа: методические рекомендации / Под научной редакцией В. В. Юдина. – Ярославль: ИРО ЯО, 2015. – 100 с.
4. Шапран, Ю. П. Образовательная среда вуза: типология, функции, структура / Ю. П. Шапран, О. И. Шапран // Молодой ученый. – 2015. – № 7 (87). – С. 881–885.
5. Подласый, И. П. Педагогика: 100 вопросов – 100 ответов: учеб. пособие для вузов / И. П. Подласый. – М.: ВЛАДОС-пресс, 2004. – 365 с.

References

1. Yudin, V. V. Sub"ektno-orientirovannyj tip pedagogicheskogo processa – klyuchevoe napravlenie realizacii FGOS / V. V. Yudin // Obrazovatel'naya panorama. Yaroslavskaaya oblast': prostranstvo obrazovatel'nyh vozmozhnostej. – 2015. – № 1 (3). – S. 58–62.
2. Yudin, V. V. Tekhnologicheskoe proektirovanie pedagogicheskogo processa: Monografiya / V. V. Yudin. – Moskva: Universitetskaya kniga, 2008. – 302 s. (s 80).
3. Rekomendacii po organizacii pedagogicheskogo processa sub"ektno orientirovannogo tipa: metodicheskie rekomendacii / Pod nauchnoj redakciej V. V. Yudina. – Yaroslavl': IRO YAO, 2015. – 100 s.
4. Shapran, Yu. P. Obrazovatel'naya sreda vuza: tipologiya, funkcii, struktura / Yu. P. Shapran, O. I. Shapran // Molodoy uchenyj. – 2015. – № 7 (87). – S. 881–885.
5. Podlasyj, I. P. Pedagogika: 100 voprosov – 100 otvetov: ucheb. posobie dlya vuzov / I. P. Podlasyj. – M.: VLADOS-press, 2004. – 365 s.

Материал поступил в редакцию 06.12.2021

Научное издание

ВЕСТНИК БРЕСТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ);
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ
№ 1 (127). 2022 г.

| | |
|-------------------------|-----------------|
| Главный редактор | Баханович А. Г. |
| Зам. главного редактора | Шалобьита Н. Н. |
| Ответственный секретарь | Ковальчук Е. Н. |

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

| | |
|---|----------------|
| Ответственный редактор по разделу «Строительство» | Тур В. В. |
| Зам. ответственного редактора по разделу «Строительство» | Пойта П. С. |
| Ответственный редактор по разделу «Машиностроение» | Нерода М. В. |
| Зам. ответственного редактора по разделу «Машиностроение» | Поддубко С. Н. |
| Ответственный редактор по разделу «Информационные технологии» | Головко В. А. |
| Зам. ответственного редактора по разделу «Информационные технологии» | Лебедь С. Ф. |
| Ответственный редактор по разделу «Геоэкология» | Волчек А. А. |
| Зам. ответственного редактора по разделу «Геоэкология» | Мешик О. П. |

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

| | |
|---|-----------------|
| Ответственный редактор по разделу «Экономика» | Зазерская В. В. |
| Зам. ответственного редактора по разделу «Экономика» | Медведева Г. Б. |
| Технический редактор | Соколюк А. П. |
| Дизайн | Колб К. С. |
| Корректор | Дударук С. А. |