

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
R o k 1 8 1 8.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»  
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-  
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия F. Строительство. Прикладные науки

В серии F научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области геодезии, геоэкологии и строительства.

---

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне і змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне геадэзіі, геаэкалогіі і будаўніцтва.

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series F. Civil engineering. Applied sciences

Series F includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in geodesy, geoecology and civil engineering.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Адрес редакции:

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск: Г.А. Шароглазова.  
Редактор И.Н. Чапкевич.

Подписано к печати 29.01.2021. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 13,48. Уч.-изд. л. 16,25. Тираж 100 экз. Заказ 003.

**ГЕОДЕЗИЯ**

УДК 332.3:347.2:711

**СИСТЕМА ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ НЕДВИЖИМОГО ИМУЩЕСТВА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ЕЕ СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ**

*канд. техн. наук В.А. БОНДАРЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)*

*Выполнено сравнение системы государственной регистрации недвижимого имущества Республики Беларусь с аналогичными системами других стран. Представлены результаты анализа соответствия данной системы международным стандартам и перспективы её дальнейшего развития.*

**Ключевые слова:** государственная регистрация; недвижимое имущество; международные стандарты; управление недвижимостью.

**Введение.** Система регистрации недвижимого имущества, прав на него и сделок с ним является одним из важнейших условий эффективного управления недвижимостью, не только как физическим объектом владения и использования, но и как правом на него. В мире существует две основные системы регистрации недвижимости: англо-американская и европейская. Наиболее распространенная европейская система основана на государственных гарантиях права собственности на недвижимость. При такой организации вся история недвижимости находится в Едином государственном реестре, и вся совокупность прав на имущество, включая сервитуты, гарантируется государством.

Введение регистрационной системы в Республике Беларусь преследовало несколько целей:

- придать предельную открытость правам на недвижимое имущество и информации о правах;
- ввести государственный контроль за совершением сделок с недвижимым имуществом и тем самым максимально защитить права и законные интересы граждан;
- внести единообразие в процедуру регистрации прав на недвижимость.

То есть создать европейскую систему регистрации недвижимого имущества.

**Основная часть.** Анализ современной регистрационной системы Республики Беларусь показал значительное сходство с системами Дании [1], Швеции [2] и Нидерландов [3]. В республике создан национальный орган, который занимается ведением земельного кадастра и регистрацией недвижимого имущества – Национальное кадастровое агентство – и сеть территориальных организаций, филиалов и бюро. Развитие системы происходит параллельно совершенствованию нормативно-правовой базы – Закона Республики Беларусь от 22 июля 2002 г. «О государственной регистрации недвижимого имущества, прав на него и сделок с ним», в который внесли 15 изменений, и в соответствии с тремя программами поэтапного развития 2003 – 2008 [4], 2009 – 2013 [5] и 2014 – 2020 гг. [6].

В рамках Программы поэтапного развития системы государственной регистрации недвижимого имущества, прав на него и сделок с ним на 2003 – 2008 гг. в Беларуси впервые была создана стройная система организаций по государственной регистрации недвижимого имущества, единый информационный ресурс о недвижимом имуществе – Единый государственный регистр недвижимого имущества (ЕГРНИ), который постоянно пополняется сведениями об объектах недвижимости, расположенных на территории Республики Беларусь. Одним из достижений первого этапа развития системы является создание в Беларуси института регистраторов. Если в мае 2003 г. в организациях по государственной регистрации не было ни одного аттестованного регистратора, то в 2008 г. их было почти 1100. В последние 5 лет численность действующих регистраторов постепенно снижается, что связано с автоматизацией процесса регистрации недвижимости.

Следующие Программы поэтапного развития были направлены на расширение функциональных возможностей и совершенствование технических характеристик системы государственной регистрации.

На рисунке 1 представлен график изменения состава ЕГРНИ с 2008 по 2019 годы [7]. В последние пять лет наблюдается существенное снижение создания объектов недвижимого имущества. Результаты анализа представлены на рисунке 2 [7].

Анализ данных показал, что количество зарегистрированных земельных участков увеличилось на 147%, капитальных строений – на 59%, изолированных помещений – на 64%. В целом, объём сведений увеличился на 82%, но показал существенное снижение создания объектов недвижимого имущества в последние пять лет. Большинство правообладателей оформили права на объекты недвижимости ранее.

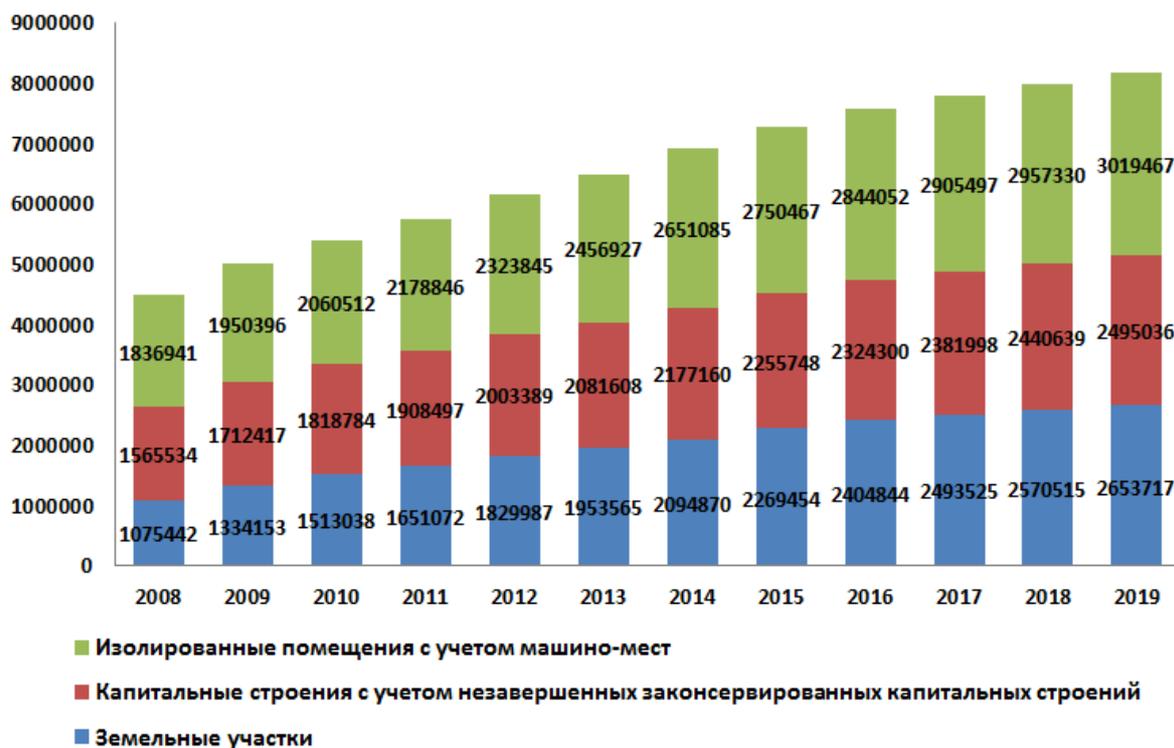


Рисунок 1. – Состав и динамика изменения регистра недвижимости в 2008-2019 годах

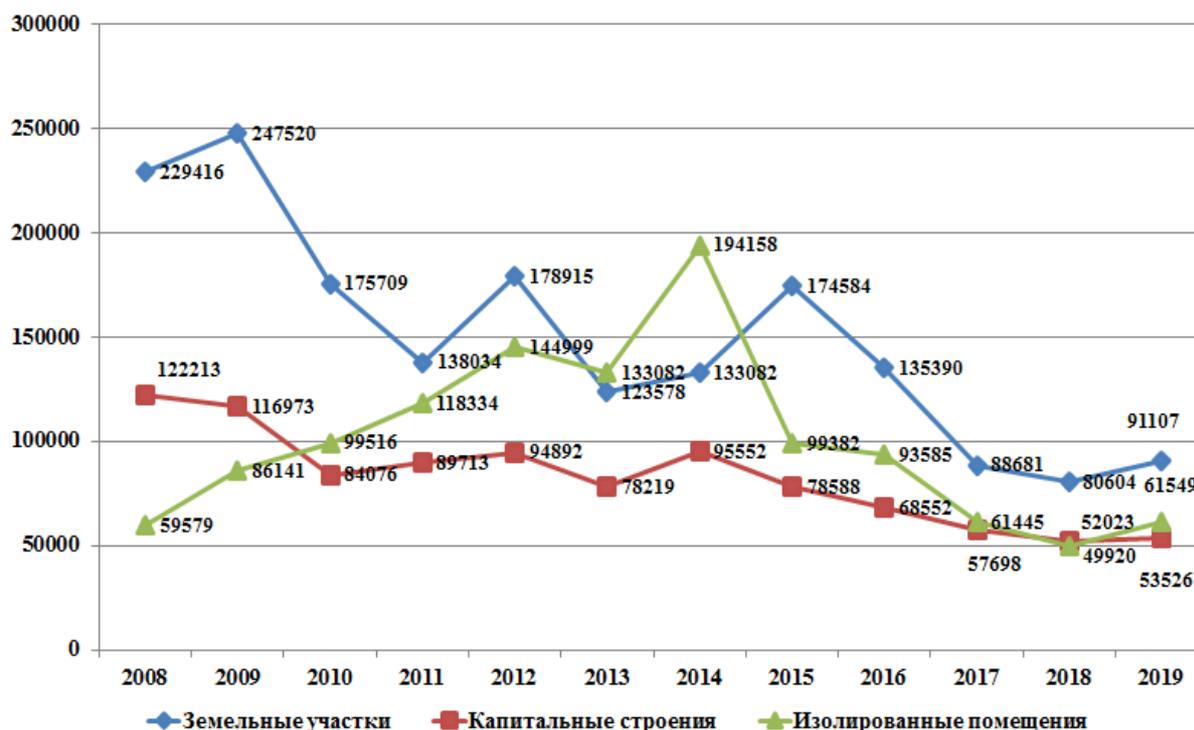


Рисунок 2. – Регистрация создания объектов недвижимого имущества

Одним из показателей активности рынка недвижимости являются сведения об изменении характеристик объектов недвижимости. Информация, представленная на рисунке 3, указывает на заметное увеличение регистрации изменений характеристик земельных участков за последние 5 лет [7].

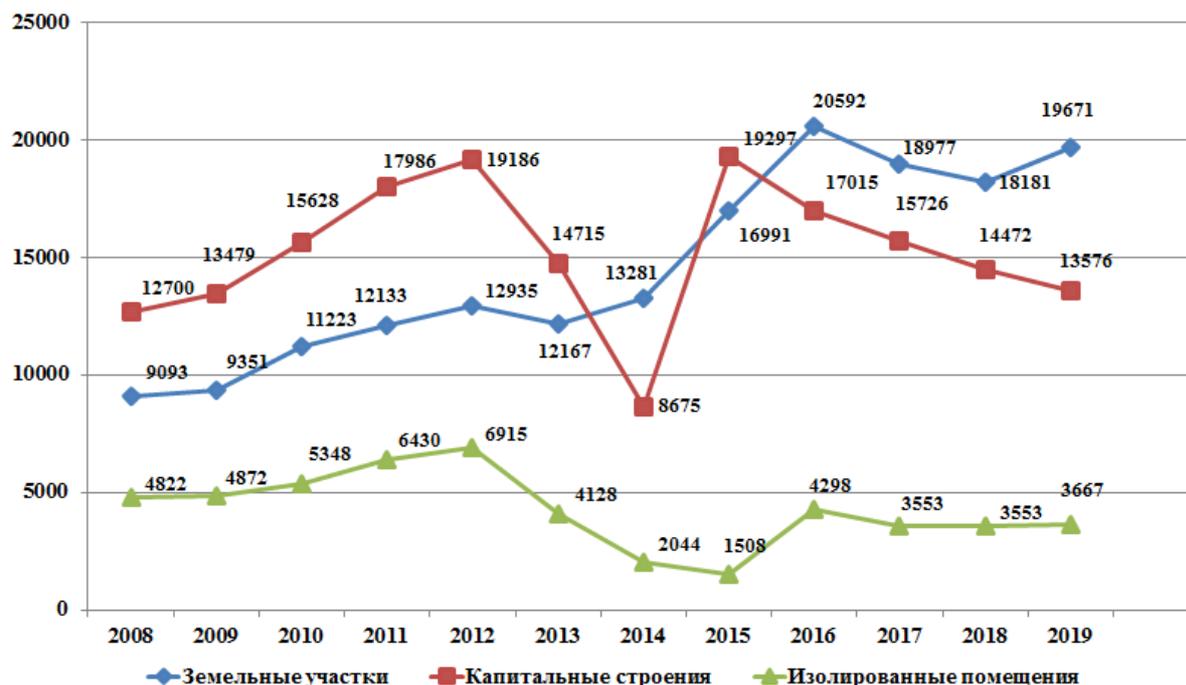


Рисунок 3. – Регистрационные действия по изменению объектов недвижимого имущества

Параметром оценки качества системы управления земельными ресурсами является процент покрытия территории страны зарегистрированными земельными участками. Динамика изменения данного параметра за последние 5 лет представлена на рисунке 4. Стоит отметить, что процент покрытия в 2005 г. составлял лишь 1,5%, сейчас – 85,5% [7].



Рисунок 4. – Процент покрытия территории Республики Беларусь земельными участками на 2013-2019 годы

Анализ развития государственной системы регистрации недвижимости в Республике Беларусь, выполненный на основании отчетов Национального кадастрового агентства, позволяет сделать вывод, что управление качеством совершения регистрационных действий в системе реализовано посредством:

- кадрового обеспечения (действующая комиссия по аттестации регистраторов; институт стажеров-регистраторов; требования к квалификационной характеристике регистраторов; реестр регистраторов);
- управления совершением регистрационных действий (комплекс нормативных правовых актов и документов методологического характера; комплекс мер по дистанционной поддержке принятия решений регистраторами, система обмена электронными документами);

– мониторинга правильности совершения регистрационных действий (мониторинг правильности совершения регистрационных действий, комиссия по рассмотрению результатов мониторинга регистрационных действий);

– повышения квалификации регистраторов (курсы повышения квалификации, техническая учеба) [7].

В 2020 г. система государственной регистрации недвижимости в Республике Беларусь продолжала развиваться с учетом мировой тенденции совершенствования системы электронных архивов и оборота электронных документов и в соответствии с международными стандартами:

– ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements, IDT;

– ISO 15836:2003 Information and documentation – The Dublin Core metadata element set;

– ISO 14721:2012 Space data and information transfer systems – Open archival information system – Reference model;

– ISO 19152:2012 Geographic information – Land Administration Domain Model (LADM).

На основе требований стандарта ISO 9001 в Республике Беларусь создана система управления качеством регистрационных действий. Данная система содержит несколько компонентов, рекомендованных стандартом, таких как:

– система обучения и аттестации регистраторов;

– система методологического руководства регистрационными действиями в целях обеспечения единообразия;

– комиссии по рассмотрению жалоб на действия (бездействия) регистраторов и по контролю над регистрационными действиями;

– юридическая библиотека и др. [8].

На требования стандарта ISO 14721 опирается архивная открытая информационная система (АОИС), которая разрабатывается республиканской организацией по государственной регистрации и состоит из трех подсистем:

1) накопления отсканированных документов;

2) ведения открытого цифрового архива;

3) выдачи информации [9].

В АОИС используется международный стандарт ISO 15 836 как норматив для общесистемного описания информационных ресурсов. Стандарт распространяется на набор элементов данных, постоянно используемых в различных информационных приложениях и разработках [10].

Стандарт ISO 19152:2012 является общим стандартом для систем земельного администрирования. Он стимулирует развитие программных приложений и ускоряет создание систем земельного администрирования, поддерживающих устойчивое развитие. Стандарт предусматривает 2D- и 3D-интеграцию, введение слоев земельной администрации, разработку инфраструктуры пространственной информации, постепенный переход к 3D через гибридные кадастровые системы. Кадастровая 3D-инженерия в Беларуси пока заметно не развивается [11]. Однако, 1 марта 2016 года в Беларуси введен международный стандарт STB ISO/TS 12911-2015 Basic provisions of the guide to information modeling of buildings, который предназначен для строительной отрасли, а именно для информационного моделирования здания или здания трехмерной компьютерной модели объекта строительства [12].

В процессе развития системы государственной регистрации исполнительные информационные модели зданий должны стать основанием государственной регистрации создания/изменения капитальных строений. На сегодняшний день существует определенный барьер – законодательство в отношении административных процедур. Для его преодоления необходимо скорректировать законодательство страны с учетом STB ISO/TS 12 911 и утвердить порядок представления информационных моделей зданий для государственной регистрации.

Развитие системы государственной регистрации недвижимого имущества Беларуси и ее соответствие международным требованиям можно отследить по ежегодным отчетам Всемирного банка «Doing Business». В рейтинге анализируются показатели 190 стран по десяти направлениям, среди которых «Регистрация собственности». Топ-10 стран по показателю «Регистрация собственности» по состоянию на 2019 г. [13] выглядит следующим образом:

1. Катар.
2. Новая Зеландия.
3. Руанда.
4. Литва.
5. Грузия.
6. Эстония.
7. Кыргызстан.
8. Словакия.
9. Швеция.
10. Объединенные Арабские Эмираты.

В настоящее время в рамках показателя «Регистрация собственности» экономика страны оценивается по 4 критериям: количество процедур, срок, стоимость, индекс качества земельного администрирования. Последний, в свою очередь, состоит из пяти индексов: надежность инфраструктуры, прозрачность информации, географический охват, механизм разрешения земельных споров и равный доступ к праву собственности.

Анализ изменения рейтинга Беларуси, а также для сравнения России, Армении и Казахстана по показателю «Регистрация собственности» с 2011 по 2020 гг., представленный на рисунке 5, показал, что Беларусь 9 лет подряд была в десятке стран, обладающих самой развитой системой государственной регистрации недвижимости. Однако в 2020 г. Республика Беларусь заняла 14 место [13].

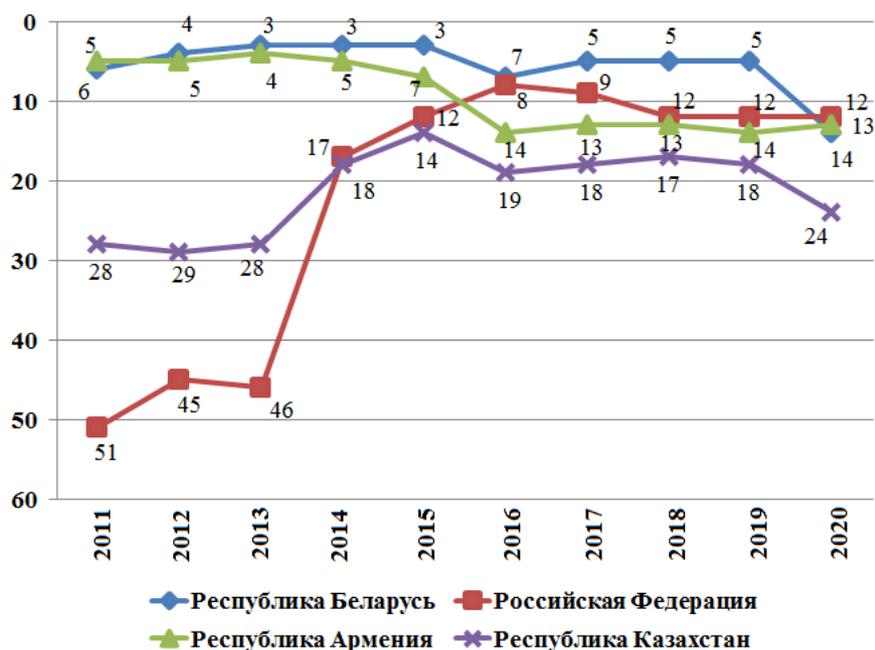


Рисунок 5. – Рейтинг Республики Беларусь, по показателю «Регистрация собственности»

С целью возврата Республики Беларусь в топ-10 необходимо принять ряд мер:

- ускорить проведение государственной регистрации недвижимости, прав на нее и сделок с ней;
- перенести записи о сделках в Минске из отсканированных документов в электронные;
- зарегистрировать все земельные участки, находящиеся в частной собственности.

**Заключение.** Таким образом, система государственной регистрации недвижимого имущества Республики Беларусь стремится к дальнейшему совершенствованию. В настоящее время формируется государственная программа «Земельно-имущественные отношения, геодезическая и картографическая деятельность» на 2021–2025 гг., в рамках реализации которой дальнейшее развитие системы планируется в соответствии с приоритетами развития информационного общества и внедрения информационно-коммуникационных технологий. В том числе технологий сбора и обработки больших массивов данных, данных спутниковых систем связи и навигации, дистанционного зондирования Земли и цифровых карт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Country Report 2003. Denmark. [Electronic recourse]. – Mode of access: <http://www.cadastraltemplate.org/countryreport/Denmark-11Apr2003.doc>. – Date of access: 22.05.2020.
2. Country Report 2011. Sweden. [Electronic recourse]. – Mode of access: <http://www.cadastraltemplate.org/countryreport/Sweden-1Jul2011.doc>. – Date of access: 26.05.2020.
3. Country Report 2010. The Netherlands. [Electronic recourse]. – Mode of access: <http://www.cadastraltemplate.org/countryreport/Netherlands-7Sep2010.doc>. – Date of access: 24.05.2020.
4. Об утверждении Программы поэтапного развития системы государственной регистрации недвижимого имущества, прав на него и сделок с ним на 2003 – 2008 годы [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 12 мая 2003 г., № 5/12415 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by>. – Дата доступа 15.05.2020.

5. Об утверждении Программы развития системы государственной регистрации недвижимого имущества, прав на него и сделок с ним на 2009 – 2013 годы [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 9 марта 2009 г., № 294 / Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by>. – Дата доступа 15.05.2020.
6. Программа развития системы государственной регистрации недвижимости продлевается до 2020 года, 22 окт. 2018 года [Электронный ресурс] // Белорусское телеграфное агентств. – Режим доступа: <https://www.belta.by/>. – Дата доступа 24.04.2020.
7. Сводные показатели государственной регистрации недвижимого имущества, прав на него и сделок с ним в Республике Беларусь 2010 – 2019 [Электронный ресурс] // Национальное кадастровое агентство. – Режим доступа: <http://.nca.by>. – Дата доступа: 18.04.2020.
8. ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements, IDT.
9. ISO 14721:2012 Space data and information transfer systems – Open archival information system – Reference model.
10. ISO 15836:2003 Information and documentation – The Dublin Core metadata element set.
11. ISO 19152:2012 Geographic information - Land Administration Domain Model (LADM).
12. STB ISO/TS 12911-2015 Basic provisions of the guide to information modeling of buildings.
13. «Doing Business» report [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.doingbusiness.org/>. – Access date: 05.18.2020.

*Поступила 15.12.2020*

**SYSTEM OF STATE REGISTRATION OF REAL ESTATE PROPERTY  
OF THE REPUBLIC OF BELARUS AND ITS COMPLIANCE  
WITH INTERNATIONAL STANDARDS**

**V. BONDARENKO**

*This article compares the system of state registration of real estate in the Republic of Belarus with similar systems in other countries. The results of the analysis of the compliance of this system with international standards and the prospects for its further development are presented.*

**Keywords:** *state registration; real estate; international standards; real estate management.*

УДК 004.942:528.2/3

## ГИС-ПРОЕКТ «ГЕОДИНАМИКА БЕЛАРУСИ»

П.С. ДОЛГИЙ

(Полоцкий государственный университет)

Статья посвящена ГИС-проекту «Геодинамика Беларуси», разрабатываемому в рамках диссертационного исследования с целью представления данных различных наук о Земле (геодезии, геологии, геофизики, сейсмологии) в единую тематическую базу данных. Проект содержит не только сведения о геолого-тектоническом строении территории Беларуси, сейсмичности и деформациях земной коры, вызванных эндогенными процессами, но и отражает влияние на природную геодинамику техногенных факторов: разработка месторождений полезных ископаемых, строительство и эксплуатация ГЭС, магистральных трубопроводов (МТ). В проекте представлены также данные дистанционного зондирования, цифровые модели рельефа, результаты наблюдений со станций спутниковой сети точного позиционирования (ССТП) Республики Беларусь с полигонами интереса, построенными для исследования явлений и объектов, представляющих геологическую опасность с возможными неблагоприятными последствиями для экологии окружающей среды. На примере станций Гомельского полигона продемонстрирована возможность визуализации в ГИС компонентов деформации, расчет которых произведен в интерактивной среде разработки на языке Python jupyter; визуализация характеристик дилатации выполнена с помощью градуированных знаков, а величин максимального и минимального растяжений – с помощью генератора геометрии.

**Ключевые слова:** ГИС-проект, геодинамика, повторные геодезические измерения, компоненты деформации, представление геодинамических явлений в ГИС, генератор геометрии QGIS.

**Перечень принятых сокращений:** ГИС – географическая информационная система; СВДЗК – современные вертикальные движения земной коры; ДДЗ – данные дистанционного зондирования; СВДЗК – современные вертикальные движения земной коры; ЦМР – цифровая модель рельефа; ССТП – спутниковая система точного позиционирования; ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система; СК – система координат; ITRS – International Terrestrial Reference System; IGS – International GNSS Service; EPN – European Permanent Network.

**Введение.** Геодинамика – сложная научная дисциплина, требующая междисциплинарного подхода в среде различных наук о Земле [1]. ГИС-технологии могут выступать удобным инструментом для структурирования разнородных данных, планирования исследований. Нами в рамках диссертационного исследования разрабатывается ГИС-проект по тематике геодинамики Беларуси, включающий данные различного рода. В него входят объекты, вызывающие интерес с точки зрения тектонической активности как природного, так и техногенного происхождения: разломы кристаллического фундамента и платформенного чехла различной глубины, возраста и генезиса; космолинеаменты, кольцевые структуры; разрабатываемые месторождения полезных ископаемых, приуроченные, как правило, к активным тектоническим структурам; ответственные инженерные сооружения (атомные и гидроэлектростанции, магистральные трубопроводы), которые подвержены влиянию движений земной коры и в случае аварии могут нанести серьезный ущерб окружающей среде.

**Основная часть.** В качестве платформы выбран свободный ГИС-продукт QGIS. С точки зрения сбора, представления, визуализации геопространственных данных и большинства видов анализа QGIS ни в чем не уступает коммерческим ГИС-пакетам (рисунок 1). В свободном доступе находится исходный код продукта, множество дополнительных модулей, программный интерфейс для их разработки.

Рассмотрим подробнее структуру проекта. В зависимости от тематики слои проекта группируются в составные слои.

В качестве карты-подложки проекта использована карта OpenStreetMap, представленная в тайловом виде (при масштабировании и перемещении вида автоматически загружается нужный фрагмент карты). Добавить такой набор данных в QGIS можно с помощью дополнительного модуля QuickMapServices.

Составной слой «Инженерные объекты» включает линейные слои трубопроводов: газопроводы и нефтепроводы, а также точечные слои электростанций и месторождений полезных ископаемых. Инженерную инфраструктуру Беларуси нельзя рассматривать в отрыве от инфраструктуры сопредельных государств. Например, нефтепровод «Дружба» проходит по территории Российской Федерации, Беларуси, Украины, Литвы, Польши и пересекает различные активные тектонические структуры, например, Речицкий и Стоходско-Могилёвский разломы. Ряд публикаций показывает, что в местах пересечения наблюдается повышенная аварийность [2–4]. В дальнейшем в рамках ГИС-проекта планируется вносить информацию об авариях в отдельный слой «Аварии» с атрибутами даты и краткой характеристикой, указанием объемов разлива. Объекты закоординированы на основе общедоступной информации.

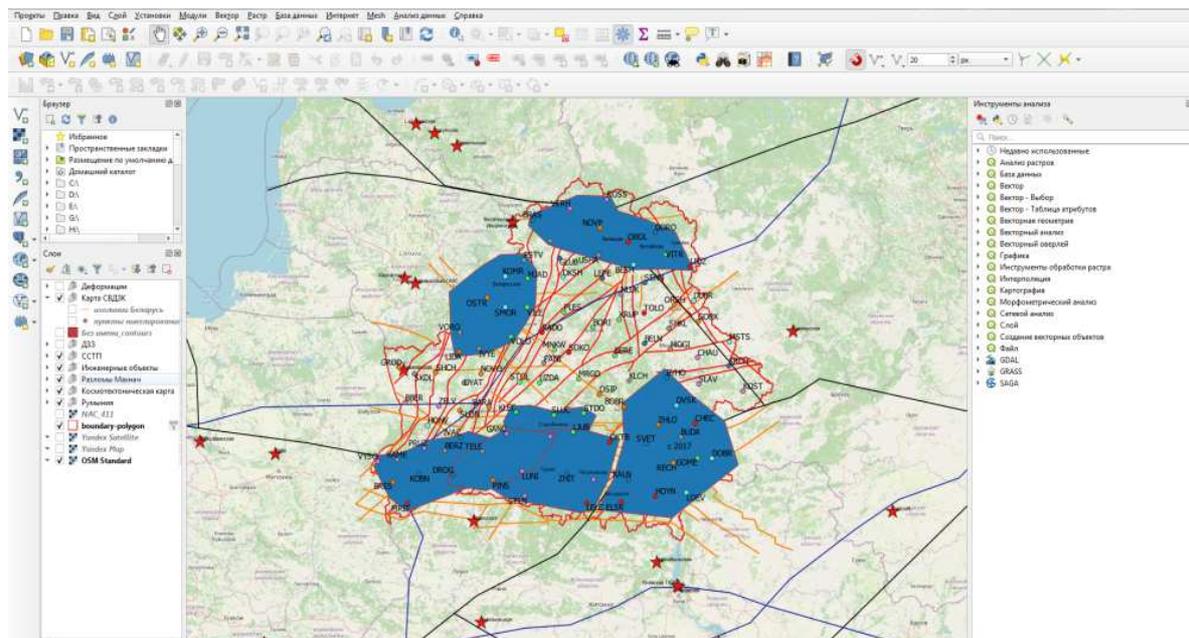


Рисунок 1. – Общий вид ГИС-проекта

Составной слой «Разломы Махнач» включает информацию о разломах земной коры из монографии «Геология Беларуси» [5]. Представлены растровые карты структурообразующих, постконсолидационных разломов кристаллического фундамента, разломов платформенного чехла, а также разломы в векторном виде. Карты получены путем конвертации pdf-страниц в изображение и геопривязаны в ГИС к карте-подложке по координатной сетке, либо, при её отсутствии, по административным границам Беларуси и пунсонам городов. Перевод объектов в векторный вид осуществлялся с помощью стандартных инструментов оцифровки QGIS. Атрибуты векторных объектов разломов: название, возраст заложения, длина, азимут простирания.

Составной слой «Кристаллический фундамент» включает растровые карты кристаллического фундамента, изогипсы и отметки поверхности фундамента в векторном виде с атрибутами высоты, цифровые модели поверхности фундамента в виде растров и триангулированных поверхностей. Получение, геопривязка, оцифровка данных осуществлялись аналогично описанному выше.

Составной слой «Космотектоническая карта» включает геопривязанную космотектоническую карту Беларуси [6] в растровом виде; линейные слои космолинеаментов и кольцевых структур; полигональные слои блоков и мегаблоков, ограниченных космолинеаментами. Атрибуты: название блока (мегаблока).

Составной слой «Карта СВДЗК» построен на основе «Карты современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР» 1989 года [7]. Включает растровую карту, векторные отметки и изолинии СВДЗК с атрибутами соответствующих величин.

В составной слой «ДЗЗ» объединены данные дистанционного зондирования из различных источников и различного разрешения: от свободно распространяемых данных landsat-8, которые имеют низкое разрешение, но высокую информативность благодаря большому числу каналов, в том числе в тепловом инфракрасном диапазоне, до фрагмента данных российского спутника Ресурс-П.

Составной слой «ЦМР» представляет фрагменты различных свободно распространяемых цифровых моделей рельефа.

В составном слое «ССТП» представлена информация о станциях спутниковой сети точного позиционирования Республики Беларусь. Станции ССТП показаны в виде точечных объектов. Атрибуты: четырехбуквенный код станции, дата начала наблюдений. Спутниковая сеть точного позиционирования создается в Республике Беларусь с 2010 г. как составная часть государственной геодезической инфраструктуры, что дает возможность воспроизводить в режиме реального времени и с высокой точностью Международную общеземную систему координат ITRS, а также используемые в государстве системы координат, например, СК-95 и местные системы координат. По состоянию на конец 2020 г. система насчитывает 98 постоянно действующих пунктов. Все пункты установлены на зданиях, преимущественно малой этажности. Это допускается согласно рекомендациям к эксплуатации пунктов IGS и EPN [8–10] и позволяет обеспечить необходимые условия для эффективного функционирования сети: сохранность дорогостоящего оборудования, непрерывное электропитание, непрерывный доступ к сетям передачи данных открытый горизонт для приема сигналов от спутников GNSS. Центры пунктов представляют собой ар-

мированный железобетонный столб сечением 40 × 40 см, снабженный устройством принудительного центрирования. Столб устанавливается в углубление в несущей стене здания, которое заливается цементным раствором. Дополнительную стабильность обеспечивают два металлических стержня, расположенные внутри раствора крестообразно. Таким образом, надстройку для установки антенны можно считать единым целым со стеной [11; 12].

К слою станций в ГИС-проекте применен метод отображения «Уникальные значения». Таким образом, станции отображены различным цветом в зависимости от даты начала наблюдений.

Во время обучения в аспирантуре автором статьи получен грант Министерства образования, средства которого частично потрачены на приобретение данных для исследований: измерительной информации с постоянно действующих пунктов спутниковой сети точного позиционирования Республики Беларусь и данных дистанционного зондирования. Перед покупкой необходимо было провести тщательное планирование: выделить полигоны интереса, понять, какие станции и базовые линии между ними позволят опросить активные тектонические структуры и другие объекты интереса.

В итоге выделено 7 полигонов интереса, представленных в составном слое «ССТП» в полигональном виде (таблица 1, см. рисунок 1).

Таблица 1. – Полигоны интереса для исследования современных движений земной коры по данным повторных ГНСС-наблюдений

Полигон	Станции ССТП	Временной промежуток данных	Объекты интереса
Полоцкий	Браслав, Верхнедвинск, Россонь, Шарковщина, Новополоцк (исходный), Ушачи, Оболь, Бешенковичи, Городок, Витебск, Лиозно	2016 – 2020 гг.	Полоцкий, Чашникский, Бешенковичский, Туровлянский, Витебский разломы; участок нефтепровода Унеча – Полоцк; Полоцкая, Витебская ГЭС, месторождение Гралёво
Островецкий	Островец, Комарово, Мядель, Вилейка, Воложин, Сморгонь, Ивье, Вороново, Вильнюс (исходный)	2017 – 2020 гг.	Ошмянский, Мядельский, Налибокский разломы, Белорусская АЭС
Брестский	Высокое, Брест (исходный), Каменец, Малорита, Кобрин, Пружаны, Берёза, Дрогичин, Ивацевичи, Телеханы, Пинск	2016 – 2020 гг.	Каменецкий, Ореховский, Пружанский, Северо-Ратновский разломы, участок нефтепровода «Дружба»
Пинский	Пинск (исходный), Дрогичин, Телеханы, Лунинец, Ганцевичи, Старобин	2015 – 2020 гг.	Стоходско-Могилёвский разлом
Житковичский	Пинск, Телеханы, Ганцевичи, Старобин, Лунинец, Столин, Житковичи, Любань (исходный), Октябрьский, Петриков, Лельчицы	2015 – 2020 гг.	Участок нефтепровода «Дружба», разломы Припятского прогиба, месторождения Гранит, Петриковское
Гомельский	Бобруйск, Быхов, Довск, Чечерск, Жлобин, Буда-Кошелёво, Светлогорск, Октябрьский, Петриков, Лельчицы, Ельск, Калинковичи, Хойники, Лоев, Речица, Гомель (исходный), Добруш	2017 – 2020 гг.	Участок нефтепровода «Дружба», разломы Припятского прогиба, Мозырьское месторождение каменной соли, нефтяные месторождения
Слуцкий	Ганцевичи, Клецк, Слуцк, Старобин, Любань (исходный), Старые Дороги	2014 – 2020 гг.	Стоходско-Могилёвский разлом, Старобинское месторождение калийных солей

Для указанных в таблице 1 станций закуплены (договор № 12747/ПДП/20 от 24.04.2020 г. между РУП «Белгеодезия» и Полоцким государственным университетом) файлы наблюдений в формате RINEX 2.10 продолжительностью 6 ч и с дискретностью в 15 с на дату 30 сентября соответствующего года.

Формат RINEX (Receiver INdependent EXchange format – обменный формат, независимый от приёмника) является общим форматом для хранения данных ГНСС-измерений. Удобство использования состоит также в том, что формат является текстовым, а значит, файлы можно просматривать в текстовом

редакторе, а также считывать с помощью пользовательских программных модулей. Полный набор данных для одной станции в одну эпоху измерений состоит из файла наблюдений с расширением \*.YYo, где YY – год наблюдений, и файлов-эфемерид, расширение которых отличается для различных ГНСС:

- .YYn – GPS;
- .YYg – ГЛОНАСС;
- .YYc – BeiDou;
- .YYl – Galileo;
- .YYj – QZSS;
- .YYi – IRNSS;
- .nav – смешанные эфемериды.

В версии RINEX 2.10 доступны только данные GPS и ГЛОНАСС [12], поэтому, каждый набор данных в нашем случае состоит из трех файлов.

К исследованию дополнительно привлекаются данные станций, включенных в европейскую сеть EUREF (суточные наблюдения с дискретностью 30 с) [14].

Обработка измерений выполняются в программном продукте Trimble Business Center (далее – ТВС).

После импорта данных выбираем интересующие нас векторы, создавая сеть из треугольников. При этом предпочтение отдается более коротким векторам и треугольникам с формой, максимально приближенной к правильной. После вычисления базовых линий и уравнивания сети получаем отчет в формате .html. В отчете представлены уравненные плоские координаты, координаты в общеземной системе и геодезические координаты. Такой формат вывода неудобен для анализа стандартными программными продуктами, поэтому для дальнейшего анализа используем скрипты на языке Python (версия 3.8, интерактивная среда разработчика jupyter). Среди преимуществ среды jupyter можно выделить то, что её интерфейс строится на основе веб-браузера, позволяющего осуществлять вывод результатов в удобочитаемом виде. Программный код записывается в ячейки (cells), и каждая из них может запускаться на выполнение независимо. Причем, значения переменных, полученные в результате работы ячейки, доступны в других ячейках. В нашем случае это позволило вначале рассчитать значения для всех эпох, а затем, в другой ячейке, выбирая по две эпохи, вычислять разности между ними.

Используя прямоугольные координаты, вычислим горизонтальные длины линий, а по координатам в общеземной системе – наклонные дальности.

Связывать между собой станции, базовые линии и треугольники в программе на языке Python удобно с помощью пользовательских классов. Станции представлены объектами класса Station с координатами в различных системах, точностью их определения к эпохе, которой соответствуют значения координат в качестве свойств. Для базовых линий разработан пользовательский класс BaseLine, который имеет свойства:

- .begin (начальная станция, объект класса Station);
- .end (конечная станция, объект класса Station);
- .year (эпоха, которой соответствует базовая линия);
- .tilted\_dist (наклонная дальность);
- .plane\_dist (плоское расстояние);
- .ellipsoid\_dist (эллипсоидальное расстояние).

Для эпох используется встроенный целочисленный класс int, а для координат и наклонных дальностей – numpy.float. Использование объектов numpy.float вместо встроенных float позволяет получать результаты операций над вещественными числами с более высокой точностью.

В исходном отчете ТВС не представлено деление сети на треугольники, поэтому далее в скрипте реализован алгоритм поиска треугольников по известным базовым линиям. Вначале находим тройки базовых линий, имеющих общие начальные и конечные точки. Далее проверяем, не попадает ли какая-либо станция ССТП, за исключением станций, лежащих в вершинах, внутрь треугольника. Используя полученные координаты вершин треугольника, создаем объект пользовательского класса Triangle со свойствами: набор (встроенный класс set) базовых линий, образующих треугольник (объектов класса BaseLine), аналогично набор вершин (объектов класса Station) эпохи, которой соответствует треугольник.

Далее программа запрашивает две эпохи, для которых следует проводить расчеты.

Найдя соответствие между базовыми линиями и треугольниками в разные эпохи, программа производит вычисление разностей наклонных дальностей для базовых линий и компонентов деформации для треугольников: дилатации  $Q$ , максимального  $E1$  и минимального  $E2$  растяжения, максимального сдвига  $\gamma_m$ , направлений максимального и минимального растяжений  $\varphi_{E1}$ ,  $\varphi_{E2}$  следующим образом.

Нам известны плоские координаты станций, образующих треугольник:  $X_i$ ,  $Y_i$  а также их изменения  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  в последующую эпоху. Рассматривая деформацию в пределах треугольника как однородную, выразим величины  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  в виде системы линейных уравнений [15]:

$$\begin{cases} \Delta X_1 = X_1 e_{11} + Y_1 e_{12} + a \\ \Delta Y_1 = X_1 e_{21} + Y_1 e_{22} + b \\ \Delta X_2 = X_2 e_{11} + Y_2 e_{12} + a \\ \Delta Y_2 = X_2 e_{21} + Y_2 e_{22} + b \\ \Delta X_3 = X_3 e_{11} + Y_3 e_{12} + a \\ \Delta Y_3 = X_3 e_{21} + Y_3 e_{22} + b \end{cases} \quad (1)$$

где  $a, b$  – величины поступательного перемещения по осям  $X, Y$ ;  
 $e_{11}, e_{12}, e_{21}, e_{22}$  – компоненты тензора второго ранга на плоскости, относящегося к центру треугольника:

$$|T_{ij}| = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Таким образом, имеем 6 уравнений с 6 неизвестными, значит, если определитель матрицы коэффициентов не равен нулю, система совместна и может быть решена.

Для реализации решения на языке python составляем матрицу (объект класса `numpy.matrix`) коэффициентов размерностью 6 на 6 и вектор свободных членов  $\Delta X_i, \Delta Y_i$ . Решаем систему с помощью функции `numpy.linalg.solve` и в результате получаем вектор решения в виде списка (объект встроеного класса `list`) вида  $[e_{11}, e_{12}, e_{21}, e_{22}, a, b]$ . Имея значения элементов тензора, вычисляем компоненты деформаций:

$$Q = \frac{e_{11} + e_{22}}{2}. \quad (3)$$

$$E1 = Q + \frac{1}{2} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{12} + e_{21})^2}. \quad (4)$$

$$E2 = Q - \frac{1}{2} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{12} + e_{21})^2}. \quad (5)$$

$$\gamma_m = E1 - E2 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}, \quad (6)$$

$\gamma_1 = (e_{11} - e_{22}), \gamma_2 = (e_{12} + e_{21})$  – компоненты сдвига.

$$\varphi_{E1, E2} = \frac{1}{2} \arctg\left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) + A^\circ \quad (7)$$

При  $\gamma_1 > 0, A = 90^\circ$ ; при  $\gamma_1 < 0, A = 0$ .

Вычисленное направление может быть как направлением максимального  $\varphi_{E1}$ , так и минимального растяжения  $\varphi_{E2}$ . Чтобы однозначно определить смысл полученного по формуле (7) значения, выполним проверку условия: если  $Q > 0$  и  $|Q| > \gamma_m$ , то полученное значение является направлением минимального растяжения, иначе – максимального [16]. Направления максимального и минимального растяжений взаимно перпендикулярны.

Используя Python-библиотеку `Pyshp`, которая позволяет записывать шейп-файлы – векторный формат геоданных, поддерживаемый всеми современными ГИС, создаем шейп-файл треугольников. В качестве геометрии берем координаты станций, образующих треугольник, а в атрибутивную таблицу добавляем по полю для каждого компонента деформаций. В отдельное текстовое поле запишем смысл направления  $\varphi$ : «max» либо «min». Добавляем полученные треугольники в ГИС-проект и помещаем в новый составной слой «Деформации», где создаем составные подслои для каждого исследуемого полигона. Применяем к слою метод отображения Градуированный знак по значениям дилатации. Выбираем двухцветный цветовой градиент: оттенки синего для отрицательных значений, оттенки красного – для положительных. Количество классов – 8. Применим полупрозрачность для слоя треугольников, чтобы можно было видеть подложку и разломную сеть сквозь этот слой.

Величины максимального и минимального растяжения отобразим стрелками с помощью встроеного генератора геометрии QGIS (Geometry generator) (рисунок 2). Geometry generator предоставляет широкие возможности для визуализации данных и построения нестандартных условных знаков. Он работает на основе специального языка выражений, близкого к функциональному языку программирования. Язык располагает большим набором стандартных функций для различных операций с пространственными

ми и атрибутивными данными, а кроме того, стандартный набор функций может быть дополнен пользовательскими функциями на языке Python [17].

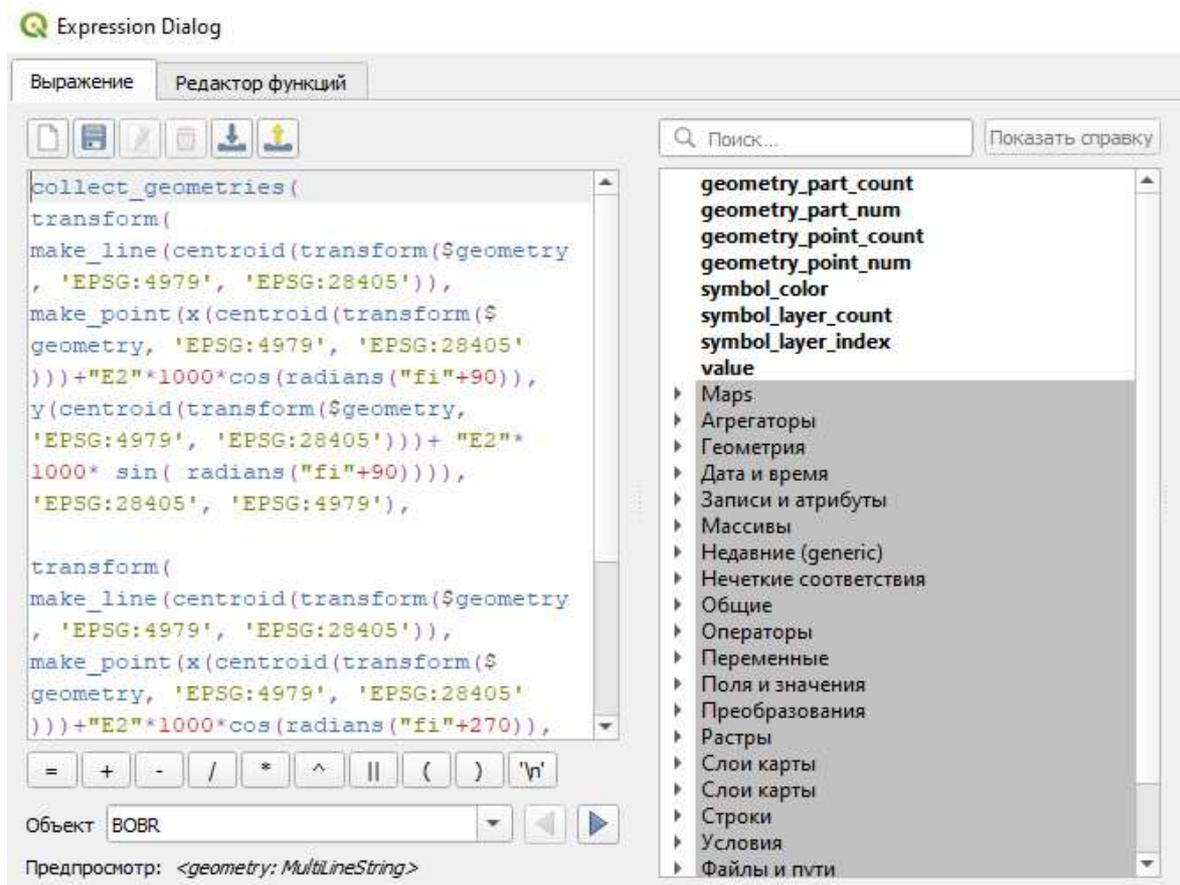


Рисунок 2. – Генератор геометрии QGIS

Остановимся подробнее на некоторых использованных в нашем проекте функциях.

Функция **collect\_geometries** позволяет создать массив отображаемых пространственных объектов.

Использование функции **transform** необходимо, поскольку исходный слой треугольников использует географическую систему координат с градусными единицами измерения, соответственно, построения в рамках этого слоя выполняются также в градусах. Чтобы выполнить построение в метрах, необходимо сначала трансформировать пространственные объекты в прямоугольную систему координат (в нашем случае – Гаусса-Крюгера 35-й зоны), а затем заново трансформировать построенные объекты в географическую СК для корректного отображения.

Функция **make\_line** возвращает пространственный объект линии. На вход в качестве аргументов принимает пространственные объекты точек, создаваемых с помощью функции **make\_point**. Функция **centroid** возвращает центр масс полигонального объекта. Функции **x** и **y** – соответствующие значения координат точечного объекта.

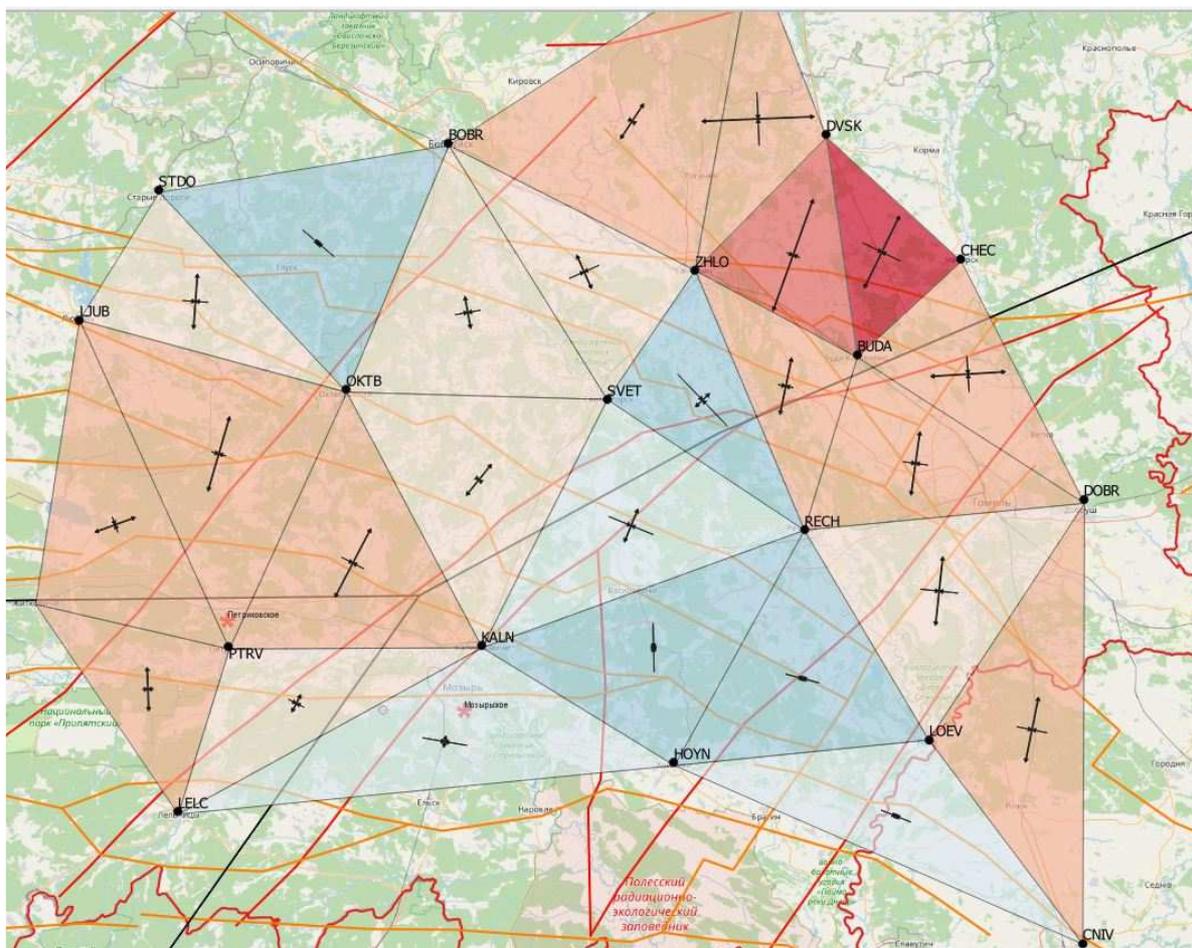
В качестве начала стрелок выбираем центр треугольника, а координаты окончания рассчитываем по формулам:

$$x = x_{\text{ц}} \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

$$y = y_{\text{ц}} \cdot \sin \varphi \quad (9)$$

где  $x_{\text{ц}}$ ,  $y_{\text{ц}}$  – координаты центра треугольника;  
 $\varphi$  – направление.

На рисунке 3 приведен пример визуализации компонент деформации в ГИС. Стили отображения сохраняем в файл стилей с расширением \*.QML, чтобы впоследствии можно было применить аналогичный стиль для других полигонов и эпох.



**Рисунок 3. – Пример визуализации компонент деформации в QGIS для Гомельского полигона за 2017 – 2018 гг. Масштаб стрелок растяжения и сжатия условный**

**Заключение.** Таким образом, ГИС-проект позволяет объединить данные различного рода, полученные из различных источников, помогает наиболее эффективно реализовать междисциплинарный подход. Можно выделить две главные функции ГИС-проекта: с одной стороны, он помогает планировать исследования, помогает в подборе необходимых данных; с другой – позволяет представить результаты в удобочитаемом виде, помогает в их интерпретации. Использование программного продукта QGIS и языка программирования Python дает широкие возможности для интеграции с другими программными продуктами. Генератор геометрии QGIS позволяет разрабатывать новые, нестандартные условные обозначения. ГИС-проект нельзя считать законченным: он будет непрерывно пополняться по мере проведения новых исследований по данной теме и получения новых результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шароглазова, Г.А. Многодисциплинарный подход к моделированию геодинамических процессов / Г.А. Шароглазова, П.С. Долгий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 179–183.
2. Геолого-тектонические условия возникновения аварийности на магистральных нефтепроводах Белоруссии / Г.А. Шароглазова [и др.] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2008. – № 1. – С. 58–60.
3. Оценка техноприродных и социально-экологических рисков возникновения ЧС на магистральных продуктопроводах Пермского Приуралья / В.В. Михалев [и др.] // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2005. – № 1. – С. 75–77.
4. Ульмасвай, Ф.С. Геологические условия возникновения зон потенциальной аварийности магистральных газопроводов на севере Западной Сибири / Ф.С. Ульмасвай // Газовая промышленность – 1997 – № 7. – С. 37–38

5. Махнач, А.С. Геология Беларуси / А.С. Махнач, Р.Г. Гарецкий, А.В. Матвеев – Минск : Ин-т геологических наук НАН Беларуси, 2001. – 815 с.
6. Космотектоническая карта Беларуси масштаба 1 : 500 000: создание и результаты / Р.Г. Гарецкий [и др.] // Литасфера. – 2013. – № 1. – С. 3–30.
7. Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР [Карты]: карта / сост. и подгот. к печати Главным управлением по геодезии и картографии СССР в 1989 г. – 1:5000000, 50 км в 1 см. – М. : гл. управление по геодезии и картографии СССР, 1989. – 4 л.
8. Current IGS Site Guidelines, August 05, 2016 [Electronic resource] // International GNSS Service. – 2016. Mode of access: <http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>. – Date of access: 01.05.2020.
9. Monumentation Recommendations, August 31, 2015 [Electronic resource] // International GNSS Service. – 2015. – Mode of access: <http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202094816>. – Date of access: 01.05.2020.
10. Guidelines for EPN Stations&Operatiojnal Centres, last updates 26-10-2015 [Electronic resource] / C.Bruyninx // Munich, EPN Central Bureau.– 2015. – Mode of access: [http://www.epncb.oma.be/\\_documentation/guidelines/guidelines\\_stations\\_operationalcentre.pdf](http://www.epncb.oma.be/_documentation/guidelines/guidelines_stations_operationalcentre.pdf). – Date of access: 01.05.2020.
11. Рудницкая, Н.А. Спутниковая система точного позиционирования как часть государственной геодезической инфраструктуры Республики Беларусь / Н.А. Рудницкая // Земля Беларуси – 2016. – № 3 – С. 40 – 46.
12. ССТП РБ [Электронный ресурс] // Белгеодезия. – Режим доступа: <https://geo.by/sstp/>. – Дата доступа: 01.05.2020.
13. Общий формат ГНСС-данных RINEX [Электронный ресурс] // Ориент Системс. – Режим доступа: <https://orsyst.ru/blog15>. – Дата доступа: 15.11.2020.
14. EUREF Permanent GNSS Network [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://epncb.oma.be/\\_networkdata/stationlist.php](https://epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php). – Дата доступа: 20.10.2020 г.
15. Есиков, Н.П. Определение деформаций земной поверхности по непосредственно измеренным элементам геодезических сетей / Н.П. Есиков // Современные движения и деформации земной коры на геодинамических полигонах. – М. : Наука, 1979. – 152 с.
16. Остач, О.М. Методическое руководство по геодезическим работам на геодинамических полигонах / О.М. Остач, В.Н. Дмитроиченков. – М. : ЦНИИГАиК, 1984.
17. Жесткий цигун с условными знаками или зачем нужен geometry generator [Электронный ресурс] // Хабр. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/504986/>. – Дата доступа: 15.11.2020.

Поступила 10.12.2020

## GIS-PROJECT “GEODYNAMICS IN BELARUS”

*P. DOLHI*

*The article is devoted to the GIS project "Geodynamics in Belarus", developed within the framework of a dissertation research in order to present data from various Earth Sciences (geodesy, Geology, Geophysics, seismology) in a single thematic database. The project contains not only information about the geological and tectonic structure of the territory of Belarus, seismicity and deformations of the earth's crust caused by endogenous processes, but also the influence of technogenic factors on natural geodynamics: development of mineral deposits, construction and operation of hydroelectric power stations, main pipelines (MP). The project also presents remote sensing data, digital terrain models, and results of observations from the stations of the satellite network of precise positioning (SNPP) of the Republic of Belarus with polygons of interest built for the study of phenomena and objects that pose a geological hazard with possible adverse consequences for the environment. Using the example of the stations of the Gomel polygon, the possibility of visualization of deformation components in GIS is demonstrated, the calculation of which is performed in an interactive development environment in python jupyter; visualization of dilation characteristics is performed using graduated signs, and the values of maximum and minimum extensions are performed using a geometry generator.*

**Keywords:** GIS project, geodynamics, repeated observations, deformation components, GIS- representation of geodynamic phenomena, QGIS geometry generator.

УДК 528.087: 004.588

**РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИМУЛЯТОРОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

**П.Ф. ПАРАДНЯ, М.С. МЫСЛИВЕЦ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Статья посвящена использованию программных симуляторов в образовательном процессе, отмечаются основные преимущества такого использования. Даны характеристики трех модулей, составляющих виртуальные симуляторы. Авторами разработан учебно-тренировочный симулятор оптических теодолитов для обучения и тестирования знаний в рамках изучения геодезических дисциплин. Его программная реализация выполнена на языке программирования высокого уровня Python. Рассматривается принцип работы созданной базовой версии программы, ориентированной на изучение шкаловых отсчетных устройств теодолитов типа 2Т5К и 2Т30, а также разрабатываемой расширенной версии, предназначенной для моделирования процесса измерений при производстве тахеометрической съемки.*

**Ключевые слова:** образовательный процесс, симулятор, теодолит, отсчётные устройства, Python.

**Введение.** Одной из основных форм организации учебного процесса при реализации образовательных программ высшей школы являются лабораторные и практические занятия [1]. Они подразумевают освоение и закрепление теоретического материала. Однако, для технических специальностей есть ряд причин, из-за которых снижается эффективность данного вида работы:

- некоторые учебные заведения имеют недостаточное количество оборудования, особенно дорогостоящего, что препятствует его одновременному массовому использованию;
- студенты не успевают освоить приборы и технологии за отведенное для этого на занятиях время.

Решению указанных проблем способствует внедрение в учебный процесс компьютерных программ-симуляторов оборудования, в том числе и геодезического. Это дает уменьшение нагрузки на преподавателей, сокращение затрат на приобретение оборудования, отсутствие износа приборов, возможность их изучения вне учебных занятий. Особую актуальность использование симуляторов приобретает в связи с переходом отдельных учебных заведений на дистанционный режим обучения, что естественным образом затрудняет выполнение практических работ с приборами, а тем более прохождение студентами учебных практик.

В геодезическом производстве в настоящее время используется широкий спектр приборов, начиная от простых оптических теодолитов и нивелиров, и заканчивая дорогостоящими лазерными сканерами и электронными тахеометрами. Для изучения последних разработано достаточное количество симуляторов, таких как Simulator GeoMax, DTM Simulator, Sdr33 PC Emulator, TPS 1200 PC Simulator и др. Однако, для аналоговых оптических приборов достойных внимания симуляторов не выявлено. Поэтому авторами была поставлена задача создания учебно-тренировочного симулятора оптических теодолитов под названием «Countdown ТНЕО».

**Основная часть.** Использование виртуальных симуляторов позволяет решать следующие задачи [2]:

- Ознакомление обучаемого с внешним видом прибора, внутренним его устройством и режимами работы.
- Отработка навыков выполнения основных операций на виртуальной модели как на реальном приборе.
- Фиксирование ошибочных действий и контроль устранения таковых.
- Оценивание уровня полученных знаний и учёт результатов подготовки обучаемых.

Виртуальные симуляторы обычно состоят из трех модулей – ознакомительного, обучающего и информационно-аналитического. Ознакомительный модуль включает и воспроизводит общие сведения о приборе, внешний вид прибора и элементы управления им с соответствующими названиями, функциональное назначение составных частей прибора, принцип действия и основные характеристики, закрепление полученной теории с помощью тестов. Обучающий модуль позволяет осуществить ряд практических операций: приведение прибора в рабочее состояние, настройка режимов работы, снятие отсчетов с контрольно-измерительных элементов, управление прибором с помощью винтов или других элементов управления, запись полученных данных, а также возможность и их обработка. Информационно-аналитический модуль представляет собой всевозможные средства для внедрения симулятора в процесс образования: размещение программы-симулятора в локальной сети учебного заведения; использование при проведении практических занятий; дополнительная информация по проведению занятий с помощью виртуального симулятора и т.п.

Основной задачей при разработке симулятора является создание максимально подобного виртуального образа прибора и его интерфейса, реалистичное функционирование всех элементов управления, а также их адекватную физическую реакцию на действия обучаемого.

Учебно-тренировочный симулятор «Countdown THEO» предназначен для обучения работе с оптическими теодолитами. Основная сфера применения данного программного продукта – процесс подготовки специалистов геодезического профиля. Данный симулятор помогает в изучении отсчетных устройств оптических теодолитов, что является основным навыком при работе с ними. Базовая версия программы «Countdown THEO» предназначена для работы с теодолитами типа 2Т5К и 2Т30. Функционал программы включает два режима: режим отображения введенных отсчетов на шкалах микроскопа теодолита и режим обучения. На рисунке 1 представлено окно программного интерфейса, где в левой части выводятся технические характеристики прибора, а в правой – поля для ввода значений отсчетов и визуализированное поле зрения отсчетного устройства. Для отображения в поле зрения микроскопа желаемых отсчетов по горизонтальному и вертикальному кругам, необходимо ввести их значения в соответствующие поля ввода. Первое поле предназначено для ввода градусов, второе – для угловых минут. После нажатия на кнопку «Показать отсчет», на изображении поля зрения микроскопа теодолита появятся отсчеты.

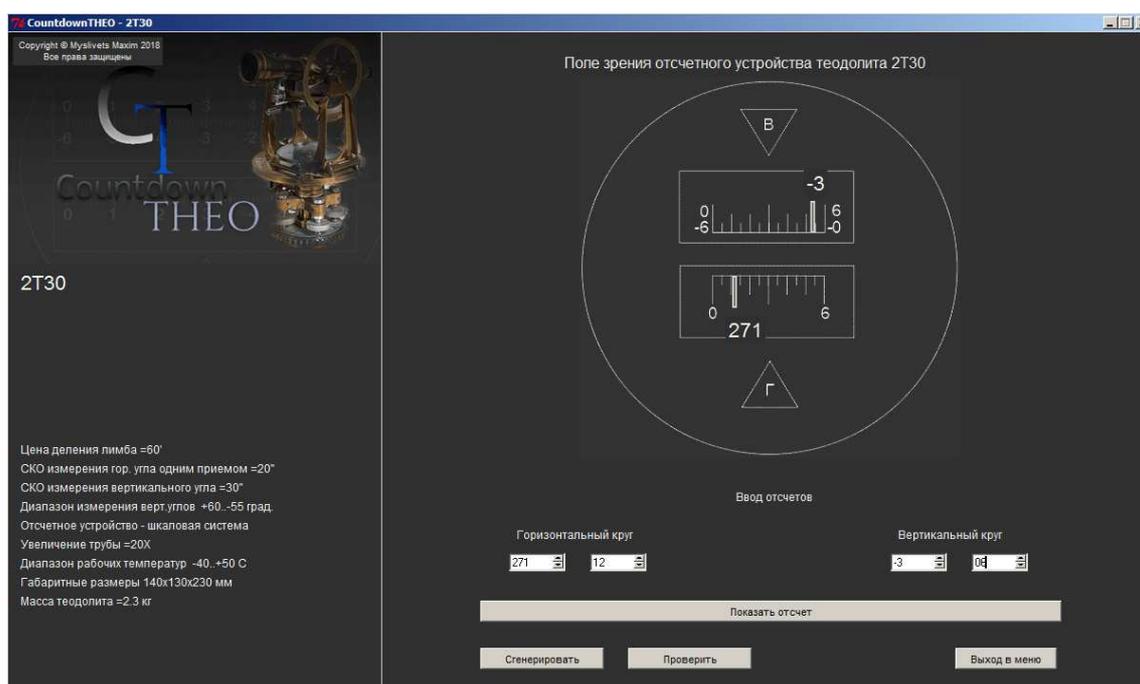


Рисунок 1. – Окно программного интерфейса

При использовании режима обучения необходимо нажать на кнопку «Сгенерировать», после чего в визуализированном поле отсчетного устройства прибора появятся случайные величины отсчетов. Далее обучаемый должен ввести в поля ввода значения градусов и минут, которые он видит, и кликнуть по кнопке «Проверить». Проверка запрограммирована с допустимой погрешностью в 0,5 цены деления шкалы. Если допущена ошибка, превышающая допустимую, то выводится информационное окно с сообщением об этом и верными значениями отсчетов. При правильном ответе в информационном окне выводится фраза «Верно!».

Для разработки данного виртуального симулятора использовался язык программирования высокого уровня Python [3]. Одним из главных достоинств этого языка является, прежде всего, его простой синтаксис, что определяет быстрое обучение и простоту восприятия кода. Кроме того его стандартная библиотека включает большой набор полезных функций, а в глобальной сети Интернет есть множество пользовательских библиотек, ориентированных на различные направления деятельности.

Tkinter – это одна из стандартных библиотек Python для разработки графического оконного интерфейса. Она позволяет позиционировать элементы интерфейса в окне автоматически, либо по сетке с указанием номера колонки и строки, либо их расположение задается координатами в системе координат окна. Интерфейс данной программы создан с использованием метода `place`, аргументами которого являются ординаты и абсциссы размещаемых объектов [4]. Для удобства формирования интерфейса вся область графического окна разделяется на так называемые фреймы (Frame). Например, для оптического теодолита 2Т30 в программном окне «Countdown THEO» задано 4 фрейма, которые содержат следующие группы объектов: характеристики теодолита; поле зрения отсчетного устройства микроскопа теодолита; ввод отсчетов для вертикального и горизонтального кругов; область построения элементов, показывающих заданный отсчет на шкале отсчетного устройства.

Характеристики теодолита в первом фрейме показаны с помощью виджета Label, используемого для отображения текста или изображения. В свойства виджета входят параметры шрифта, такие как тип, размер, цвет символов, цвет фона и т.п., а также свойство динамического обновления. Поле зрения микроскопа отсчетного устройства теодолита представлено изображением, которое было построено в среде AutoCAD с последующим экспортом в gif-формат с некоторыми цветовыми изменениями для сохранения общей дизайнерской темы программы.

В третьем фрейме размещены поля для ввода отсчетов, которые пользователь хочет увидеть в поле зрения отсчетного устройства микроскопа, а также кнопки «Показать» и «Сгенерировать». Вводить значения углов требуется по формату: градусы – целое число, минуты – дробное (с разделителем «точка»). Поля для ввода отсчетов созданы с помощью виджета Spinbox. Данный виджет позволяет получить на выходе не только поле для ввода числовых данных, но и возможность выбора числа из заданного диапазона. Кнопки во фрейме размещены с помощью метода ttk.Button.

Четвертый фрейм содержит градусные деления (штрихи) лимба с подписями значений, выводимые на фоне изображения шкалы отсчетного устройства.

При создании симулятора использовалась парадигма функционального программирования языка Python. Программа включает три основных пользовательских функции. Функция *btn\_CE* (*hg, hm, vm, vg*) принимает значения отсчетов в градусах и минутах, указанные в полях ввода, по горизонтальному (*hg, hm*) и вертикальному (*vm, vg*) кругам и совмещает изображение штриха лимба с изображением шкалы микроскопа. Функция *gen\_count* – генерирует случайные величины отсчетов в диапазоне оцифровки лимба теодолита. Функция *gen\_prov* (*hg, hm, vm, vg*) – сравнивает сгенерированные отсчеты с введенными пользователем и выводит сообщение о правильности ответа.

В настоящее время ведется работа по расширению функционала симулятора. Разрабатываемый модуль позволит смоделировать процесс измерений при производстве тахеометрической съемки.

Для подготовки исходных данных преподавателем используется текстовый файл, каждая строка которого содержит № точки, X, Y, H с разделителем «запятая». Файл данной структуры может быть получен в результате обработки полевых геодезических измерений в программном комплексе Кредо либо другом программном продукте. Пример данных текстового файла для обработки:

```

ПЗ41,1513.0,2372.2,163.91
I,1662.7,2441.4,168.30
II,1582.6,2542.0,164.42
III,1465.9,2673.5,165.09
ПЗ42,1309.0,2517.8,163.46
I,1432.4,2407.2,161.22
2,1431.5,2297.1,160.21
3,1542.2,2220.1,160.62
4,1556.8,2247.8,160.58

```

Полученный файл импортируется в программу «Countdown ТНЕО», где создается общий список имен точек. Пользователь из данного списка в диалоговом режиме формирует топологию ходов, т.е. для каждого хода вводит имена всех его точек. Написанный для симулятора скрипт сохраняет файл с номерами ходов. Затем по каждому ходу пользователь вводит номера станций, ориентирных точек и пикетов. Пример формирования хода № 1 приведен на рисунке 2.

```

Каталог экспортированных точек:
['ПЗ41', 'I', 'II', 'III', 'ПЗ42', '1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9', '10',
'11', '12', '13', '14', '15', '16', '17', '18', '19', '20', '21', '22', '23']
Введите точки хода № 1 в порядке их последовательности в ходе:
ПЗ41,I,II,III,ПЗ42
Введите '1', если хотите закончить ввод точек ходов.
Введите '2', если хотите ввести точки следующего хода.
1
Ход № 1 : ['ПЗ41', 'I', 'II', 'III', 'ПЗ42']
Ввод пикетов для хода № 1. Станции ['ПЗ41', 'I', 'II', 'III', 'ПЗ42']
Введите точку обнуления и пикеты для станции ПЗ41:ПЗ42,1,2,3,4,5
Ввод пикетов для хода № 1. Станции ['ПЗ41', 'I', 'II', 'III', 'ПЗ42']
Введите точку обнуления и пикеты для станции I:ПЗ41,6,7,8,9
Ввод пикетов для хода № 1. Станции ['ПЗ41', 'I', 'II', 'III', 'ПЗ42']
Введите точку обнуления и пикеты для станции II:I,10,11,12,13
Ввод пикетов для хода № 1. Станции ['ПЗ41', 'I', 'II', 'III', 'ПЗ42']
Введите точку обнуления и пикеты для станции III:II,14,15,16,17
Ввод пикетов для хода № 1. Станции ['ПЗ41', 'I', 'II', 'III', 'ПЗ42']
Введите точку обнуления и пикеты для станции ПЗ42:III,18,19,20,21,22,23

Произведена запись вида:
№ хода, станция, точка обнуления, пикеты...
в файл st_0_p.txt

Все точки были выбраны в обработку. Нажмите любую клавишу для завершения.

```

Рисунок 2. – Процесс обработки каталога имен и координат экспортированных точек

Обработка полученного файла заключается в вычислении углов и длин линий между необходимыми точками, в которые затем вводятся случайные погрешности на основании сгенерированных нормированных случайных значений, имеющих нормальный закон распределений. В результате смоделированные углы и длины линий записываются в новый файл, который при импорте симулятор «Countdown ТНЕО» преобразует в отсчеты. Роль преподавателя на этом этапе завершена. Далее студенту необходимо последовательно в симуляторе теодолита снимать отсчеты, как при реальной тахеометрической съемке, и записывать их в журнал измерений. Кроме поля зрения отсчетного устройства в данном модуле добавлено поле зрения зрительной трубы, где выводится изображение рейки на фоне сетки нитей для определения необходимого дальнометрического расстояния.

**Заключение.** Использование симулятора оптических теодолитов «Countdown ТНЕО» в учебных заведениях позволит значительно упростить и сократить процесс изучения студентами соответствующих разделов геодезических дисциплин. Данный виртуальный симулятор позволит не только научиться работать с оптическими теодолитами разных моделей, но и поможет освоить процесс производства тахеометрической съёмки.

Программный продукт «Countdown ТНЕО» в основном ориентирован на использование в образовательных учреждениях при выполнении лабораторных и практических работ, подготовке к экзаменам и в процессе прохождения полевой учебной практики по дисциплинам геодезического цикла. Однако, при определенной доработке он может использоваться для обучения и осуществления контроля уровня геодезической подготовки сотрудников строительных и геодезических организаций. Открытый исходный код программного продукта будет полезен для создания собственных симуляторов и обучающих программ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кодекс Республики Беларусь об образовании – Минск : Национальный центр правовой информации – 2020. – 400 с.
2. Дзюбенко, О.Л. Виртуальные симуляторы в системе высшего военного образования: монография / О.Л. Дзюбенко, М.В. Мищенко, А.О. Коженков. – М. : РУСАЙНС, 2020. – 146 с.
3. Лутц, М. Изучаем Python / М. Лутц ; пер. с англ. – 4-е изд. – СПб. : Символ-Плюс, 2011.–1280 с.
4. Python – Программирование GUI (Tkinter) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.tutorialspoint.com/python/python\\_gui\\_programming.htm](https://www.tutorialspoint.com/python/python_gui_programming.htm). – Дата доступа: 20.10.2018.

Поступила 10.12.2020

#### DEVELOPMENT AND USE OF SIMULATORS OF SURVEY INSTRUMENTS

*P. PARADNYA, M. MYSLIVETS*

*The article is devoted to the use of software simulators in the educational process, the main advantages of such use are noted. The characteristics of the three modules that make up the virtual simulators are given. The authors have developed an educational and training simulator of optical theodolites for teaching and testing knowledge in the study of geodetic disciplines. Its software implementation is made in the high-level programming language Python. Is given principle of operation of the created basic version of the program, focused on the study of the of reading devices of theodolites of types 2T5K and 2T30, as well as the developed extended version, designed to simulate the measurement process during the production tacheometrie.*

**Keywords:** *educational process, simulator, theodolite, reading devices, Python.*

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.588.6: 630\*114.351

### ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В МЕРТВОЙ БИОМАССЕ ЛЕСОВ

**В.М. КОНЬКОВА**

(РУП «Белорусский научно-исследовательский центр «Экология», Минск)

*Статья посвящена изучению запасов углерода в валежной древесине и подстилке. Рассмотрены особенности оценки выбросов парниковых газов в мертвой биомассе, материалы научных исследований современных ученых о депонировании углерода лесной подстилкой и валежной древесиной. Целью работы является оценка изменения содержания углерода в валежной древесине и подстилке. Были использованы методики, принятые Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК). С 1990 года запасы углерода в мертвой биомассе лесов увеличились.*

**Ключевые слова:** лесные экосистемы, депонирование углерода, валежная древесина, подстилка, баланс углерода.

**Введение.** В настоящее время значительно возрос интерес к изучению роли лесных экосистем как важнейших резервуаров углерода, что подтверждено многочисленными научными исследованиями последних десятилетий. Известно, что леса благодаря длительному жизненному циклу основных лесообразующих пород и замедленному биологическому круговороту веществ в экосистемах умеренного пояса способны депонировать углерод не только в живой, но и в мертвой биомассе, гумусе и почве [1; 2]. Благодаря долговременному аккумулярованию запасенного углерода в лесных экосистемах достигается биосферный эффект, связанный с поглощением парниковых газов и противодействием изменениям климатической системы планеты [2]. Следовательно, оценка запасов углерода в лесных экосистемах вызывает особый интерес и требует тщательного изучения [1; 2].

Усиление углерододепонирующей способности лесов и адаптация их к климатическим изменениям – актуальные проблемы научных и прикладных исследований. Согласно требованиям международной отчетности в области землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства расчет депонирования углерода лесами осуществляется для пяти основных резервуаров: надземная и подземная биомасса лесной растительности; мертвое органическое вещество, которое включает валежную древесину и подстилку; а также органическое вещество почвы [2; 3]. Согласно международным договоренностям, в ежегодной национальной отчетности необходимо отражать информацию и оценивать изменения в накоплении углерода во всех пяти резервуарах. Это обстоятельство не требует обязательного увеличения накопления углерода во всех резервуарах, поскольку уменьшение запаса углерода в одном резервуаре должно компенсироваться увеличением его в другом. Например, резервуар надземной биомассы после низовых пожаров или повреждения насекомыми-вредителями уменьшается, вместе с тем пул сухостойной и валежной древесины увеличивается. Для предоставления международной отчетности согласно климатическим соглашениям интерес представляют не потоки и миграция углерода в самой экосистеме, а ее взаимодействие с атмосферой, поэтому учитывают не потоки, а величину баланса. Если итоговый баланс по совокупности резервуаров положительный – идет увеличение стоков и накопление углерода как результат эффективной практики землепользования, изменений в землепользовании и лесном хозяйстве [2].

**Объекты и методы исследования.** В данной работе проведена оценка запасов углерода и их изменение в мертвой биомассе лесов: валежная древесина и подстилка.

Резервуар валежной древесины включает всю неживую древесную биомассу, не содержащуюся в подстилке, как стоящую или лежащую на земле, так и находящуюся в почве. Мертвая древесина включает деревья, лежащие на поверхности, мертвые корни и пни диаметром, равным или превышающим 10 см [3].

Резервуар подстилки включает всю неживую биомассу с размером, превышающим предельное значение для органического вещества почвы (предпочтительно 2 мм) и менее минимального диаметра, выбранного для валежной древесины (например, 10 см), лежащую в мертвом состоянии, на различных стадиях разложения, выше или в пределах минеральных или органических почв. Сюда относится слой подстилки, как это определено в типологии почв. Живые тонкие корни, располагающиеся выше минеральной или органической почв (диаметром менее предложенного минимального диаметра для подземной биомассы) включаются в подстилку в тех случаях, когда их невозможно эмпирически отличить от нее [3].

Для оценки изменений запасов углерода в валежной древесине и подстилке имеются два общих метода. Схожие методы существуют для оценки изменений запасов углерода в биомассе, которые могут повлиять на выбор метода для оценки изменений мертвого органического вещества.

В данной работе использован метод разности запасов по уровню 2, который включает оценку площади управляемых лесных площадей, остающихся лесными площадями, определение запасов углерода валежной древесины и подстилки для двух моментов времени и расчет разницы между этими двумя оценками запасов углерода. Годовое изменение запаса углерода для расчетного года получается делением изменения запаса углерода на период времени (в годах) между двумя измерениями. Расчеты проводятся по данному методу, так как в стране имеются лесные кадастры, основанные на выборочных участках [3].

Годовое изменение в запасах углерода в валежной древесине или подстилке (метод разности запасов) рассчитывается согласно методологии уровня 2 Руководящих принципов МГЭИК по формуле [3]:

$$\Delta C = \left[ \frac{(A_{t_2} - A_{t_1})}{T} \right] \times CF, \quad (1)$$

где  $\Delta C$  – годовое изменение в запасах углерода в валежной древесине или подстилке, т С/г;  
 $A$  – площадь управляемых земель, га;  
 $T$  – ( $t_2 - t_1$ ) – период времени между второй оценкой запасов и первой оценкой запасов, г.;  
 $CF$  – запас углерода; т С/га.

Валежная древесина подразделяется на лежащую (валеж) и стоящую (сухостой). Сведения о запасах валежной древесины устанавливаются при лесоустройстве и вносятся в поведельный банк данных «Лесной фонд Республики Беларусь» [4]. Оценка годового изменения запасов углерода в валеже для подкатегории покрытых лесом земель, остающихся покрытыми лесом землями, проводилась по рассчитанным среднегодовым изменениям запасов углерода в пределах групп возраста по преобладающим породам с использованием данных лесного кадастра по распределению покрытых лесом земель по группам возраста (таблицы 1, 2).

Таблица 1. – Средние запасы углерода в резервуаре валежной древесины на единицу площади покрытых лесом земель по лесообразующим породам и группам возраста [4]

Группа возраста	Запас углерода, тонн/га						
	Сосна	Ель	Дуб	Береза	Ольха черная	Осина	Прочие
Молодняки	4,23	2,44	2,80	0,70	0,45	1,17	0,27
Средневозрастные	7,73	6,10	4,48	2,24	4,01	7,50	1,59
Приспевающие	8,34	8,24	5,27	2,86	4,70	10,40	3,16
Спелые и перестойные	7,72	8,51	4,85	2,50	3,64	9,53	4,02

Таблица 2. – Площади основных лесообразующих пород в 2019 г., га

Группа возраста	Основные лесообразующие породы							
	Сосна	Ель	Дуб	Береза	Ольха черная	Осина	Прочие	Итого
Молодняки	736386	216393	63270	292413	71513	43173	39982	1463130
Средневозрастные	1512093	254122	139351	1005174	290991	27530	72799	3302060
Приспевающие	1235463	222164	33949	368717	172482	35240	68032	2136047
Спелые и перестойные	592975	82368	50866	259541	197911	90382	105056	1379099
Итого 2019	4076917	775047	287436	1925845	732897	196325	285869	8280336

Накопление органического углерода в **лесной подстилке** и его долевое содержание предусмотрено определять через ее массу в абсолютно сухом состоянии. Для установления в насаждении массы лесной подстилки, приходящейся на единицу площади, были использованы данные авторов [5]. Существующие данные по скорости накопления и разложения подстилки на лесных землях как в Беларуси, так и в соседних государствах сильно ограничены и представлены малочисленными результатами исследований по отдельным древесным породам, типам леса, в различных природно-климатических зонах. Масса лесной подстилки зависит от видового состава лесного насаждения, его компонентной структуры, возраста и полноты древостоя, почвенно-лесотипологических условий, влияющих на интенсивность разложения лесного опада [4]. Имеющиеся данные по запасам углерода в подстилке лесных земель и данные Лесного кадастра, а именно: распределение покрытых лесом земель по преобладающим породам, распределение непокрытых лесом земель по типам леса, позволили рассчитать запас углерода в подстилке для лесных земель лесного фонда Республики Беларусь.

Величины по запасу углерода в подстилке покрытых лесом земель по преобладающим породам взяты для Европейской части средней полосы России (таблица 3).

Таблица 3. – Средний запас углерода лесной подстилки для насаждений основных лесообразующих пород [4]

Порода	Запас углерода, т С/га	Порода	Запас углерода, т С/га
Сосна	17,2	Береза	13,6
Ель	10,6	Осина	10,3
Твердолиственные	5,4	Прочие мягколиственные	6,7

В соответствии с установленным порядком представления отчетности все связанные с изменением землепользования изменения запасов углерода и выбросы иных, чем CO<sub>2</sub>, парниковых газов должны указываться в новой категории землепользования. Например, в случае переустройства лесных площадей в возделываемые земли, как изменения запасов углерода, связанные с расчисткой леса, так и любые последующие изменения запасов углерода, происшедшие в результате данного переустройства, должны указываться в категории возделываемых земель. По умолчанию переходной период принимается равным 20 лет [3]. Соответственно, при расчетах  $t$  принималось равным 20 годам.

Поскольку Беларусь не обладает данными по распределению площадей основных лесообразующих пород за период 1970 – 1989 гг., расчеты определения запасов углерода в валежной древесине и подстилке проводились при помощи метода замещения, по уравнению (2) [6]. В качестве замещающего статистического параметра принималась общая площадь покрытых лесом земель.

$$y_0 = y_t \frac{s_0}{s_t}, \quad (2)$$

где  $y$  – оценка выбросов / поглощений в годы 0 и  $t$ ;  
 $s$  – замещающий статистический параметр в годы 0 и  $t$  [7].

**Результаты и их обсуждение.** В таблице 4 и на рисунке 1 представлены запасы и изменения запасов углерода в валежной древесине и подстилке на период 1990 – 2019 гг. [8].

Таблица 4. – Запасы и изменение запасов углерода в мертвой биомассе, млн. т С

Год	Запасы в валежной древесине	Изменения запасов в валежной древесине	Запасы в подстилке	Изменение запасов в подстилке	Итого в мертвой биомассе	Итого по данным ФАО [8]
1990	33,87	-0,024	98,84	-0,071	132,71	224,5
1995	36,62	0,104	103,06	0,112	139,68	–
2000	39,39	0,223	107,30	0,268	146,69	239,4
2005	40,82	0,306	109,11	0,393	149,93	244,2
2010	42,47	0,430	111,99	0,657	154,46	250,1
2015	44,14	0,376	114,89	0,591	159,03	264,4
2016	44,53	0,379	115,33	0,608	159,86	–
2017	44,64	0,345	115,21	0,522	159,85	–
2018	44,658	0,319	114,928	0,466	159,586	–
2019	44,660	0,291	114,930	0,424	159,590	–
Изменение 1990-2019, %	31,88	–	16,28	–	20,26	–



Рисунок 1. – Изменение запасов углерода в мертвой биомассе, тыс. т С

Запас углерода в валежной древесине и подстилке на первое января 2020 г. составляет 44,66 и 114,93 млн т углерода, соответственно [9]. Отрицательные значения за 1990 и 1991 гг. объясняются неопределенностями метода замещения, используемого для этих лет. В информационных таблицах годовичные величины потока углерода (увеличение или уменьшение накоплений углерода в резервуарах) преобразуются в эквивалент  $\text{CO}_2$ . Стехиометрическое соотношение  $\text{CO}_2$  и углерода (С) составляет 44/12 [10].

Соответственно запас углерода в мертвой биомассе 159,59 млн т С соответствует 585,16 млн т  $\text{CO}_2$  экв. Поглощение  $\text{CO}_2$  мертвой биомассой в 2019 году составило 2878,33 тыс. т  $\text{CO}_2$  экв. (Гг  $\text{CO}_2$  экв.). Общее поглощение сектором «Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство» согласно [9] в 2018 г. составило 22631,25 тыс. т  $\text{CO}_2$  экв., соответственно, мертвая биомасса составляет 12,72% от поглощения в данном секторе, или 10,37% от поглощения «Лесными землями».

**Закключение.** Леса Беларуси являются динамично развивающейся экосистемой, отличающейся устойчивой тенденцией увеличения древесных запасов и повышения продуктивности лесов, что подтверждается данными лесной статистики [11]. Лесохозяйственная деятельность страны обеспечивает устойчивую динамику повышения углерододепонирующей продуктивности валежной древесины и лесной подстилки [11].

Изучено изменение запасов углерода в мертвой биомассе лесов, а именно: в валежной древесине и подстилке за период 1990 – 2019 гг. Увеличение запасов углерода в 2019 г. по сравнению с 1990 г. на 31,87% и 16,28% в валежной древесине и подстилке, соответственно, связано с увеличением площади покрытых лесом земель лесного фонда. Следует отметить, что углеродный баланс мертвой биомассы лесов не является стабильным во временном аспекте, что связано с динамикой древесных запасов. В наибольшей степени увеличение депонирования углерода зависит от состояния лесов, их возрастной структуры, продуктивности и биоразнообразия в целом.

Осознание важности лесов Беларуси как части общей флоры, занимающих значительную территорию республики, предполагает дальнейшее совершенствование методов и методик ведения исследований состояния лесов, более тесное сотрудничество с отраслевой, академической наукой и другими родственными сферами [5].

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования кадастров выбросов парниковых газов, двухгодичных докладов и национальных сообщений в рамках выполнения страной обязательств по РКИК ООН и Парижского соглашения, а также для формирования национальной политики, планов и стратегий по управлению лесным хозяйством страны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шихова, Л.Н. Динамика запасов органического вещества лесной подстилки южно-таежного биогеоценоза / Л.Н. Шихова, Е.М. Лисицын // Вестник удмуртского университета. Биология. Науки о земле. – 2015. – Т. 25, Вып. 2. – С. 24–30.
2. Малышева, Н.В. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годовичного депонирования углерода / Н.В. Малышева, Б.Н. Моисеев, А.Н. Филиппчук, Т.А. Золина // Лесной вестник. – МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2017. – № 1. – С. 4–13.
3. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов : в 5 т. / редкол.: Х.С. Игглестон [и др.]. – Хаяма : МГЭИК, 2006. – Т. 4: Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. – Ч. 1. – 397 с.
4. Рожков, Л.Н. Методические подходы расчета углеродных пулов в лесах Беларуси / Л.Н. Рожков // Труды БГТУ: Экология, Лесоводство и охотничье хозяйство. – 2011. – № 1. – С. 62–70.
5. Климчик, Г.Я. Методология исследования различных компонентов лесного фитоценоза для расчета углеродных потоков / Г.Я. Климчик, О.Г. Бельчина // Труды БГТУ. Сер. 1. – 2019. – № 2. – С. 43–48.
6. Подготовить пятое национальное сообщение Республики Беларусь для представления в секретариат Рамочной конвенции ООН об изменении климата и киотского протокола. Разработать комплекс мер по реформированию национальной системы инвентаризации парниковых газов : отчет о НИР (заключ.) / РУП «Бел НИЦ «Экология» ; рук. И.П. Наркевич [и др.]. – Минск, 2010. – С. 42–59. – № ГР 20092904.
7. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов : в 5 т. / Редкол.: Х.С. Игглестон [и др.]. – Хаяма : МГЭИК, 2006. – Т. 1: Общие руководящие указания и отчетность. – 337 с.
8. База данных ФАО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. – Дата доступа: 08.06.2020.
9. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2018 гг. / И.П. Наркевич [и др.]. – Минск : РУП «Бел НИЦ «Экология», 2020. – 284 с.

10. Методика оценки общего и годичного депонирования углерода лесами Республики Беларусь : утв. М-вом лесного хозяйства Респ. Беларусь 3.03.2011. Реестр ТНПА № 000198 от 10.03.2011. – Минск, 2011. – 19 с.
11. Рожков, Л.Н. Оценка углеродного пула и динамика углеродных потоков в лесах Беларуси / Л.Н. Рожков // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси. – Гомель, 2012. – Вып. 72. – С. 130–141.

Поступила 20.10.2020

#### ASSESSMENT OF THE CARBON STOCK CHANGES IN DEAD BIOMASS OF THE FORESTS

V. KANKOVA

*The article devotes to the investigation of the carbon stocks in dead wood and litter. The features of assessment of greenhouse gas emissions in dead organic matter are considered. The materials of scientific progressive research of advanced scientists on carbon deposition by forest litter and dead wood are considered in the article. The purpose of the work is to assess the change in the carbon content in dead wood and litter. The methodologies adopted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were used in this work. Since 1990 the carbon stock in dead biomass of the forests has increased.*

**Keywords:** *forest ecosystems, carbon sequestration, dead wood, litter, carbon balance.*

УДК 504

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В КАТЕГОРИИ «ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ОТРАСЛИ И СТРОИТЕЛЬСТВО» СЕКТОРА «ЭНЕРГЕТИКА»****Д.В. МЕЛЕХ***(РУП «Белорусский научно-исследовательский центр «Экология», Минск)*

*Для обеспечения снижения уровня выбросов парниковых газов требуется качественный учет, который необходимо осуществлять на национальном и корпоративном уровне. Цель представленного исследования – разработка модели и расчет выбросов парниковых газов в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика». Используются Руководящие принципы Межправительственной группы экспертов по изменению климата 2006, адаптированные к национальным особенностям Республики Беларусь. Разработана модель и рассчитаны выбросы парниковых газов в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика». Модель расчетов будет использована для инвентаризаций выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, включая расчеты сокращения выбросов от применения более чистых видов ископаемого топлива и возобновляемых источников энергии.*

**Ключевые слова:** *расчет выбросов, парниковые газы, коэффициенты выбросов.*

**Введение.** Беларусь в 2000 г. присоединилась к Рамочной Конвенции об Изменении Климата Организации Объединенных Наций (далее – РКИК ООН) [1] и тем самым приняла на себя ряд обязательств, среди которых – снижение антропогенных выбросов парниковых газов (далее – ПГ). Конечная цель РКИК ООН и всех связанных с ней правовых документов заключается в стабилизации концентраций ПГ в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему [2]. Необходимость снижения антропогенных выбросов ПГ обусловила проведение их учета, т.к. невозможно управлять тем, что не измеряется. Республика Беларусь, как Страна РКИК ООН, отмеченная в Приложении I, ежегодно выполняет инвентаризацию антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, которая оформляется в виде таблиц CRF (Common Reporting Format – Общий формат данных) и национального отчета об инвентаризации, направляемых в секретариат РКИК ООН [3]. Таблицы CRF представляют собой сводную информацию по инвентаризируемым экономическим деятельности в стандартном формате, соответствующем требованиям к отчетности для Сторон РКИК ООН, включенных в приложение I (как правило, развитые страны). Национальный отчет об инвентаризации содержит информацию по всем аспектам подготовки инвентаризации в стандартном формате, включая информацию о выборе методов расчета, исходных данных о деятельности, коэффициентах выбросов, неопределенностях, процедурах оценки качества/контроля качества (ОК/КК) и т.д.

**Основная часть.** К инвентаризируемым парниковым газам относятся пять соединений ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SF}_6$  и  $\text{NF}_3$ ) и две группы газов (HFCs и PFCs). Из них  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  могут выделяться, как в результате естественных природных процессов, так и в результате антропогенной деятельности. Углерод чаще всего встречается в атмосфере в окисленном виде, в качестве углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и участвует в круговороте углерода в природе. Антропогенными источниками выбросов  $\text{CO}_2$  являются сжигание ископаемого топлива, вырубка леса и неэнергетические производственные процессы (например, производство цемента). Метан в основном образуется в результате анаэробного разложения органических веществ. К антропогенным источникам выбросов  $\text{CH}_4$  относятся разложение твердых коммунальных отходов, производство и распределение природного газа и нефти, сельскохозяйственные процессы, такие как кишечная ферментация у животных и разложение животных отходов, также метан встречается как побочный продукт добычи угля и неполного сгорания ископаемого топлива. Источниками выбросов закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) являются сельскохозяйственные почвы, особенно производство азотфиксирующих культур и кормов, использование синтетических и навозных удобрений, мобильное сжигание ископаемого топлива, производство азотной кислоты, очистка сточных вод и сжигание отходов. Гидрофторуглероды HFCs (или ГФУ) в основном используются в качестве замены озоноразрушающих веществ. PFCs,  $\text{SF}_6$  и  $\text{NF}_3$  преимущественно выделяются в результате промышленных процессов, включая выплавку алюминия, производство полупроводников, передачу и распределение электроэнергии, а также литье магния. Таким образом, источники выбросов ПГ охватывают различные сферы деятельности человека, а инвентаризация антропогенных выбросов и поглощений ПГ осуществляется по следующим секторам:

- энергетика;
- промышленные процессы и использование продуктов;
- сельское хозяйство;
- землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство (далее – ЗИЗЛХ);
- отходы.

Для более полного выполнения положений РККИК ООН, Конференцией Сторон, как руководящим органом Конвенции, были приняты Киотский Протокол и Парижское соглашение, которые предусматривают возможность использовать рыночные механизмы смягчения последствий изменения климата. Республика Беларусь присоединилась к Киотскому Протоколу в 2005 г. [4] и сформировала до 2009 года нормативно-правовую базу, обеспечивающую регулирование отношений реализации экономических механизмов Киотского протокола, однако не смогла ими воспользоваться, т.к. поправка к данному документу, определяющая установленное количество ПГ для Республики Беларусь, не была ратифицирована необходимым количеством Сторон Киотского протокола (145 ратификаций) [5].

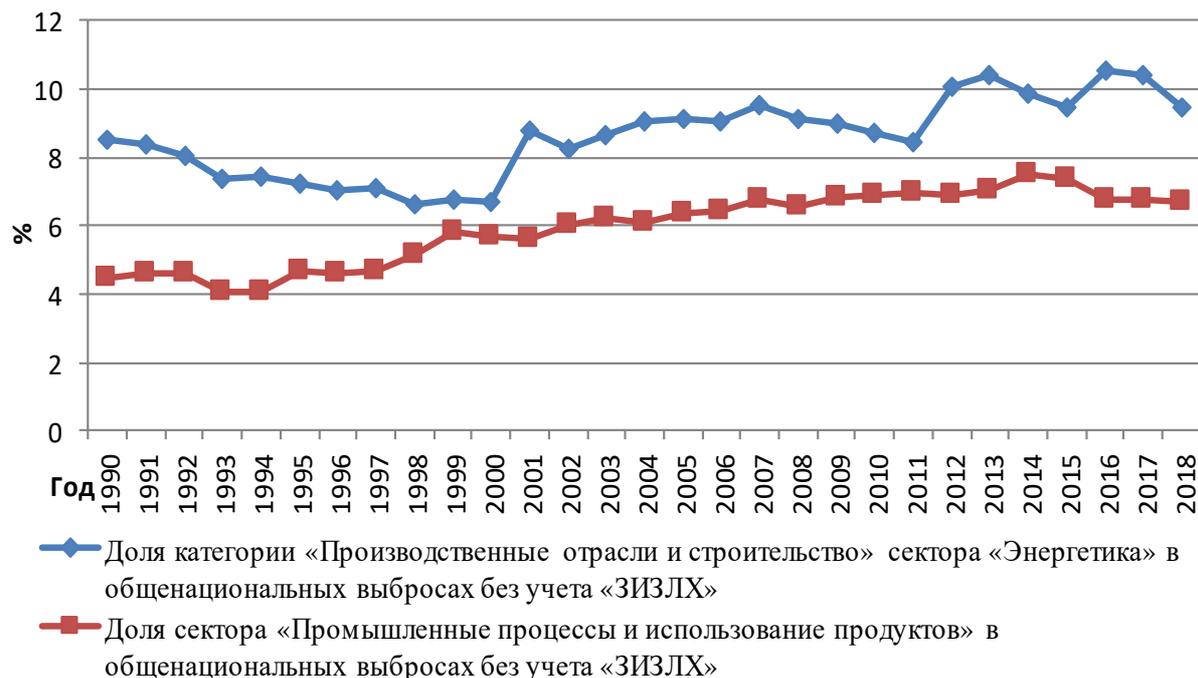
В основе Парижского соглашения и принятых долгосрочных целей лежат определяемые на национальном уровне вклады [6], которые страны должны обновлять каждые пять лет и каждый раз принимать более амбициозные обязательства [7]. Совместно определяемые на национальном уровне вклады стран помогают оценить, достигнет ли мир долгосрочных целей Парижского соглашения и когда глобальные выбросы ПГ будут на пике. Для реализации определяемых на национальном уровне вкладов Парижское соглашение предусматривает возможность Сторон сотрудничать друг с другом. Механизмы сотрудничества, описанные в статье 6 указанного документа, должны не только облегчить достижение существующих целей по сокращению выбросов, но также повысить будущие амбиции и способствовать устойчивому развитию. Они образуют правовую основу, позволяющую использовать рыночные механизмы смягчения последствий изменения климата.

Для обеспечения функционирования положений Парижского соглашения Конференцией Сторон был принят «Катовицкий Климатический Пакет» [8], однако Стороны пока не смогли в нем согласовать правила выполнения статьи 6 и найти решения по ключевым вопросам на следующей Конференции Сторон, которая состоялась в 2019 г. в Мадриде [9]. Основным предметом разногласий остается вопрос учета сокращений выбросов, передаваемых в соответствии со статьей 6, т.к. точный учет является важнейшим условием исключения двойного учета при подсчете сокращения выбросов. Кроме того, нерешенным является вопрос сертификатов, созданных в соответствии с Киотским протоколом, и возможности их использования в рамках Парижского соглашения. Решение этих вопросов было отложено на следующее собрание Конференции Сторон.

Проблема точного учета выбросов ПГ и их сокращений на национальном уровне решается путем внедрения системы MRV (Measurement, Reporting and Verification – Мониторинг, отчетность и верификация). Система MRV формирует процесс, в результате которого организация, осуществляющая хозяйственную деятельность, рассчитывает, документирует и верифицирует выбросы ПГ в добровольном или нормативном порядке. Согласно определению, верификация – это комплекс мер и процедур, проводимых во время планирования, разработки или после завершения инвентаризации ПГ, которые призваны определить ее надежность при предполагаемом применении [10]. Как следует из определения верификации, система MRV помимо прочего направлена на обеспечение точного учета сокращения выбросов, передаваемых при использовании рыночных механизмов смягчения последствий изменения климата. Исходя из оценки международного опыта организации систем торговли квотами на выбросы ПГ, углеродные рынки охватывают не все источники выбросов и поглощений ПГ по секторам экономики. В большей степени они охватывают энергетическую промышленность, нефтепереработку, черную металлургию, целлюлозно-бумажную промышленность, химическую промышленность, производство строительных материалов и строительную отрасль, грузовые и пассажирские авиаперевозки. Система торговли квотами на выбросы ПГ Евросоюза охватывает 45% выбросов ПГ, Американского штата Калифорния и Канадской провинции Квебек – по 80% выбросов ПГ [11]. Не полный охват секторов экономики вызван тем, что при оценке выбросов и поглощений ПГ в секторах «Сельское хозяйство», «ЗИЗЛХ» и «Отходов» имеет место высокая степень неопределенности оценок.

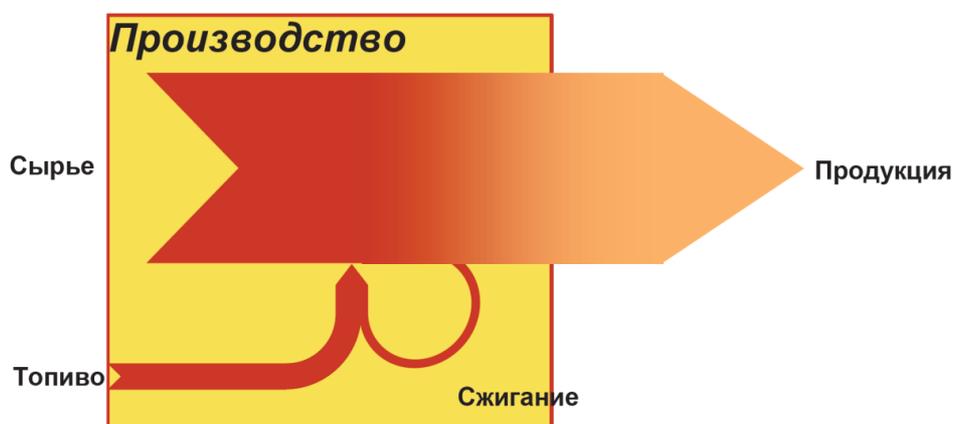
**Категория «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика».** В Беларуси на сектор «Промышленные процессы и использование продуктов» и категорию «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика» в период 2008 – 2018 гг. приходится 6,5% – 7,5% и 8,5% – 10,5% общенациональных выбросов парниковых газов, соответственно, без учета поглощений в секторе «ЗИЗЛХ» (рисунок 1) [12].

Во избежание двойного учета выбросов ПГ в категории «Производственные отрасли и строительство» (1.A.2) сектора 1 «Энергетика» и в секторе 2 «Промышленные процессы и использование продуктов» необходимо различать топливо, которое использовано в производственных отраслях в качестве сырья. Например, при производстве нефтехимических продуктов (метанол), химикатов (аммиак) и первичного железа, в качестве подводимого продукта требуется кокс. В некоторых случаях ситуация может быть более сложной, так как энергия, необходимая для процессов производства может доставляться к месту использования непосредственно из химических реакций. Примером такой ситуации может выступать производство чугуна и стали, где в результате химических реакций между коксом и железной рудой выделяется газ и тепло, которых достаточно для поддержания процесса [13].



**Рисунок 1. – Доля сектора «Промышленные процессы и использование продуктов» и категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика» в общенациональных выбросах парниковых без учета поглощений в секторе «ЗИЗЛХ»**

Категория «Производственные отрасли и строительство» включает в себя выбросы ПГ от сжигания ископаемого топлива в отраслях промышленности. В производственных отраслях сырье преобразуется в продукты, как схематически изображено на рисунке 2 [10]. Для строительства действуют те же принципы: поступающими продуктами являются стройматериалы, а продукцией – строения.



**Рисунок 2. – Использование топлива в качестве источника энергии в производственных отраслях для преобразования сырья в продукцию**

Производственные отрасли в целом классифицируются в зависимости от вида производимой продукции. Для целей составления ежегодных кадастров выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в рамках обязательств по РККК ООН такая классификация выполняется в соответствии с Международной классификацией промышленных стандартов для экономической деятельности [14]. Выбросы ПГ от отраслей, сжигающих большие объемы топлива, должны учитываться так же, как и прочие значимые производители выбросов и поглощений ПГ. Приведен список отраслей промышленности, который рекомендован для рассмотрения при составлении ежегодных кадастров выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов [10]:

- 1.А.2.а Чугун и сталь;
- 1.А.2.б Цветные металлы;

- 1.А.2 с Химикаты;
- 1.А.2 d Целлюлоза, бумага и печать;
- 1.А.2 e Пищепром, напитки и табак;
- 1.А.2 f Неметаллические минералы;
- 1.А.2 g Транспортное оборудование;
- 1.А.2 h Машины и механизмы;
- 1.А.2 i Горнодобывающая (кроме топлива) промышленность;
- 1.А.2 j Лес и лесоматериалы;
- 1.А.2 k Строительство;
- 1.А.2 l Текстиль и кожа;
- 1.А.2 m Неуказанные отрасли.

Однако структура национальной статистической отчетности и энергетического баланса Республики Беларусь не позволяет выполнять расчет выбросов ПГ в отраслях согласно рекомендованному списку за период с 1990 г. [15], который является для Беларуси базовым годом при подготовке ежегодной инвентаризации выбросов и поглощений ПГ [16]. Поэтому категория «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика» при подготовке ежегодных кадастров выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ в Беларуси разделена на подкатегории следующим образом (таблица 1):

- Чугун и сталь (с 2001 г.);
- Химикаты (с 2001 г.);
- Целлюлоза, бумага и печать (с 2001 г.);
- Пищевая промышленность, напитки и табак (с 2001 г.);
- Машины и механизмы (с 2001 г.);
- Строительство (с 2001 г.);
- Текстиль и кожа (с 2001 г.);
- Прочие отрасли промышленности (с 2001 г.);
- Совокупно «Производственные отрасли и строительство» (1990 – 2000 гг.).

Таблица 1. – Соотношение структуры конечного потребления топлива организациями по видам экономической деятельности в энергетическом балансе Республики Беларусь и структуры отраслей в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика»

Структура конечного потребления топлива организациями по видам экономической деятельности в энергетическом балансе Республики Беларусь	Структура отраслей в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика» (Таблицы CRF, сформированные Республикой Беларусь)	Номер подкатегории	
		Таблицы CRF, сформированные Республикой Беларусь	Руководящие принципы МГЭИК 2006
1	2	3	4
Горнодобывающая промышленность	Иное	1.А.2.g.viii Other	1.А.2 m
Обрабатывающая промышленность: производство продуктов питания, напитков и табачных изделий	Пищепром, напитки и табак	1.А.2 e	1.А.2 e
производство текстильных изделий, одежды, изделий из кожи и меха	Текстиль и кожа	1.А.2.g.vi	1.А.2 l
производство изделий из дерева и бумаги; полиграфическая деятельность и тиражирование записанных носителей информации	Целлюлоза, бумага и печать	1.А.2 d	1.А.2 d
производство кокса и продуктов нефтепереработки	Иное	1.А.2.g.viii Other	1.А.2 m
производство химических продуктов	Химикаты	1.А.2 c	1.А.2 c
производство резиновых и пластмассовых изделий, прочих неметаллических минеральных продуктов	Иное	1.А.2.g.viii Other	1.А.2 m
металлургическое производство; производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования	Чугун и сталь	1.А.2.a	1.А.2.a
производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки	Машины и механизмы	1.А.2.g.i	1.А.2 h
производство транспортных средств и оборудования	Машины и механизмы	1.А.2.g.i	1.А.2 h

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
Снабжение электроэнергией, газом, паром, горячей водой и кондиционированным воздухом	Иное	1.A.2.g.viii Other	1.A.2 m
Водоснабжение; сбор, обработка и удаление отходов, деятельность по ликвидации загрязнений	Иное	1.A.2.g.viii Other	1.A.2 m
Строительство	Строительство	1.A.2.g.v	1.A.2 k

Информация о потреблении топлива в разрезе перечисленных подкатегорий стала доступна с 2001 г., за период 1990 – 2000 гг. доступна информация лишь о совокупном потреблении топлива категорией «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика». Годы, по которым информация о потреблении топлива в разрезе подкатегорий недоступна, при формировании CRF таблиц заполняются условным обозначением, каковые выглядят следующим образом [16]:

а) «NO» (not occurring – не происходит) – применяется для категорий или процессов, которые не происходят в Стране;

б) «NE» (not estimated – не оценено) – применяется для исходных данных о деятельности и/или выбросах из источников и абсорбции поглотителями ПГ, которые не оценивались, но для которых соответствующая деятельность могла совершаться в Стране;

с) «NA» (not applicable – неприменимо) – используется для деятельности в рамках данной категории источника/поглотителя, которая действительно имеет место на территории Страны, но не приводит к выбросам или абсорбции определенного газа. В случае с категорией «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика», определенный вид топлива мог не потребляться в расчетном году, а в предшествующем году потреблялся, или этот определенный вид топлива потребляется не каждый год, тогда в расчетном году исходные данные о деятельности обозначаются «NA»;

д) «IE» (Included Elsewhere – включено в другом месте) – применяется для выбросов из источников и абсорбции поглотителями оцененных ПГ, но включенных в другой раздел инвентаризации, а не в ожидаемую категорию источников/поглотителей. Если в инвентаризации используется «IE», необходимо указать в CRF таблице 9 «Полнота – информация об условных обозначениях» где в инвентаризацию были включены выбросы или абсорбция для категории перемещенных источников/поглотителей. Также должно быть объяснение этого отклонения от включения в ожидаемую категорию, особенно в случае с конфиденциальностью информации;

е) «C» (confidential – конфиденциально) – для выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, отчетность по которым может привести к раскрытию конфиденциальной информации.

Например, для подкатегории «Строительство» доступна информация с 2001 г., для периода 1990 – 2000 гг. информация по годам заполняется условным обозначением «IE» и примечанием, что исходные данные о деятельности и выбросах ПГ от подкатегории «Строительство» за период 1990 – 2000 гг. учтены в подкатегории «Совокупно «Производственные отрасли и строительство». Из этого следует, что с 2001 г. в подкатегории «Совокупно «Производственные отрасли и строительство» информация по годам также будет заполнена условным обозначением «IE» и примечанием, что с 2001 г. доступна информация в разрезе подкатегорий (таблицы 2, 3).

При расчете выбросов парниковых газов от сжигания топлива данные о количестве топлива в единицах массы или объема в первую очередь должны быть преобразованы в содержание энергии в этих количествах топлива. Для этого преобразования необходимо применение коэффициента низшей теплотворной способности топлива (таблица 4). Для перевода объемов потребления отходов лесозаготовок и деревообработки из тысяч тонн угольного эквивалента в ТДж используется коэффициент – 29,308 ТДж/тыс. т у. т., для перевода объема использованных дров из плотных кубических метров в тонны применяется коэффициент – 0,266 т/м<sup>3</sup>.

При сжигании разных типов топлива выбрасывается определенное количество каждого парникового газа, что требует применения специальных коэффициентов выбросов (см. таблицу 4). Общее количество выбросов конкретного парникового газа из категории рассчитывается суммированием выбросов этого ПГ от сжигания каждого типа топлива.

Таблица 2. – Совокупное потребление топлива в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика», 1990 – 2000 гг. [15]

Год	Нефть, вкл. газ, конденсат, тыс. т	Газ гор. природн. (вкл. попутн.), млн. м <sup>3</sup>	Уголь, тыс. т	Торф топлив, тыс. т	Дрова, тыс. т (ρ=0,266 т/плотн. м <sup>3</sup> )	Отх. лесозав. и деревообр., тыс. т у.т.	Топл. брикеты, тыс. т	Бензин автомобиль, тыс. т	Диз. топлив, тыс. т	Топочный мазут, тыс. т	Газ сжиж. тыс. т	Газ нефтеперераб. сух., тыс. т	Топл. для реактивн. двиг., тыс. т	Керосины прочие, тыс. т	Топл. печн. бытов., тыс. т	Кокс, тыс. т
1990	NO	1179.00	96.00	127.00	35.00	NA	5.00	48.00	334.00	1648.00	24.00	855.00	NO	12.00	74.00	223.00
1991	NO	1025.45	82.81	127.53	20.22	NA	4.18	52.65	335.51	1540.19	25.96	766.00	NO	0.00	68.95	221.00
1992	NO	1392.80	70.08	129.60	19.42	NA	4.89	45.40	291.22	1037.48	22.23	631.00	NO	43.30	58.58	184.00
1993	NO	1293.18	60.58	117.06	20.78	NA	4.89	31.65	305.92	811.76	21.91	400.00	NO	10.43	35.90	142.00
1994	NO	1116.77	45.17	114.19	28.10	NA	3.85	22.22	197.90	705.10	23.48	401.00	NO	9.39	18.92	99.00
1995	NO	1054.16	42.39	103.88	32.01	NA	3.22	23.44	181.70	595.11	22.43	385.00	NO	7.30	23.59	76.00
1996	NO	1111.06	42.05	109.15	34.25	NA	3.05	26.51	191.26	541.44	20.66	388.00	NO	4.17	21.77	70.00
1997	NO	1264.16	30.52	89.06	50.65	NA	3.12	25.33	192.87	425.82	20.60	426.00	NO	4.70	21.77	88.00
1998	NO	1239.86	28.52	77.68	54.18	NA	2.78	25.86	196.80	391.23	19.16	387.00	NO	4.17	22.16	83.00
1999	NO	1281.67	19.55	72.01	57.55	NA	2.77	22.89	183.61	327.21	17.53	347.00	NO	2.09	16.59	83.00
2000	NO	1409.00	15.00	75.00	45.00	26.00	9.00	12.00	105.00	421.00	2.00	265.00	NO	3.00	15.00	86.00
2001	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2002	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2003	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2004	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2005	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2006	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2007	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2008	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2009	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2010	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2011	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2012	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2013	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2014	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2015	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2016	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2017	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2018	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2019	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE

Таблица 3. – Потребление топлива подкатегорией «Строительство» категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика», 2001 – 2019 гг. [15]

Год	Нефть, вкл. газ, конденсат, тыс. т	Газ гор. природн. (вкл. попутн.), млн. м <sup>3</sup>	Уголь, тыс. т	Торф голл., тыс. т	Дрова, тыс. т ( $\rho=0,266$ т/шютн. м <sup>3</sup> )	Отх. лесозав. и деревообр., тыс. т у.т.	Топл. брикеты, тыс. т	Бензин автомоб., тыс. т	Диз. топл., тыс. т	Топочный мазут, тыс. т	Газ сжиж., тыс. т	Газ нефтеперераб., тыс. т	Топл. для реактивн. двиг., тыс. т	Керосины прочие, тыс. т	Топл. печн. бытов., тыс. т	Кокс, тыс. т
1990	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1991	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1992	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1993	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1994	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1995	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1996	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1997	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1998	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
1999	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2000	NO	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	NO	IE	IE	IE
2001	NO	13.40	3.70	NA	38.80	3.60	2.90	62.10	127.40	15.90	1.30	NA	NO	NA	1.20	NA
2002	NO	12.00	1.50	NA	37.80	4.60	2.40	51.30	125.30	17.00	1.40	NA	NO	NA	1.10	NA
2003	NO	11.30	1.20	NA	37.40	7.00	2.60	52.30	127.10	15.80	1.80	NA	NO	NA	1.40	NA
2004	NO	12.70	0.50	NA	32.50	8.80	2.40	56.20	138.30	16.30	2.20	NA	NO	NA	1.10	0.20
2005	NO	13.80	0.40	NA	34.80	12.10	3.10	60.30	152.70	16.20	2.70	NA	NO	NA	1.70	NA
2006	NO	13.80	0.40	NA	34.80	12.10	3.10	60.30	152.70	16.20	2.70	NA	NO	NA	1.70	NA
2007	NO	19.90	0.40	NA	35.00	11.50	4.10	65.80	180.40	11.80	3.20	NA	NO	0.20	2.10	NA
2008	NO	23.80	0.30	0.10	35.10	10.90	5.00	68.30	205.70	12.10	3.70	NA	NO	0.20	4.40	NA
2009	NO	18.70	0.50	NA	39.00	11.10	5.60	66.00	221.00	7.30	3.70	NA	NO	0.20	5.20	NA
2010	NO	18.70	0.50	NA	39.00	11.10	5.60	66.00	221.00	7.30	3.70	NA	NO	0.20	5.20	NA
2011	NO	18.70	0.50	NA	39.00	11.10	5.60	66.00	221.00	7.30	3.70	NA	NO	0.20	5.20	NA
2012	NO	25.90	0.10	NA	67.30	9.80	4.90	51.90	251.00	12.30	4.20	NA	NO	0.30	9.40	NA
2013	NO	26.60	0.10	0.20	59.60	8.50	4.20	61.10	287.30	10.90	4.80	NA	NO	0.10	12.70	NA
2014	NO	24.10	0.40	NA	57.20	7.90	3.40	45.10	231.70	12.00	4.00	NA	NO	0.10	14.40	NA
2015	NO	20.50	0.80	NA	52.10	7.20	2.50	60.00	203.80	8.90	2.40	NA	NO	NA	12.30	NA
2016	NO	21.00	0.30	NA	49.00	5.00	2.00	46.00	210.00	7.00	3.00	NA	NO	NA	10.96	NA
2017	NO	22.00	0.10	NA	47.00	NA	2.00	45.00	208.00	9.00	2.00	NA	NO	NA	19.18	NA
2018	NO	22.00	0.10	NA	54.00	NA	2.00	45.00	230.00	9.00	2.00	NA	NO	NA	NA	NA
2019	NO	22.00	0.10	NA	47.00	NA	2.00	42.00	203.00	10.00	2.00	NA	NO	NA	NA	NA

Таблица 4. – Коэффициенты низшей теплотворной способности топлив и коэффициенты выбросов по газам и видам топлив, используемые при проведении инвентаризации выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Республике Беларусь

Тип топлива	Низшая теплотворная способность топлива, НТС <sub>топл</sub> , ГДж/т, ТДж/тыс. т [17, 18]	Коэффициенты выбросов ПГ [таблица 2.2, 10]		
		кг CO <sub>2</sub> /ТДж	кг CH <sub>4</sub> /ТДж	кг N <sub>2</sub> O/ТДж
Нефть, включая газовый конденсат	42,30 <sup>(1)</sup>	73 300	3	0,6
Бензин автомобильный	44,30 <sup>(1)</sup>	69 300	3	0,6
Топливо для реактивных двигателей	44,10 <sup>(1)</sup>	71 500	3	0,6
Керосины прочие	43,80 <sup>(1)</sup>	71 900	3	0,6
Дизельное топливо	42,58 <sup>(2)</sup>	74 100	3	0,6
Топочный мазут	37,96 <sup>(2)</sup>	77 400	3	0,6
Газ сжиженный	44,20 <sup>(1)</sup>	63 100	3	0,6
Топливо печное бытовое	42,00 <sup>(2)</sup>	73 300	3	0,6
Газ нефтепереработки сухой	49,50 <sup>(1)</sup>	57 600	1	0,1
Уголь	11,90 <sup>(1)</sup>	101 000	1	1,5
Топливные брикеты	16,532 <sup>(2)</sup>	97 500	1	1,5
Кокс	28,20 <sup>(1)</sup>	107 000	1	0,1
Газ горючий природный	33,82 <sup>(4)</sup>	54 400 <sup>(4)</sup>	1	0,1
Торф топливный	15,00 <sup>(2)</sup>	106 000	1	1,5
Отходы лесозаготовок и деревообработки	– <sup>(3)</sup>	– <sup>(5)</sup>	30	4
Дрова для отопления	15,60 <sup>(1)</sup>	– <sup>(5)</sup>	30	4

Примечание: <sup>(1)</sup> – ТКП 17.09-05-2013;

<sup>(2)</sup> – ТКП 17.09-01-2011;

<sup>(3)</sup> – для перевода объемов потребления отходов лесозаготовок и деревообработки из тысяч тонн угольного эквивалента в ТДж используется коэффициент – 29,308 ТДж/тыс. т у. т.;

<sup>(4)</sup> – источником является база данных коэффициентов выбросов МГЭИК [10];

<sup>(5)</sup> – выбросы CO<sub>2</sub> при сжигании биомассы не включаются в национальные итоговые данные выбросов от сжигания топлива во избежание двойного учета (учтены в секторе ЗИЗЛХ).

Общее количество выбросов парниковых газов по категориям приводится по каждому их виду и суммарно в CO<sub>2</sub> эквиваленте. Для этого к выбросам ПГ, отличным от CO<sub>2</sub>, применяется коэффициент потенциала глобального потепления, для CH<sub>4</sub> – 25 и для N<sub>2</sub>O – 298. Расчет выбросов по видам ПГ и суммарно в CO<sub>2</sub> эквиваленте рассмотрен для топлив, потребленных в подкатегории «Строительство» категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика» в 2019 г. (таблица 5).

Рассмотренная модель позволяет рассчитать выбросы парниковых газов от сжигания ископаемого топлива в отраслях промышленности и строительстве, зная тип и количество потребленного топлива и применяя коэффициенты перевода количества потребленного топлива из единиц массы (объема) в единицы энергии, а к ним – коэффициенты выбросов ПГ (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O), представленные в таблице 4. По аналогии расчетов количества потребленной энергии и выбросов ПГ от сжигания топлива в подкатегории «Строительство» за 2019 г. получены аналогичные данные за период 2001–2018 гг. (таблица 6).

Информация о совокупном потреблении топлива в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика» (см. таблицу 2) представляет собой исходные данные для расчета суммарных значений выбросов ПГ в этой категории за период 1990–2000 гг. (таблица 7). Для определения суммарных выбросов ПГ в категории «Промышленные отрасли и строительство» сектора «Энергетика» за период 2001–2019 гг. были суммированы отдельно рассчитанные выбросы по следующим подкатегориям:

- чугун и сталь;
- химикаты;
- целлюлоза, бумага и печать;
- пищевая промышленность, напитки и табак;
- машины и механизмы;
- строительство;
- текстиль и кожа;
- прочие отрасли промышленности.

Таблица 5. – Расчет выбросов III от сжигания топлива в 2019 г. в подкатегории «Строительство»

Тип топлива	Потребление, тыс. т	НПС топл., ГДж/т	Потр., (ТДж)	Коэфф. выбр. CO <sub>2</sub> , (кг CO <sub>2</sub> /ТДж)	Выбр. CO <sub>2</sub> , (тыс. т)	Коэфф. выбр. CH <sub>4</sub> , (кг CH <sub>4</sub> /ТДж)	Выбр. CH <sub>4</sub> , (тыс. т)	Коэфф. выбр. N <sub>2</sub> O, (кг N <sub>2</sub> O/ТДж)	Выбр. N <sub>2</sub> O, (тыс. т)	Сумма выбросов в CO <sub>2</sub> эквиваленте, (тыс. т)
Нефть, включая газовый конденсат	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Газ горючий природный	22 <sup>(1)</sup>	33,82 <sup>(2)</sup>	744,040	54 400	40,476	1	0,000744	0,1	0,000074	40,516549
Уголь	0,1	11,90	1,190	101 000	0,120	1	0,000001	1,5	0,000002	0,120752
Торф топливный	NA	15,00	NA	106 000	NA	1	NA	1,5	NA	NA
Дрова для отопления	12,5 <sup>(3)</sup>	15,60	195,031	—	—	30	0,005851	4	0,000780	0,378751
Отходы лесозаготовки и деревообработки	NA <sup>(4)</sup>	29,308 <sup>(5)</sup>	NA	—	—	30	NA	4	NA	NA
Топливные брикеты	2	16,532	3,064	97 500	3,224	1	0,000033	1,5	0,000050	3,239346
Бензин автомобильный	42	44,30	1860,600	69 300	128,940	3	0,005582	0,6	0,001116	129,411800
Дизельное топливо	203	42,58	8643,740	74 100	640,501	3	0,025931	0,6	0,005186	642,694915
Топочный мазут	10	37,96	379,600	77 400	29,381	3	0,001139	0,6	0,000228	29,477382
Газ сжиженный	2	44,20	88,400	63 100	5,578	3	0,000265	0,6	0,000053	10,326346
Газ нефтепереработки сухой	NA	49,50	NA	57 600	NA	1	NA	0,1	NA	NA
Топл. для реакт. двиг.	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Керосины прочие	NA	43,80	NA	71 900	NA	3	NA	0,6	NA	NA
Топливо печное бытовое	NA	42,00	NA	73 300	NA	3	NA	0,6	NA	NA
Кокс	NA	28,20	NA	107 000	NA	1	NA	0,1	NA	NA
Итого			11945,665		848,220		0,039546		0,007489	851,439972

Примечание: <sup>(1)</sup> – млн м<sup>3</sup>;<sup>(2)</sup> – ТДж/млн м<sup>3</sup>;<sup>(3)</sup> – для перевода объема использованных дров из плотных кубических метров в тонны применяется коэффициент – 0,266 т/м<sup>3</sup>;<sup>(4)</sup> – т у. т.;<sup>(5)</sup> – ТДж/тыс. т у. т.

Таблица 6. – Потребления топлива и выбросы ПГ в подкатегории «Строительство» в период 2001–2019 гг.

Год	Потребление топлива, ТДж	Выбросы CO <sub>2</sub> , тыс. т	Выбросы CH <sub>4</sub> , тыс. т	Выбросы N <sub>2</sub> O, тыс. т	Выбросы ПГ в CO <sub>2</sub> экв., тыс. т	Потребление топлива, тыс. т у. т. (29,308 ТДж/тыс. т у. т.)	Удельный выброс ПГ в CO <sub>2</sub> экв. на потребление 1 т у. т., (т CO <sub>2</sub> экв./т у. т.)
	A	B	C	D			
2001	9698,788	680,423	0,035	0,007	683,256	330,926	2,065
2002	9116,270	637,818	0,034	0,006	640,551	311,051	2,059
2003	9266,666	643,760	0,037	0,007	646,662	316,182	2,045
2004	10008,514	694,146	0,040	0,007	697,277	341,494	2,042
2005	11000,626	758,149	0,045	0,008	761,706	375,346	2,029
2006	11000,626	758,149	0,045	0,008	761,706	375,346	2,029
2007	12510,458	865,592	0,049	0,009	869,471	426,862	2,037
2008	13958,506	971,116	0,053	0,010	975,315	476,269	2,048
2009	14219,844	992,354	0,054	0,010	996,681	485,186	2,054
2010	14219,844	992,354	0,054	0,010	996,681	485,186	2,054
2011	14219,844	992,354	0,054	0,010	996,681	485,186	2,054
2012	15571,838	1084,691	0,060	0,011	1089,433	531,317	2,050
2013	17573,342	1235,037	0,064	0,012	1240,183	599,609	2,068
2014	14450,162	1010,879	0,054	0,010	1015,200	493,045	2,059
2015	13467,710	940,646	0,050	0,009	944,665	459,523	2,056
2016	12934,990	908,706	0,047	0,009	912,445	441,347	2,067
2017	13059,180	929,316	0,043	0,008	932,834	445,584	2,094
2018	13219,312	939,681	0,044	0,008	943,274	451,048	2,091
2019	11945,665	848,220	0,040	0,007	851,440	407,591	2,089

Таблица 7. – Суммарное потребление топлива и выбросы ПГ в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика», 1990–2019 гг.

Год	Потребление топлива, ТДж	Выбросы CO <sub>2</sub> , тыс. т	Выбросы CH <sub>4</sub> , тыс. т	Выбросы N <sub>2</sub> O, тыс. т	Выбросы ПГ в CO <sub>2</sub> экв., тыс. т	Потребление топлива, тыс. т у. т. (29,308 ТДж/тыс. т у. т.)	Удельный выброс ПГ в CO <sub>2</sub> экв. на потребление 1 т у. т., (т CO <sub>2</sub> экв./т у. т.)
	A	B	C	D			
1	2	3	4	5	6	7	8
1990	170615,97	11707,594	0,359	0,064	11735,605	5821,481	2,016
1991	156757,81	10831,834	0,317	0,060	10857,560	5348,636	2,030
1992	142099,61	9498,470	0,263	0,048	9519,379	4848,492	1,963
1993	116139,04	7738,994	0,215	0,040	7756,176	3962,708	1,957
1994	99036,38	6528,194	0,179	0,033	6542,463	3379,159	1,936
1995	90632,14	5916,654	0,162	0,029	5929,460	3092,403	1,917
1996	90814,86	5880,064	0,159	0,029	5892,561	3098,637	1,902
1997	93409,02	5999,565	0,154	0,026	6011,298	3187,151	1,886
1998	89393,41	5658,111	0,149	0,025	5669,303	3050,137	1,859
1999	85350,95	5346,884	0,138	0,023	5357,123	2912,206	1,840
2000	85958,70	5340,709	0,157	0,025	5352,164	2932,943	1,825
2001	105849,10	6246,041	0,424	2,551	7016,748	3611,611	1,943
2002	110024,28	6404,874	0,441	0,066	6435,517	3754,070	1,714
2003	119562,04	6912,157	0,462	0,068	6944,059	4079,502	1,702
2004	132323,93	7669,476	0,524	0,078	7705,707	4514,942	1,707
2005	137033,03	7842,895	0,562	0,083	7881,566	4675,619	1,686
2006	142096,43	8149,831	0,579	0,085	8189,543	4848,384	1,689
2007	149438,83	8529,247	0,612	0,089	8571,156	5098,909	1,681
2008	151288,75	8550,703	0,643	0,093	8594,556	5162,029	1,665
2009	132091,62	8054,251	0,306	0,048	8076,226	4507,016	1,792
2010	135867,65	8015,011	0,412	0,062	8043,854	4635,855	1,735
2011	125573,64	7744,047	0,310	0,051	7767,068	4284,620	1,813

Окончание таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8
2012	149718,18	9319,044	0,350	0,061	9345,938	5108,441	1,830
2013	156955,98	9700,249	0,477	0,082	9736,613	5355,397	1,818
2014	148047,93	9108,385	0,484	0,085	9145,696	5051,451	1,811
2015	135532,82	8339,187	0,480	0,083	8375,914	4624,431	1,811
2016	149256,32	9487,363	0,342	0,066	9515,696	5092,682	1,869
2017	149382,54	9470,714	0,332	0,065	9498,494	5096,989	1,864
2018	131965,51	8654,538	0,245	0,055	8677,183	4502,713	1,927
2019	127020,11	8342,449	0,223	0,053	8363,809	4333,974	1,930

Приведенная модель расчета выбросов при сжигании ископаемого топлива в отраслях промышленности позволила рассчитать удельный показатель выброса ПГ в CO<sub>2</sub> экв. на потребление 1 т у. т., в подкатегории «Строительство» и в категории «Производственные отрасли и строительство» – 2,089 т CO<sub>2</sub> экв./т у. т. и 1,930 т CO<sub>2</sub> экв./т у. т., соответственно. Удельный показатель выброса ПГ в CO<sub>2</sub>-эквиваленте на потребление 1 т у. т. в категории «Производственные отрасли и строительство» ниже, чем в подкатегории «Строительство», что говорит о том, что в других подкатегориях использованы более «чистые» виды ископаемого топлива.

**Заключение.** Впервые разработана и представлена модель расчета выбросов парниковых газов в подкатегории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика», которая будет включена в национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом, с целью повышения его качества и более полного соответствия руководящим принципам представления ежегодной отчетности по РКИК ООН [16].

Полученные результаты могут быть использованы для расчета сокращения выбросов ПГ от применения более чистых видов ископаемого топлива и возобновляемых источников энергии при сжигании ископаемого топлива в отраслях промышленности, зная тип и количество заменяемого топлива, а также для расчета выбросов ПГ на единицу произведенной продукции.

В отличие от существующих и утвержденных в стране руководств и методик, приведенная модель расчета выбросов ПГ в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика», имеет следующие преимущества:

- определяет перечень необходимых наборов данных для расчета выбросов ПГ в категории;
- систематизирует исходные данные;
- содержит коэффициенты, необходимые для расчетов выбросов ПГ;
- включает актуальные коэффициенты глобального потепления;
- разработана в соответствии с требованиями к представлению ежегодных инвентаризаций выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ в Секретариат РКИК ООН.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Об одобрении Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь, 10 апр. 2000 г., № 177 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020.
2. Рамочная Конвенция об Изменении Климата Организации Объединенных Наций [Электронный ресурс] : [заключена в г. Нью-Йорке 09.05.1992 г.]. – Режим доступа: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/background\\_publications\\_htmlpdf/application/pdf/convru.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convru.pdf). – Дата доступа: 13.08.2020.
3. Об утверждении Положения о порядке ведения государственного кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов [Электронный ресурс] : Постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 10 апр. 2006 г., № 485 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020.
4. О присоединении Республики Беларусь к Киотскому протоколу к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь, 12 авг. 2005 г., № 370 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020.
5. Лаевская, Е.В. Состояние и перспективы формирования климатического законодательства Республики Беларусь / Е.В. Лаевская // Право в современном белорусском обществе : сб. науч. тр. / Нац. центр законодательства и правовых исследований Респ. Беларусь; редкол.: Н.А. Карпович (гл. ред.) [и др.]. – Минск : СтроймедиаПроект, 2016. – Вып. 11. – С. 362–371.
6. 1/CP.20 [Электронный ресурс] : Решение Конф. Сторон Рамочной Конвенции об Изменении Климата Организации Объединенных Наций. – Режим доступа: <https://unfccc.int/resource/docs/2014/cop20/eng/10a01.pdf>. – Дата доступа: 12.10.2020.

7. 1/CP.24 [Электронный ресурс] : Решение Конф. Сторон Рамочной Конвенции об Изменении Климата Организации Объединенных Наций. – Режим доступа: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/10a1.pdf>. – Дата доступа: 12.10.2020.
8. Доклад Конф. Сторон, действующей в качестве совещания Сторон Парижского соглашения, о работе ее первой сессии, Катовица, 2–15 дек. 2018 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2018\\_03a01E.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2018_03a01E.pdf). – Дата доступа: 12.10.2020.
9. 9/CMA.2 [Электронный ресурс] : Решение Конф. Сторон, действующей в качестве совещания Сторон Парижского соглашения, о работе ее второй сессии, Мадрид, 2–15 дек. 2019 г. – Режим доступа: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2019\\_06a01E.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2019_06a01E.pdf). – Дата доступа: 12.10.2020.
10. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов [Электронный ресурс] // Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006. – Режим доступа: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/>. – Дата доступа: 12.10.2020.
11. Интерактивная карта систем торговли выбросами [Электронный ресурс] // Международное сотрудничество по углеродному развитию (ICAP). – Режим доступа: <https://icapcarbonaction.com/ru/ets-map/>. – Дата доступа: 12.10.2020.
12. Государственный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов Республики Беларусь 1990–2018 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2020>. – Дата доступа: 12.10.2020.
13. Справочник документов по промышленным технологиям [Электронный ресурс] // Европейского бюро по контролю загрязнений (BREF). – Режим доступа: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/>. – Дата доступа: 12.10.2020.
14. International Standard Industrial Classification of all Economic Activities [Electronic resource]. – Mode of access: [https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm\\_4rev4e.pdf](https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm_4rev4e.pdf). – Date of access: 12.10.2020.
15. Энергетический баланс Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/7cc/7cc964224dad43b1c5783ec065e03ae1.pdf>. – Дата доступа: 12.10.2020.
16. 24/CP.19 [Электронный ресурс] : Решение Конференции Сторон Рамочной Конвенции об Изменении Климата Организации Объединенных Наций. – Режим доступа: <https://unfccc.int/resource/docs/2013/cor19/rus/10a03r.pdf>. – Дата доступа: 12.10.2020.
17. Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Выбросы и поглощение парниковых газов. Правила расчетов выбросов парниковых газов в основных секторах экономики Республики Беларусь [Электронный ресурс] : ТКП 17.09-05-2013. – Минск : Минприроды Респ. Беларусь, 2013. – 45 с. – Режим доступа: [http://ecoinv.by/images/pdf/tkp\\_fond/\\_17.09-05-2013.pdf](http://ecoinv.by/images/pdf/tkp_fond/_17.09-05-2013.pdf). – Дата доступа: 12.10.2020.
18. Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Выбросы и поглощение парниковых газов. Правила расчета выбросов за счет внедрения мероприятий по энергосбережению, возобновляемых источников энергии : [Электронный ресурс] : ТКП 17.09-01-2011. – Минск : Минприроды Респ. Беларусь, 2011. – 29 с. – Режим доступа: [http://ecoinv.by/images/pdf/tkp\\_fond/\\_17.09-01-2011.pdf](http://ecoinv.by/images/pdf/tkp_fond/_17.09-01-2011.pdf). – Дата доступа: 12.10.2020.
19. База данных коэффициентов выбросов Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Электронный ресурс] // Институт глобальной политики в области окружающей среды. – Режим доступа: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>. – Дата доступа: 12.10.2020.

*Поступила 13.10.2020*

## **DEVELOPMENT OF A MODEL FOR CALCULATION GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE CATEGORY "MANUFACTURING INDUSTRIES AND CONSTRUCTION" IN THE "ENERGY" SECTOR**

**D. MELEKH**

*To ensure the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions, quality accounting is required, which should be carried out at the national and corporate level. Purpose of this research – development of a model and calculation of GHG emissions in the category “Manufacturing and construction” in the “Energy” sector. Used the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines, adapted to the national circumstances of the Republic of Belarus. Results: a model was developed and GHG emissions were calculated in the category “Manufacturing Industries and Construction” of the “Energy” sector. The calculation model will be used for inventories of emissions by sources and removals by sinks of GHGs, including calculations of GHG emission reductions from the use of cleaner fossil fuels and renewable energy sources.*

**Keywords:** *calculation of emissions, greenhouse gases, emission factors.*

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 666.797

ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С СЕЛЕКТИВНЫМИ СЛОЯМИ ИЗ АЛЮМООКСИДНЫХ МИКРОСФЕРС.М. АЗАРОВ, Т.А. АЗАРОВА, А.А. ДРОБЫШ, Т.Е. ЕВТУХОВА, Д.Н. БАЛЫДКО,  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Е.Е. ПЕТЮШИК

(Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск)

Д.Л. ЛЕОНИК

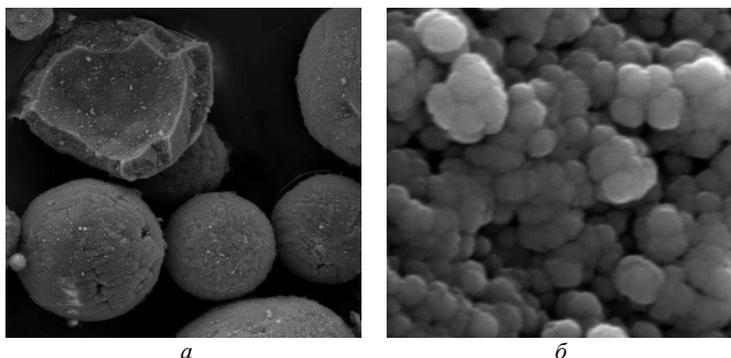
(ОАО «Полоцк-Стекловолокно»)

Исследованы структурно-фазовые превращения при формировании двухслойного пористого материала спеканием алюмооксидных микросфер на крупнопористой алюмосиликатной подложке. Установлено, что условием взаимодействия микросфер является жидкофазный механизм спекания, позволяющий получать мембранные слои регулярной структуры. В результате спекания алюмооксидных микросфер, легированных марганцевосодержащим комплексом с добавками оксида кремния наряду с  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (корунд) образуется силлиманит орторомбической модификации в количестве 27%, гексагональный кварц – 26%, тетрагональный пиролюзит – 10% и гексагональный SiC (муассанит) – 6%. Повышение регулярности пор мембранного слоя способствует постоянству периода фильтрации между регенерациями.

**Ключевые слова:** структурно-фазовые превращения, двухслойный пористый материал, алюмооксидные микросферы, жидкофазный механизм, регенерация.

**Введение.** Тенденции развития современной техники направлены на увеличение ресурса работы пористых материалов для очистки жидкостей и газов, в частности воды и воздуха. Приемы и методы, решающие проблему созданием фильтров из полимерных материалов, металлических и керамических порошков представлены в большом количестве научных работ и реализуются целым рядом предприятий. В то же время анализ приведенных данных показывает, что мембранные материалы требуют увеличения межрегенерационных циклов. В связи с этим поиск новых керамических фильтровальных материалов, пригодных к внедрению в технологические схемы очистки воды и воздуха, является актуальным. Такие работы продолжают активно проводиться ведущими мировыми изготовителями фильтрующих мембранных материалов. Алюмооксидные микросферы (диаметр < 100 мкм), характеризующиеся практически идеальной шарообразной формой, наличием внутренней пористости и нанодисперсной структурой поверхности, создают предпосылки для формирования на крупнопористых алюмосиликатных подложках мембранных слоев, обеспечивающих увеличение межрегенерационных фильтроциклов.

В то же время алюмооксидные микросферы с нанодисперсной структурой поверхности, в отличие от алюмосиликатных микросфер, являются достаточно новым материалом. Способ приготовления микросферического алюмооксидного порошка осуществляется путем гидратации, сушки и прокаливания продукта термохимической активации тригидрата оксида алюминия. В результате получают полые сферы наружным диаметром от 1 до 100 мкм и толщиной стенки до 5 мкм (рисунок 1, а). Такие микросферы характеризуются нанодисперсной структурой поверхности с размером зерен около 100 нм (рисунок 1, б).



а – полые алюмооксидные микросферы; б – нанодисперсная структура поверхности

Рисунок 1. – Микроструктура алюмооксидных микросфер

Процесс спекания таких частиц мало изучен. Отдельных исследований требует случай формирования селективных слоев из алюмооксидных микросфер на крупнопористых керамических подложках, сопровождаемый не только сложными фазовыми превращениями в результате нагрева, но и практически неконтролируемой усадкой.

**Материалы и методики исследований.** Для приготовления шихты использовали полые алюмооксидные микросферы HCM-S размером менее 40 мкм. Состав микросфер согласно информации производителя  $\theta$ - и  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Алюмооксидные микросферы характеризуются наличием нанодисперсной поверхности, имеющей значительно большую активность при спекании, чем процесс формирования контактов между частицами. Поэтому формирование пористого тела при спекании алюмооксидных микросфер без применения специальных методов не представляется возможным. До момента плавления микросфер контактообразование между ними не представляется возможным, поэтому в шихту дополнительно вводили марганцевосодержащий комплекс с добавками оксида кремния, активирующий процесс спекания. Для измерения величин объемной усадки, прочности на сжатие и пористости использовали экспериментальные образцы в виде цилиндров диаметром и высотой 16 мм. Коэффициент проницаемости, размер пор определяли на двухслойных трубках с толщиной стенки 2 мм, диаметром 12 мм, длиной 100 мм. Длительность межрегенерационных циклов исследовали на трубках диаметром 65 мм и длиной 70 мм. Двухслойную структуру трубок формировали нанесением на предварительно спеченную крупнопористую алюмосиликатную подложку мембранных слоев из алюмооксидных микросфер. Спекание экспериментальных образцов проводили в лабораторной печи на воздухе. Нанесение мембранных слоев производили капиллярным всасыванием по методике, изложенной в [1].

Способ получения, давление прессования экспериментальных образцов и температуры их спекания представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Технологические режимы изготовления образцов

Вид образца	Способ получения	Давление прессования, МПа	Температура спекания, °С
Цилиндр, трубки	Прессование с последующим спеканием	40	900, 950, 1000
Крупнопористая подложка	Прессование с последующим спеканием	30	1200–1250
Мембрана	Капиллярное всасывание с последующей термообработкой	–	900, 950, 1000

Характеристики образцов (пористость, коэффициент проницаемости и др.), рентгеноспектральный, рентгенофазовый анализы и морфологию поверхности разрабатываемых материалов исследовали по стандартным методикам, принятым в порошковой металлургии и материаловедении.

Исследование элементного состава проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA Energy 350» фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Погрешность метода составляет 10–15%.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Значения объемной усадки при спекании, прочности при сжатии, пористости образцов исследуемых материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Характеристики цилиндрических алюмосиликатных образцов

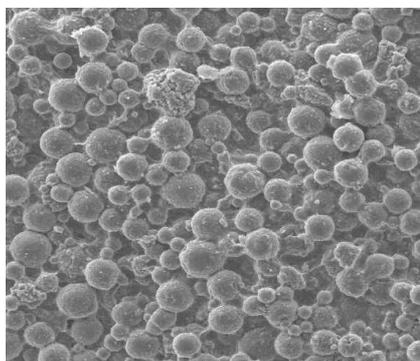
Крупнопористая подложка			
Температура спекания, °С	1200	1225	1250
Прочность при сжатии, МПа	27,5	32,6	39,9
Пористость, %	35,3	30,4	29,2
Объемная усадка, %	11,9	12,1	15,3
Мембранный слой			
Температура спекания, °С	900	950	1000
Прочность при сжатии, МПа	18,1	19,4	22,1
Пористость, %	46,3	42,8	36,1
Объемная усадка, %	10,2	14,6	16,1

Результаты рентгенофазового анализа мембранного слоя, спеченного при температуре 950 °С, представлен в таблице 3.

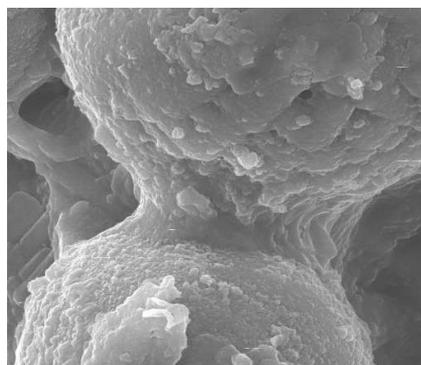
Изображения микроструктур поверхностей мембранного слоя на основе оксидных микросфер представлены на рисунках 2, 3.

Таблица 3. – Фазовый состав мембранного слоя после спекания при 950 °С, %

Элемент состава	Содержание, %
Корунд $Al_2O_3$ (ромбоэдрический)	31
Силлиманит $Al_2SiO_5$ (орторомбический)	27
Кварц $SiO_2$ (гексагональный)	26
Пирролюзит $MnO_2$ (тетрагональный)	10
Муассанит $SiC$ (гексагональный)	6



а

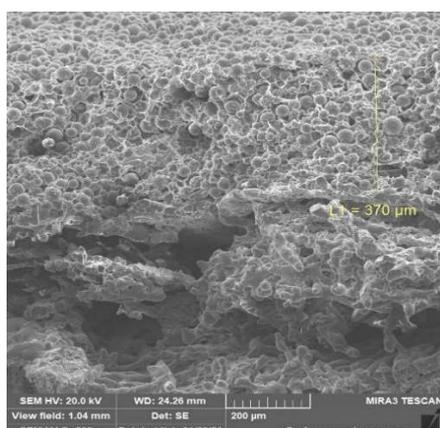


б

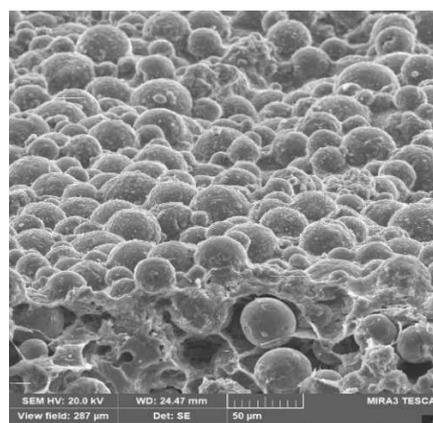
а – поверхность; б – межчастичный контакт, сформированный жидкофазным спеканием  
Рисунок 2. – Структура мембранного слоя

Анализ результатов рентгенофазового анализа, представленных в таблице 3, показывает, что в результате спекания алюмооксидных микросфер, легированных марганцевосодержащим комплексом с добавками оксида кремния наряду с  $\alpha-Al_2O_3$  (корунд) образуется силлиманит орторомбической модификации в количестве 27%, гексагональный кварц – 26%, тетрагональный пирролюзит – 10% и гексагональный SiC (муассанит) – 6%. Присутствие некоторого количества карбида кремния в спеченном материале из исходного алюмосиликатного порошка можно объяснить использованием органического пластификатора (5% поливинилового спирта), используемого в процессе формирования мембранного слоя.

Нанесение суспензии из микросфер на предварительно спеченную при температуре 1200–1250 °С крупнопористую подложку приводит к формированию двухслойного материала (см. рисунок 3, а) с мембранным слоем регулярной структуры (см. рисунок 3, б).



а



б

а – излом; б – поверхность мембраны  
Рисунок 3. – Структура мембранного слоя на крупнопористой подложке

Определение объемной усадки производили измерением геометрических размеров цилиндрических образцов (10 штук в каждой партии) до и после спекания при температуре 950 °С. Результаты изменения усадки в зависимости от количества марганцевосодержащего комплекса при постоянном содержании оксида кремния представлены в таблице 4.

Из представленных результатов следует, что величина объемной усадки не превышает 12%. Это говорит об ограниченном смачивании алюмооксидных микросфер жидкой фазой при спекании в исследуемом диапазоне температур.

Таблица 4. – Составы шихты и усадка образцов

Ингредиенты, мас. %	Составы			
	82	78	74	70
Микросферы	82	78	74	70
Марганцевосодержащий комплекс	18	22	26	30
Объемная усадка, %	5	6	8	12

Ограниченное смачивание подтверждается видом контакта, представленного на рисунке 3, б. При спекании алюмооксидных микросфер, легированных марганцевосодержащим комплексом, обеспечивается тип жидкофазного спекания, при котором над процессами диффузии преобладает движение жидкой фазы по поверхности частиц в область контакта без изменения конфигурации и объемного содержания областей твердой фазы. Малая объемная усадка при спекании объясняется ограниченным смачиванием жидкой фазой твердофазных областей [2].

Сравнительные характеристики исследуемых образцов в виде трубок (диаметр 16 мм, длина 40–70 мм и толщина стенки 4 мм) представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Фильтрующие характеристики образцов

Характеристики	Трубки	
	Двухслойные	Крупнопористая подложка
Максимальный размер пор, мкм	15–20	100–200
Средний размер пор, мкм	6–9	40–60
Производительность (Q)*, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·с	0,15	0,85
Задерживание частиц > 5 мкм, %	100	72

Примечание: \* – по водопроводной воде.

Из данных, представленных в таблице 5, следует, что двухслойный образец имеет средний размер пор 6–9 мкм, производительность по воде до 0,15 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с и степень задерживания частиц 5 мкм и выше до 100%. Крупнопористая подложка характеризуется средним размером пор 40–60 мкм, производительностью по воде 0,85 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с и степенью задерживания частиц 72%.

Для оценки влияния режимов фильтрации на межрегенерационный период использовали экспериментальные образцы диаметром 65 мм. Фильтрация производилась «снаружи – внутрь» трубчатого образца, его регенерация – обратным током «изнутри – наружу». Очистку водопроводной воды производили при рабочих давлениях 0,1–0,6 МПа. Регенерацию обратным током осуществляли при условии падения производительности до 90% от начальной. Время регенерации определялось опытным путем и составляло в каждом цикле 25 с. Результаты экспериментов по регенерации представлены на рисунке 4.

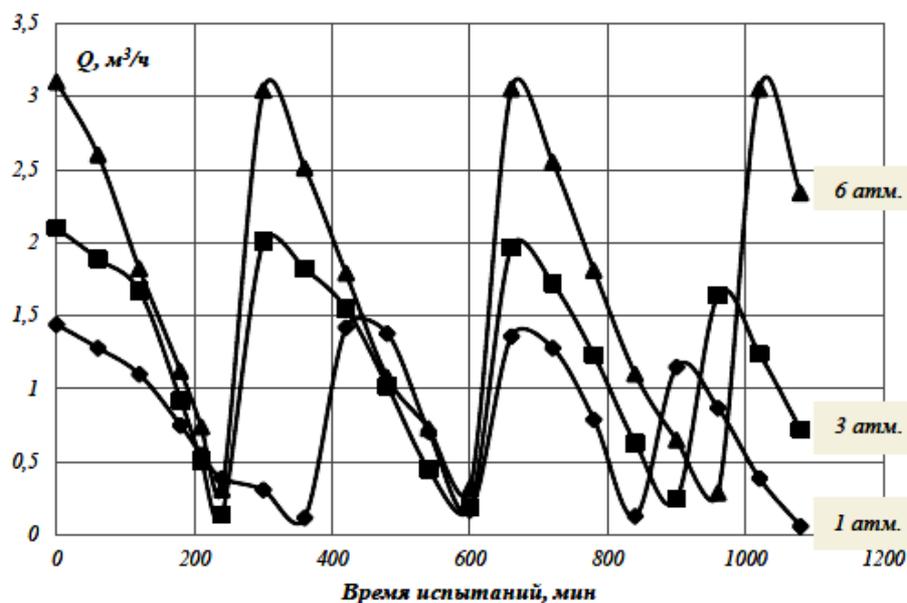


Рисунок 4. – Изменение производительности пористых материалов на основе алюмооксидных микросфер при очистке воды для различных рабочих давлений и регенерации обратным потоком

Видно, что при давлении фильтрации 1 атм период фильтроцикла с течением времени монотонно уменьшается. С увеличением рабочего давления от 1 до 6 МПа уменьшение периода фильтроцикла практически прекращается. Последний вывод является важным для проектирования установок очистки воды.

Проведенные исследования показывают, что получены двухслойные материалы, характеризующиеся размером пор подложки 40–60 мкм и мембранного слоя с размером пор до 6 мкм. Причем толщина крупнопористой подложки составляет 4–6 мм, а толщина мембранного слоя не превышает 400 мкм. Особенностью разработанных материалов является практически идеально сферическая форма частиц, формирующих мембранный слой. Указанное обстоятельство повышает регулярность пор мембранного слоя по сравнению с известными многослойными алюмосиликатными материалами, разработанными ранее [3]. За счет повышения регулярности структуры мембраны период между регенерациями становится постоянным при рабочем давлении 6 атм.

**Заключение.** Впервые в практике порошковой металлургии исследованы условия формирования двухслойного пористого материала спеканием алюмооксидных микросфер на крупнопористой алюмосиликатной подложке. Установлено, что условием взаимодействия микросфер является жидкофазный механизм спекания, позволяющий получать мембранные слои регулярной структуры. Повышение регулярности пор мембранного слоя способствует постоянству периода фильтрации между регенерациями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пористая алюмосиликатная керамика / С.М. Азаров [и др.]. – Минск : Ковчег, 2009. – 258 с.
2. Regulation of Sintering Process of Selective Layers on A Large-Porous Aluminosilicate Substrate by Activating Modifiers / Y.Y. Piatsiushyk [et al.] // Euro PM2018 – PM for Current & Future Applications : European Powder Metallurgy Association (EPMA), 14–18 October 2018 / Bilbao Exhibition Centre (BEC).
3. Влияние режимов фильтрации на межрегенерационный цикл многослойных материалов из порошков на основе силикатов и алюмосиликатов / С.М. Азаров [и др.]. // Порошковая металлургия. – где издан: издательство. – Вып. 40. – С. 113–118.

Поступила 08.07.2020

#### RESEARCH OF CERAMIC POROUS MATERIALS WITH SELECTIVE LAYERS OF ALUMINUM OXIDE MICROSPHERES

**Y. PIATSIUSHYK, S. AZARAU, T. AZARAVA, A. DROBYSH, T. EVTUHOVA,  
D. BALYDKO, D. LEONIK**

*Structural and phase transformations during the formation of a two-layer porous material by sintering aluminum oxide microspheres on a large-pore aluminum-silicate substrate are studied. It is established that the condition for interaction of microspheres is a liquid-phase sintering mechanism that allows obtaining membrane layers of a regular structure. As a result of sintering of aluminum oxide microspheres doped with a manganese-containing complex with additives of silicon oxide, along with  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (corundum), sillimanite of orthorhombic modification is formed in the amount of 27%, hexagonal quartz-26%, tetragonal pyrolusite – 10% and hexagonal SiC (moissanite) – 6%. Increasing the regularity of the membrane layer pores contributes to the constancy of the filtration period between regenerations.*

**Keywords:** structural-phase transformations, two-layer porous material, aluminum oxide microspheres, liquid-phase mechanism, regeneration.

УДК 666.3/7

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ВИДОВ ОТОЩИТЕЛЕЙ И ЦВЕТОНЕСУЩЕГО СЫРЬЯ НА СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ**

*д-р техн. наук, проф., А.Т. ВОЛОЧКО, канд. техн. наук К.Б. ПОДБОЛОТОВ, Н.А. ХОРТ  
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)*

**П.И. МАНАК**  
(ОАО «Обольский керамический завод»)

*Приведены исследования влияния комплексных видов отощителя и цветонесущих компонентов (пигментов) на свойства изделий строительной керамики. Построены диаграммы «состав – свойство» для комбинации трёх различных отощителей – отсева из материалов дробления горных пород, теннисита и речного песка, использование которых позволит выпускать изделия строительной керамики с заданными характеристиками, а также производить регулировку основных технологических параметров процесса сушки и обжига. Показана возможность использования в качестве цветонесущих компонентов различных промышленных отходов, которые обеспечивают получение изделий различной цветовой гаммы без ухудшения их основных физико-механических характеристик.*

**Ключевые слова:** строительная керамика, отощители, цветонесущие компоненты, чувствительность к сушке, прочность, цвет.

**Введение.** Строительная керамика – большая группа керамических изделий, применяющихся при строительстве жилых и промышленных зданий и сооружений. Керамические стеновые изделия – один из наиболее древних искусственных материалов, их возраст – около 5 тыс. лет. Строительный керамический кирпич является самым распространённым местным стеновым материалом, позволяющим экономить дефицитные металлы, цемент, а также транспортные средства. Керамический кирпич является конструкционным строительным материалом, обладающим прекрасными эксплуатационными, эстетическими и экологическими свойствами, что определяет его спрос в современном строительстве [1; 2].

Основным сырьевым материалом, применяемым при производстве изделий строительной керамики, является глина. Однако использование глин белорусских месторождений в чистом виде, без введения добавок, не всегда представляется возможным. Основное назначение добавок – это необходимость улучшения технологических свойств глин и повышение физико-механических характеристик готовых изделий. Основное количество добавок, применяемых при производстве изделий строительной керамики, относятся к отощающим материалам. Назначение отощающих материалов – это повышение технологических свойств глины за счёт снижения её пластичности и сушильной усадки. Введение отощающих добавок позволяет увеличить производительность формовочного оборудования, снижает время необходимое для сушки изделий. Правильно подобранное количество и вид отощающих материалов уменьшает количество брака, который может образоваться при формовании и сушке изделий строительной керамики. Выбор отощающих добавок во многом зависит от их наличия в непосредственной близости от предприятия. В настоящее время на большинстве керамических заводов Республики Беларусь в качестве отощающих компонентов применяются отсевы из материалов дробления горных пород (отсев), теннисит, кварцевый песок. Также, в последнее время получила распространение практика использования в качестве отощителя речного песка, который образуется при очистке русла рек [3; 4].

Ещё одной добавкой, применяемой в керамическом производстве, являются цветонесущие компоненты. Их назначение – расширить ассортимент выпускаемой продукции за счёт выпуска лицевой продукции различной цветовой гаммы. Лицевой керамический кирпич предназначен для наружной отделки стен и фундаментов зданий. Он может исполнять роль как отделочного, так и конструкционного материала. Применение различных цветонесущих компонентов позволяет изменять природный цвет обожжённого кирпича в широких пределах. В качестве цветонесущих материалов – пигментов – могут использоваться различные вещества, как природного происхождения, так и искусственно синтезированные. В последние годы наметилась тенденция использования в качестве цветонесущих материалов различных промышленных отходов. Это позволяет с одной стороны уменьшить стоимость лицевого керамического кирпича, а с другой – снижает загрязнение окружающей среды промышленными отходами и вовлекает в оборот неиспользуемое сырьё.

Целью данной работы является исследование влияния комплексных видов отощителя и цветонесущих видов сырья, а также отходов производства на свойства изделий строительной керамики.

**Материалы, способ подготовки сырьевых материалов и методы исследования.** В настоящей работе в качестве основного глинистого сырья для разработки составов изделий строительной керамики использовалась глина месторождения «Заполье» – основное сырьё для ОАО «Обольский керамический завод».

Данная глина имеет следующие характеристики: глинистая порода светло-коричневого цвета; структура крупнодисперсная, текстура беспорядочная (комковатая); легко поддается дроблению, хорошо размокает в воде, бурно вскипает, обработанная 10%-м (здесь и далее – приведены массовые проценты) раствором HCl. По числу пластичности глина относится к группе умеренно пластичного сырья (число пластичности 5–7). По чувствительности к сушке (по Чижевскому) – к группе высокочувствительного. По показателям огнеупорности сырья является легкоплавкой (1139 °С). По степени спекания глинистое сырье относится к группе неспекающихся. Содержит до 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и до 55% SiO<sub>2</sub>, при этом количество свободного SiO<sub>2</sub> может достигать 25% [5; 6].

В качестве отощающих материалов были выбраны – теннисит, отсев из материалов дробления горных пород (далее – отсев) и речной песок. Гранулометрический состав используемых отощителей приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Гранулометрический состав отощителей

Фракция	Теннисит	Отсев	Речной песок
	содержание фракции, мас. %		
> 2,5 мм	4,4	29,5	3,57
2,5–1,6 мм	22,4	13,25	3,85
1,6–1 мм	27,8	11,5	7,7
1–0,315 мм	33,4	19,5	53,55
< 0,315 мм	12	26,25	31,33

Для увеличения интенсивности природного цвета обожжённого черепка и расширения цветовой гаммы лицевого керамического кирпича использовались следующие цветонесущие компоненты: чистые оксиды железа (III) и хрома (III), отходы никельсодержащих шламов (содержат NiO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub> и др. оксиды), отходы абразивных кругов, загрязнённые железом, аспирационная пыль ОАО «Белорусский металлургический завод», а также глина месторождения «Городное».

Глины «Заполье» и «Городное» были предварительно высушены и размолоты до фракции размером менее 1 мм. Отощители были высушены и просеяны, для приготовления формовочных масс использовалась фракция 0–2,5 мм. Образцы для проведения исследования были изготовлены методом пластического формования. Количество отощителей и цветонесущих компонентов в составе керамических масс достигало 20%.

Пластическую керамическую массу изготовили путём смешивания предварительно взвешенных компонентов с добавлением воды до влажности массы 17–19% и последующим вылёживанием не менее 24 ч. Формование осуществлялось методом ручной набивки пластической массы в металлические формы в виде кирпичей размером 65 × 30 × 15 мм и цилиндров диаметром 30 мм и высотой 30–40 мм. После формования проведена сушка изделий в естественных условиях в течение не менее 24 ч с последующей сушкой в сушильном шкафу при температуре 100 ± 10 °С. После сушки образцы подвергались термической обработке в электропечи при температуре 1050 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Физико-механические характеристики полученных материалов оценивались по следующим параметрам: коэффициент чувствительности к сушке, кажущаяся плотность, водопоглощение, механическая прочность при сжатии. Цвет полученных образцов оценивался в соответствии с классификатором цветов по 1000-цветному атласу ВНИИ им. Д.И. Менделеева [7].

Обработка полученных результатов осуществлялась с помощью метода построения симплексных решёток. В нашем случае были построены диаграммы «состав – свойство» для трёхкомпонентной системы отсев-теннисит-речной песок. Расчёт и построение диаграмм произведён в программе Matlab. В вершинах треугольников находятся отощающие компоненты, содержание одного компонента в количестве 20% принято за 100% в смеси.

**Полученные результаты.** Суммарное количество отощителей, использованных при исследовании их влияния на свойства изделий строительной керамики, составляло 20%.

На рисунке 1 представлена диаграмма зависимости коэффициента сушки от состава.

Минимальный коэффициент чувствительности к сушке имеют образцы с содержанием 20% теннисита. С ростом количества отсева и речного песка в смеси чувствительность к сушке образцов увеличивается. Это можно объяснить тем, что в составе теннисита основную часть составляет фракция с размером зёрен более 1 мм, в отличие от отсева и речного песка, у которых основная часть представлена фракцией с размером зёрен менее 1 мм. Следует отметить, что максимальную чувствительность к сушке имеют составы с соотношением отсева и речного песка 1:1, а также соотношением теннисита и речного песка 1:1. По-видимому, у данных составов такое соотношение зёрен различных фракций, которое позволяет им быть равномерно распределёнными в глине. С одной стороны, это приводит к росту сушильной усадки, а с другой – усадка происходит равномерно во всех направлениях без возникновения внутренних напряжений на зёрнах отощителя.

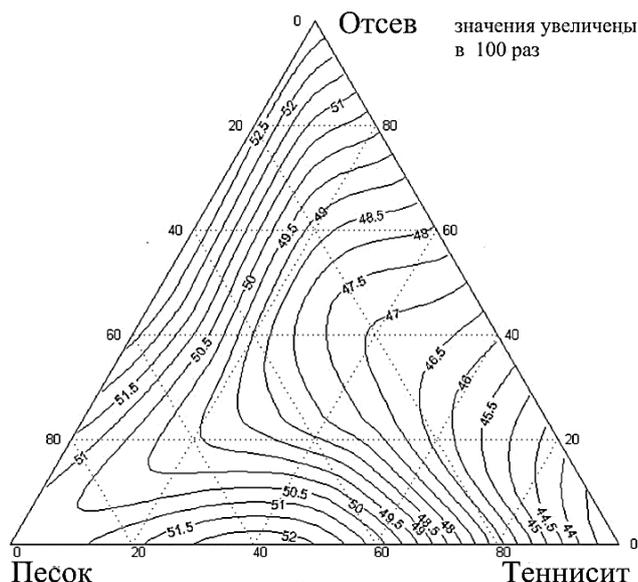


Рисунок 1. – Зависимость коэффициента чувствительности к сушке от состава шихты

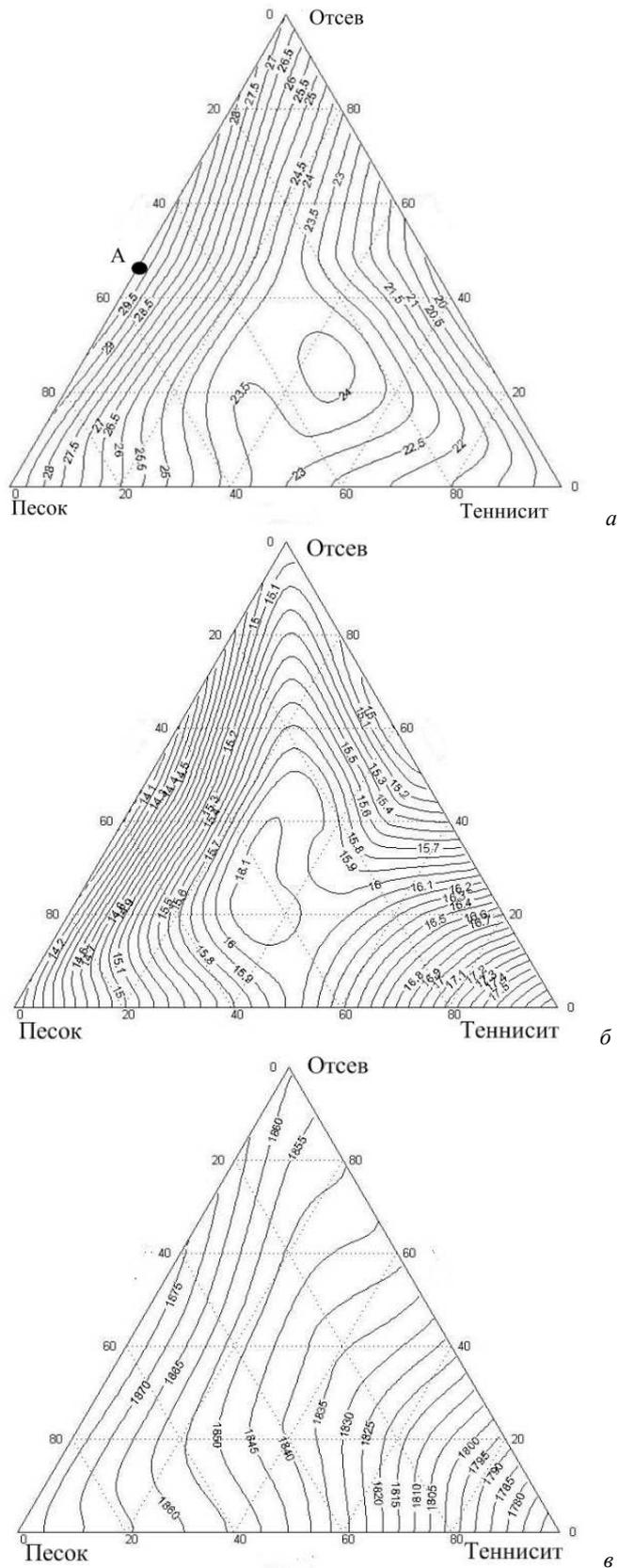
Зависимость основных физико-механических характеристик (прочности при сжатии, водопоглощения и кажущейся плотности) от состава приведена на рисунке 2. Полученные результаты определения прочности при сжатии образцов показали, что прочность при сжатии изменяется от 20 до 30,58 МПа. При температуре обжига 1050 °С область с максимальными значениями прочности при сжатии (рисунок 2, а) проходит вдоль линии составов «отсев – речной песок» с максимумом при соотношении отсева и речного песка 1:1, точка А. Водопоглощение образцов изменяется в диапазоне 14–18% (рисунок 2, б). Кажущаяся плотность полученных образцов изменяется в диапазоне от 1780 до 1880 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 2, в).

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы: введение в состав шихт теннисита приводит к снижению прочности при сжатии, увеличивает водопоглощение и снижает кажущуюся плотность. Наличие у отсева и речного песка значительного количества фракции с размером зёрен менее 0,315 мм позволяет им активно участвовать в процессе спекания, образуя с глинистыми минералами высоковязкие расплавы, которые цементируют крупные частицы в монолитную массу. Теннисит, благодаря наличию значительного количества фракции с размером зёрен 1–2,5 мм, в процессе обжига образует каркас, скреплённый спёкшейся глиной. Такое различное поведение отощающих добавок в процессе обжига и обуславливает соответствующее изменение физико-механических свойств.

В таблице 2 приведены результаты определения цвета и механической прочности образцов, полученных при использовании различных цветонесущих компонентов.

Таблица 2. – Характеристика полученных образцов в зависимости от вида и содержания цветонесущих компонентов

№ состава	Цветонесущий компонент	Содержание цветонесущего компонента, мас. %	Цвет	Прочность при сжатии, МПа
1	Базовый состав	–	кремово-оранжевый	23,4
2	Оксид железа (III)	2,5	темно-жёлто-розовый	23,1
3		5	коричнево-оранжевый	23,5
4		10	красно-коричневый	24
5	Оксид хрома (III)	2,5	кофе с молоком	22,6
6		5	беж темный	23,9
7		5	беж темный	22,8
8	Никельсодержащий шлам	10	беж	21,5
9		15	серый	20,4
10		5	темно-жёлто-розовый	21,6
11	Отходы абразивных кругов	10	коричнево-оранжевый	20,1
12		20	красно-коричневый	18,3
13		5	кофе с молоком	21,5
14	Аспирационная пыль	10	палевый	20,6
15		Глина «Городное»	25	красно-кремово-оранжевый



*a* – прочность при сжатии; *б* – водопоглощение; *в* – кажущаяся плотность

Рисунок 2. – Зависимость физико-механических свойств от состава шихты

Показано, что использование различных цветонесущих компонентов позволяет существенно расширить ассортимент выпускаемых изделий строительной керамики. Так, введение в керамическую массу таких добавок как оксид железа (III), отходы абразивных кругов, а также глины «Городное», повышает насыщенность цвета изделий, получаемых из глины «Заполье», по сравнению с керамическими изделиями, изготовленными без цветонесущих добавок. Применение в качестве цветонесущих компонентов оксида хрома (III), никельсодержащих шламов и аспирационной пыли позволяет существенно изменять цвет керамических изделий. Таким образом, использование в качестве цветонесущих компонентов различных промышленных отходов позволяет заменить традиционные пигменты – чистые оксиды. Например, использование отходов абразивных кругов позволяет получить керамические изделия по цвету аналогичные изделиям, при изготовлении которых использовался пигмент в виде чистого оксида железа (III). Определение основных физико-механических характеристик полученных образцов с добавлением цветонесущих компонентов показало, что дополнительное введение в керамическую массу этих компонентов незначительно влияет на основные свойства строительной керамики. Так, из приведенных данных видно, что прочность при сжатии образцов изменяется незначительно (см. таблицу 2).

**Заключение.** На основе полученных результатов о влиянии комплексных видов отощающих компонентов на физико-механические свойства изделий строительной керамики можно оптимизировать составы керамических масс. Использование полученных результатов позволяет регулировать основные параметры процессов сушки и обжига в зависимости от отощителей, использованных при производстве. Установлено, что для производства изделий строительной керамики оптимальным является использование отсева или речного песка в смеси с тенниситом в соотношении 4:1. Использование данных составов позволит выпускать керамические изделия марки по прочности не ниже М250, при этом указанные составы обладают удовлетворительными сушильными свойствами.

Применение различных цветонесущих компонентов позволяет расширить ассортимент выпускаемых изделий строительной керамики без ухудшения основных физико-механических характеристик. Показано, что использование в качестве цветонесущих компонентов различных промышленных отходов позволяет выпускать изделия строительной керамики без повышения себестоимости.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Кирпич и камни керамические. Технические условия : СТБ 1160-99. – Введ. 02.06.1999. – Минск : БелГИСС: Госстандарт Беларуси, 1999. – 47 с.
- 2 Каникаев, И.С. Производство глиняного кирпича : учеб. / И.С. Каникаев, Е.Ш. Шейнман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1978. – 248 с.
- 3 Августиник, Л.И. Керамика : учеб. / Л.И. Августиник. – 2-е изд., перераб и доп. – Л. : Стройиздат, 1975. – 592 с.
- 4 Золотарский, А.З. Производство керамического кирпича : учеб. пособие / А.З. Золотарский, Е.Ш. Шейнман. – М. : Высш. шк., 1989. – 264 с.
- 5 Волочко, А.Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / А.Т. Волочко, К.Б. Подболотов, Е.М. Дятлова. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 385 с.
- 6 Левицкий, И.А. Основы производства керамических плиток / И.А. Левицкий, И.В. Пищ. – Минск : БГТУ, 2002. – 127 с.
- 7 Дятлова, Е.М. Химическая технология керамики и огнеупоров : лаборат. практикум / Е.М. Дятлова, В.А. Бирюк. – Минск : БГТУ, 2006. – 275 с.

Поступила 22.09.2020

#### INFLUENCE OF COMPLEX TYPES OF THINNERS AND COLOR-BEARING RAW MATERIALS ON THE PROPERTIES OF BUILDING CERAMICS PRODUCTS

A. VALOCHKA, K. PODBOLOTOV, N. KHORT, P. MANAK

*Reserchies of the influence of complex types of thinning agent and color-bearing components (pigments) on the properties of building ceramics are presented. The "composition-property" diagrams are constructed for a combination of three different thinners-screening from rock crushing materials, tennisite and river sand, the use of which will allow the production of construction ceramics with specified characteristics, as well as to adjust the main technological parameters of the drying and firing process. The possibility of using various industrial wastes as color-bearing components, which ensure the production of products of various colors without compromising their basic physical and mechanical characteristics, is shown.*

**Keywords:** building ceramics, thinners, color-bearing components, sensitivity to drying, strength, color.

УДК 666.3/7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОКАЛОРИЙНЫХ  
И НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ВЫГОРАЮЩИХ ДОБАВОК  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИЗОВАННОЙ КЕРАМИКИ****д-р техн. наук, проф. А.Т. ВОЛОЧКО, Е.А. АЗАРКОВА, Н.А. ХОРТ  
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)****П.И. МАНАК  
(ОАО «Обольский керамический завод»)**

Приведены исследования влияния высококалорийных выгорающих добавок техногенного происхождения в виде отходов нефтепереработки (нефтяного кокса) на физико-механические характеристики поризованной керамики. Показано, что использование нефтяного кокса, по сравнению с торфом и опилками позволяет повысить прочностные характеристики поризованной керамики на 20–30% при снижении кажущейся плотности на 100–150 кг/м<sup>3</sup>. Установлены особенности формирования пористой структуры при использовании различных выгорающих добавок. Использование нефтяного кокса позволяет снизить энергозатраты при обжиге на 20–30%.

**Ключевые слова:** поризованная керамика, высококалорийная добавка, чувствительность к сушке кажущаяся плотность, прочность.

**Введение.** Одним из важных направлений развития строительной индустрии является создание эффективных материалов и изделий, позволяющих снизить материалоёмкость создаваемых конструкций и повысить их теплозащитные свойства. К таким материалам в полной мере относится поризованная керамика, изделия из которой применяются для кладки самонесущих и несущих наружных и внутренних стен зданий и сооружений, а также для заполнения каркасов ненесущих стен.

Технические требования к изделиям поризованной керамики регламентированы СТБ 1719 [1]. Согласно этому стандарту блоком керамическим поризованным пустотелым является керамический камень со средней (объёмной) плотностью менее 1000 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводностью не более 0,26 Вт/м·К.

Для повышения пористости керамических материалов применяют различные методы [2].

**Использование узкофракционных зёрен заполнителя.** Известно, что при кубической укладке равновеликих шаров пустотность составляет почти 50%. Практически при использовании монофракционных зёрен, содержащих 10% (здесь и далее – приведено массовое содержание) тонких фракций, и давлении пресования 5–10 МПа удаётся получать керамику с пористостью 35–40% с весьма равномерным строением.

**Использование волокнистых материалов.** Процесс изготовления пористых волокнистых изделий сводится к получению собственно волокон, формированию из них различными способами изделий в виде пластин, труб, блоков и др., и последующей стабилизации полученных пористых структур путём применения разнообразных связующих.

**Вспучивание в ходе термической обработки.** Этот метод основан на способности некоторых горных пород и отдельных минералов к увеличению объёма при быстром нагревании. Причиной вспучивания и образования многочисленных, по большей части замкнутых, пор является выделение либо расширение газа, находящегося или образующегося в материале в момент, когда последний под воздействием высокой температуры находится в пиропластическом состоянии [2].

**Вовлечение в суспензию воздуха (пенометод).** Для получения пористой ячеистой структуры с помощью этого метода необходимо управлять процессом вспучивания, т.е. образованием и стабилизацией газонаполненных пузырей, образующих ячеисто-плёночную дисперсную систему (пену). Пенометод позволяет получить ячеистую керамику с пористостью до 90% [2].

**Химическое порообразование.** Данный метод основан на вспучивании массы газом, выделяющимся при химических реакциях взаимодействия или разложения присутствующих или специально вводимых добавок.

**Использование полимерного пористого заполнителя.** Газообразование можно осуществить при использовании органических соединений. Перед вспучиванием в органическую композицию вводят керамический наполнитель, который затем оказывается в ячеистом каркасе. При обжиге органические составляющие выгорают без остатка, а керамические спекаются, образуя структуру типа пенокерамики [2].

**Введение и последующее удаление добавки.** Метод основан на том, что после удаления добавки остаются поры. Удалять их в принципе можно испарением, возгонкой, растворением или выжиганием. Практическое распространение получил лишь вариант с введением выгорающих добавок [2]. В качестве таковых можно использовать любые горючие материалы, применение которых экономически и технологически целесообразно. Методом введения выгорающих добавок можно повысить пористость керамических изделий примерно до 60–65%.

В отечественной и зарубежной практике производства изделий поризованной керамики строительного назначения для создания пористой структуры широко используется метод введения выгорающих добавок. Известна практика применения различных выгорающих добавок природного происхождения, таких как опилки, торф, костра льна или солома, а также техногенных отходов – лигнина, отходов угледобычи, зол ТЭС и др. Основное назначение выгорающих добавок – это формирование пористости в керамическом материале. Однако выгорающие добавки могут выполнять также роль отошающих добавок, что позволяет снизить количество используемых традиционных отошителей, таких как кварцевый песок и гранитные отсеивы. Все выгорающие добавки имеют свою, иногда очень существенную, теплотворную способность, которая определяет экономию энергоресурсов. Также выделение дополнительного количества тепла во время обжига по всему объёму изделия приводит к существенному улучшению физико-механических характеристик готовой продукции за счёт равномерности протекания процессов, проходящих внутри материала. Применение выгорающих добавок позволяет сократить время нахождения продукции в печи, увеличивая её производительность. Кроме того, использование в качестве выгорающей добавок отходов, позволяет сохранить или снизить себестоимость получения продукции с улучшенными физико-механическими характеристиками [3].

В связи с этим актуальным является использование техногенных отходов и природных материалов в качестве выгорающих добавок в технологии получения строительных поризованных керамических изделий. Одним из видов техногенных отходов являются отходы нефтепереработки в виде нефтяного кокса. Нефтяной кокс отличается от выгорающих добавок природного происхождения (торф, опилки) тем, что имеет более высокую калорийность и температуру полного сгорания [4; 5].

Цель исследования – сравнить влияние высоко- и низкокалорийных выгорающих добавок на физико-механические характеристики поризованной керамики.

**Материалы, способ подготовки сырьевых материалов и методы исследования.** Проблемы производства строительных материалов, в том числе поризованных, должны решаться в каждом регионе с учётом особенностей местного сырья. Основным сырьем, используемым при выпуске строительных поризованных керамических изделий, является глина. От её минералогических, химических и физических характеристик зависит не только технологические особенности производства будущих изделий, но и их основные физико-механические характеристики. В настоящем исследовании в качестве основного глинистого сырья использовалась глина месторождения «Заполье».

Данная глина имеет следующие характеристики: глинистая порода светло-коричневого цвета; структура крупнодисперсная, текстура беспорядочная (комковатая); легко поддается дроблению, хорошо размокает в воде, бурно вскипает, обработанная 10%-м раствором HCl. По числу пластичности глина относится к группе умеренно пластичного сырья (число пластичности 5–7). По чувствительности к сушке (по Чижевскому) – к группе высокочувствительного. По показателям огнеупорности сырья является легкоплавкой (1139 °C). По степени спекания глинистое сырье относится к группе неспекающихся. Содержит до 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и до 55% SiO<sub>2</sub>, при этом количество свободного SiO<sub>2</sub> может достигать 25% [6; 7].

В качестве выгорающих добавок использовались торф из брикета топливного (СТБ 1919 «Брикеты топливные на основе торфа» [8]), отходы нефтепереработки (нефтяной кокс) и древесные опилки хвойных пород деревьев. Используемый торф представлял собой размолотый бой торфобрикетов. Древесные опилки – отход от распиловки хвойных пород деревьев. Отходы нефтепереработки (нефтяной кокс) – конечный продукт глубокой переработки нефти в виде пористых кусков чёрного цвета. Характеристики, используемых в исследовании выгорающих добавок, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики выгорающих добавок

Добавка	Характеристики			
	Относительная влажность, %	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Зольность, %	Калорийность, ккал/кг
Нефтяной кокс	3–10	700–750	10–20	6670
Торф	10–15	670–700	15–23	3849
Опилки	25–40	140–150	0,5–1,0	3400

Калорийность нефтяного кокса в 1,7 – 2 раза выше калорийности торфа и опилок.

В качестве отошающего компонента использован речной песок (отход очистки русла реки Западная Двина), который на 90% состоит из полиминерального песка с размером зёрен от 0 до 5 мм.

Глина была предварительно высушена и размолота до фракции размером менее 1 мм. Отошитель и выгорающие добавки были высушены и просеяны, для приготовления формовочных масс использовалась фракция 0–2,5 мм. Образцы для проведения исследования были изготовлены методом пластического формования. Количество торфа и нефтяного кокса в составе керамических масс достигало 20%, а опилок – 10%.

Пластическую керамическую массу изготовили путём смешивания предварительно взвешенных компонентов с добавлением воды до влажности массы 17–19% и последующим вылёживанием не менее 24 ч.

Формование осуществлялось методом ручной набивки пластической массы в металлические формы в виде кирпичей размером 65 × 30 × 15 мм и цилиндров диаметром 30 мм и высотой 30–40 мм. После формования проведена сушка изделий в естественных условиях в течение не менее 24 ч с последующей сушкой в сушильном шкафу при температуре 100 ± 10 °С. После сушки образцы подвергались термической обработке в электропечи при температуре 1000 и 1050 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Физико-механические характеристики полученных материалов оценивались по следующим параметрам: воздушная и огневая усадка, коэффициент чувствительности к сушке, кажущаяся плотность, открытая пористость, водопоглощение, механическая прочность при сжатии [9].

**Результаты исследований.** Физико-механические характеристики материалов, полученных с использованием различных выгорающих добавок, приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Физико-механические характеристики полученных материалов

Показатель	Вводимый выгорающий компонент			Без выгорающих компонентов
	нефтянок кокс	торф	опилки	
Коэффициент чувствительности к сушке	0,38–0,52	0,36–0,4	0,51–0,53	0,58
Сушильная усадка, %	3,58–4,98	3,9–4,44	4,95–5,16	4,61
Обжиг при 1000 °С				
Прочность при сжатии, МПа	11,97–25,02	8,7–19,03	4,84–10,7	22
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	1406–1682	1260–1610	1269–1522	1829
Водопоглощение, %	18,3–32,2	19,9–42,3	27,86–42,1	14,96
Открытая пористость, %	30,8–46,2	32–53,3	42,58–53,4	27,3
Огневая усадка, %	0,15–0,59	0,3–0,6	0,45–0,68	0,19
Обжиг при 1050 °С				
Прочность при сжатии, МПа	13,48–36	14,51–26,71	9,26–17,6	27
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	1526–1803	1295–1637	1355–1600	1849
Водопоглощение, %	11,8–24,5	19,25–37,2	22,2–34,9	14,1
Открытая пористость, %	21,3–37,4	31,5–48,16	35,2–47,3	26,1
Огневая усадка, %	1,43–2,28	0,63–1,51	2,04–2,64	1,58

Все выгорающие добавки улучшают сушильные свойства полученных материалов. Так, снижается коэффициент чувствительности к сушке и, для составов без опилок, – сушильная усадка. Это показывает, что выгорающие добавки являются хорошим отошающим материалам, и их использование позволит снизить вероятность образования сушильных трещин.

Увеличение количества выгорающих добавок приводит к закономерному увеличению пористости полученных материалов. Об этом свидетельствует увеличение водопоглощения и открытой пористости и снижение кажущейся плотности. Рост температуры обжига приводит к увеличению кажущейся плотности и снижению водопоглощения и открытой пористости. Следует отметить, что кажущаяся плотность образцов с опилками на 100–150 кг/м<sup>3</sup> ниже, чем у образцов с торфом и нефтяным коксом, при одинаковом их содержании. Такое поведение объясняется тем, что насыпная плотность опилок минимальна по сравнению с торфом и нефтяным коксом.

Прочность при сжатии полученных материалов изменяется в широком интервале от 4,8 до 36 МПа. Причём для нефтяного кокса наблюдается аномальная зависимость прочности от количества вводимых выгорающих добавок (рисунок 1, а).

При введении в шихту торфа или опилок наблюдается снижение прочности при сжатии (рисунок 1, б, в). С ростом температуры обжига прочность при сжатии увеличивается. Прочность при сжатии образцов, в состав которых входил нефтяной кокс, сначала увеличивается до 25 МПа при температуре обжига 1000 °С и 36 МПа при температуре обжига 1050 °С, а затем снижается. Максимум прочности имеют образцы, при изготовлении которых вводилась 7,5–10% нефтяного кокса.

Такое поведение прочности при сжатии можно объяснить тем, что у образцов с использованием в качестве выгорающей добавки торфа и опилок образование пористой структуры внутри черепка при их выгорании заканчивается при температуре до 450 °С. А количество тепла, выделяемое этими добавками, не достаточно для начала процесса спекания. Выделяемое торфом и опилками тепло позволяет осуществить только равномерный прогрев материала по всему объёму. Более сложная зависимость прочности при сжатии образцов, при изготовлении которых использовался нефтяной кокс, может быть объяснена тем, что выгорание кокса совпадает по времени с процессами спекания глины. За счёт протекания процесса горения нефтяного кокса происходит образование пористой структуры, при этом выделение дополнительного тепла в этот период обжига приводит не только к равномерному прогреву материала, но и к интенсификации процессов спекания черепка. В связи с этим образование пористой структуры не приводит к снижению прочности при сжатии.

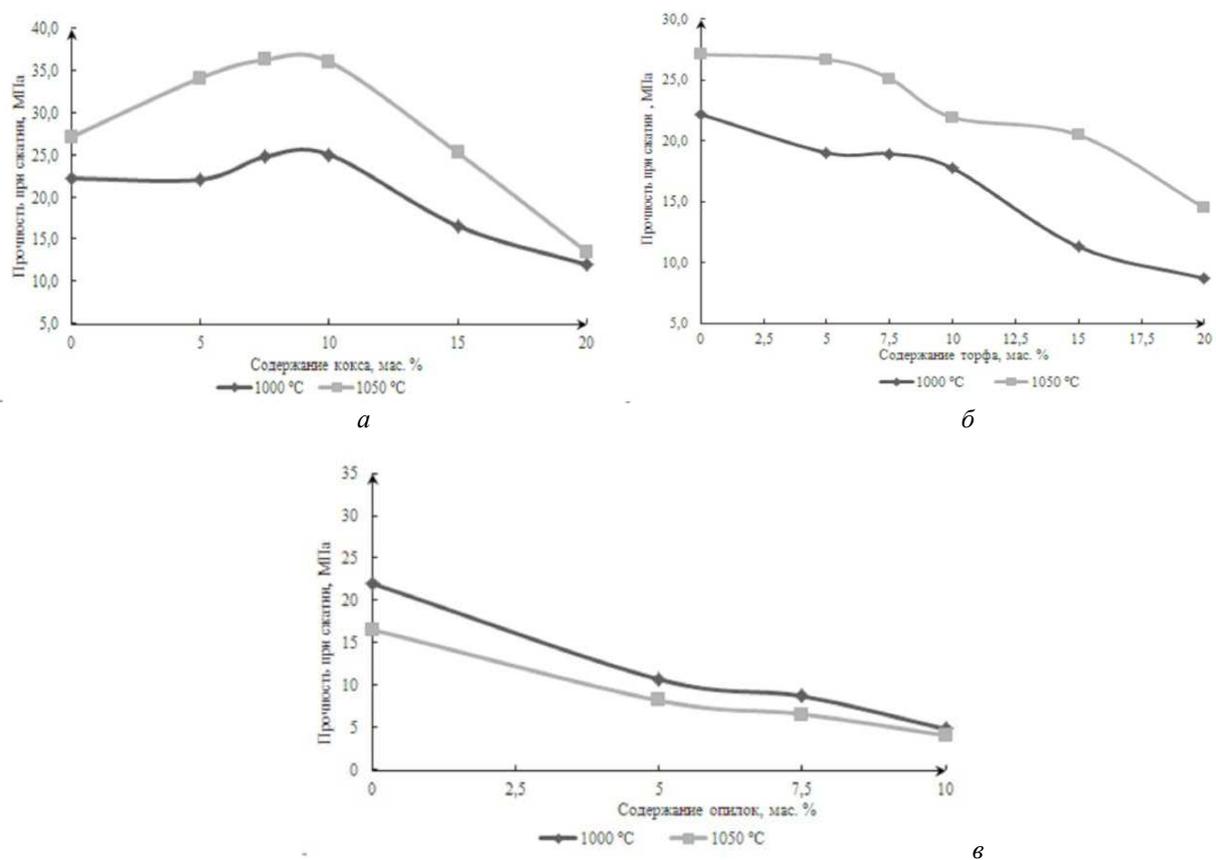


Рисунок 1. – Зависимость прочности при сжатии образцов от состава и температуры обжига

Увеличение количества нефтяного кокса в составе шихты более 10% приводит к росту пористости черепка, который уже не компенсируется улучшением спекания материала, что приводит к снижению прочности при сжатии [4; 5]. На рисунке 2 приведены снимки сколов полученных образцов поризованной керамики, где в качестве выгорающих добавок использовались нефтяной кокс, торф и опилки.

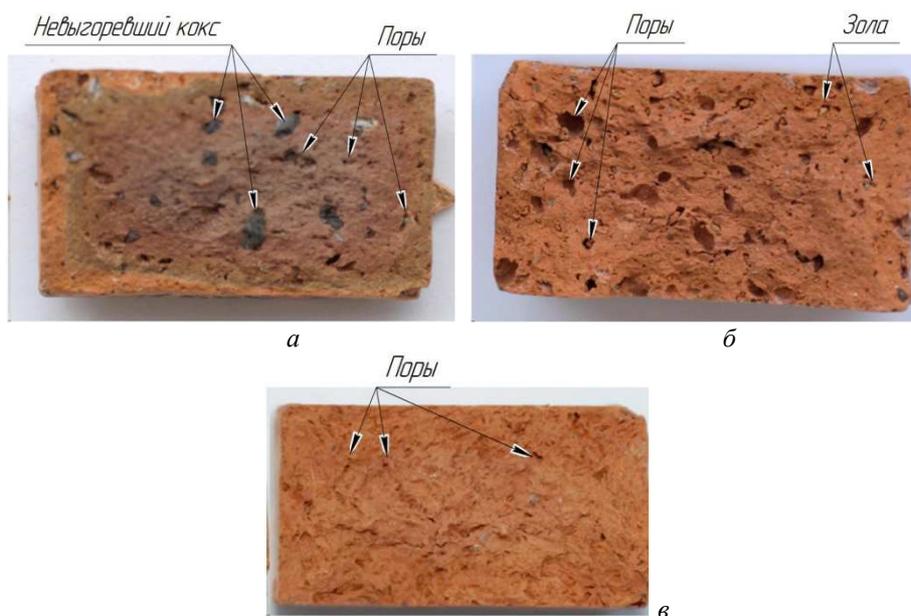


Рисунок 2. – Сколы образцов

Нефтяной кокс, как видно на фотографии (рисунка 2, а), при данном режиме обжига полностью не выгорает. В структуре образцов хорошо видны как поры, так и крупные невыгоревшие зёрна кокса. Это свидетельствует о том, что процесс выгорания нефтяного кокса совпал с процессом спекания глины, и образование плотного черепка ухудшило диффузию кислорода внутрь материала. Для наиболее полного использования потенциала нефтяного кокса, предположительно, необходимо изменить режим набора температуры во время обжига. Обжиг должен проводиться с дополнительной выдержкой или замедлением подъёма температур в интервале выгорания нефтяного кокса. Так как выгорание торфа и опилок происходит до начала спекания материала, то можно предположить, что использование смеси из нефтяного кокса и торфа или опилок позволит создать необходимые условия для полного выгорания нефтяного кокса за счёт образования пор в материале и улучшения условий доступа кислорода внутрь.

На фотографии скола образца с торфом (рисунка 2, б) видно, что торф полностью выгорел и образовал поры различного размера, в основном равномерно распределённые по объёму образца. В некоторых порах видны частички золы. Поры имеют округлую или вытянутую форму и имеют размер от нескольких миллиметров до десятых миллиметра.

На фотографии скола образца, изготовленного с использованием в качестве выгорающей добавки опилок (рисунок 2, в), видно, что опилки полностью выгорели, образовав пористую структуру. Поры по своей форме и размерам повторяют морфологию опилок.

**Заключение.** Сравнительные исследования влияния высоко- и низкокалорийных добавок на физико-механические характеристики поризованной керамики показали, что использование нефтяного кокса позволяет получить изделия поризованной керамики, удовлетворяющие требованиям СТБ 1719. Показано, что применение нефтяного кокса даёт возможность изготавливать изделия поризованной керамики с прочностью на 20–30% выше, чем с использованием известных выгорающих добавок, таких как торф и опилки.

Вместе с тем следует отметить, что использование нефтяного кокса требует корректирования температурно-временных параметров процесса обжига.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Блоки керамические поризованные пустотелые. Технические условия : СТБ 1719–2007. – Введ. 30.01.2007. – Минск : Госстандарт Респ. Беларусь, 2007. – 10 с.
- 2 Химическая технология керамики : учеб. пособие для ВУЗов / И.Я. Гузман [и др.] ; под общ. ред. И.Я. Гузмана. – М. : ООО РИФ Стройматериалы, 2003. – 496 с.
- 3 Свойства керамических стеновых материалов при введении различных выгорающих компонентов / И.В. Пищ [и др.] // Стекло и керамика. – 2015. – № 2. – С. 19–23.
- 4 Особенности термического разложения торфа по дериватографическим данным / С.И. Смольянинов [и др.] // Известия ТПИ. – 1976. – Т. 274. – С. 56–60.
- 5 Термический анализ минералов и горных пород / В.П. Иванова [и др.]. – Л. : Недра, 1974. – 399 с.
- 6 Волочко, А.Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / А.Т. Волочко, К.Б. Подболотов, Е.М. Дятлова. – Минск : Белар. навука, 2013. – 385 с.
- 7 Левицкий, И.А. Основы производства керамических плиток / И.А. Левицкий, И.В. Пищ. – Минск : БГТУ, 2002. – 127 с.
- 8 Брикеты топливные на основе торфа. Технические условия : СТБ 1919–2008. – Введ. 24.12.2008. – Минск : Госстандарт Респ. Беларусь, 2008. – 8 с.
- 9 Дятлова, Е.М. Химическая технология керамики и огнеупоров : лаборат. практикум / Е.М. Дятлова, В.А. Бирюк. – Минск : БГТУ, 2006. – 275 с.

Поступила 22.09.2020

#### RESEARCH OF THE EFFECT OF HIGH-CALORIE AND LOW-CALORIE BURN-OUT ADDITIVES ON THE CHARACTERISTICS OF POROUS CERAMICS

A. VALOCHKA, P. MANAK, E. AZARKOVA, N. KHORT

*Reserchies of the effect of high-calorie burn-out additives of technogenic origin in the form of oil refining waste (petroleum coke) on the physical and mechanical characteristics of porous ceramics are presented. It is shown that the use of petroleum coke, in comparison with peat and sawdust, can increase the strength characteristics of porous ceramics by 20–30% while reducing the apparent density by 100–150 kg/m<sup>3</sup>. The features of the formation of a porous structure using various burn-out additives are established. The use of petroleum coke reduces energy consumption during firing by 20–30%.*

**Keywords:** porous ceramics, high-calorie additive, sensitivity to drying, apparent density, strength.

УДК 628.544

**МАГНИТНЫЙ СОРБЕНТ ИЗ ОТХОДОВ ВОДОПОДГОТОВКИ  
ДЛЯ УДАЛЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ ВОДНЫХ СРЕД****О.Н. ГОРЕЛАЯ***(Белорусский государственный университет транспорта)***Н.Л. БУДЕЙКО, канд. техн. наук В.И. РОМАНОВСКИЙ***(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск)*

*В статье представлены результаты исследования свойств сорбента, полученного в результате синтеза наноразмерных оксидов железа из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания. Для синтеза выбран метод экзотермического горения в растворах. В качестве восстановителя использовался глицин в стехиометрическом соотношении по уравнению реакции. По сорбции красителя метиленового голубого определены полная статическая обменная емкость и удельная поверхность синтезированных образцов сорбента (до 161,8 м<sup>2</sup>/г). Нефтеемкость полученных материалов (до 6,09 г/г) не уступает существующим сорбентам нефтепродуктов.*

**Ключевые слова:** сорбент, экзотермическое горение в растворах, очистка сточных вод, нефтепродукты, осадок станций обезжелезивания.

**Введение.** При всем многообразии методов очистки сточных вод наибольшее выгодно выделяются физико-химические методы с неоспоримым рядом преимуществ: например, возможность удаления из сточных вод высокотоксичных, биохимически неокисляемых органических загрязнений; более глубокая и стабильная степень очистки; возможность рекуперации различных веществ [1–2]. Наибольшее распространение ввиду высокой эффективности получили активные угли и их производные. При выборе сорбционного материала большое внимание уделяется его сорбционным характеристикам, способам регенерации и утилизации отработанного материала, а также стоимости изготовления и доступности сырьевой базы.

Исходя из вышеперечисленного, авторы статьи предлагают получение наноструктурированных сорбционных материалов для удаления нефтепродуктов из водных сред [3] отходов водоподготовки – осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания. Известно, что подземные воды часто имеют высокие показатели по железу [4] и, как следствие, на станциях обезжелезивания после фильтрования подземных вод образуется огромное количество частично обезвоженного осадка со значительным содержанием железа. По данным предварительных исследований содержание железа в данных отходах может составлять до 60%. При этом в качестве примесных ионов могут содержаться кремний и алюминий, ионы кальция и некоторые другие [5]. Данный вид осадка по классификации Базельской конвенции о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением относится к основным соединениям или твердым основаниям – Y35. Исследования данных отходов, посвященные получению сорбентов, как правило, ограничиваются использованием модифицированных материалов в дисперсном или гранулированном виде [6–8].

Наноструктурированные сорбенты, которые предлагается использовать для извлечения нефтепродуктов из сточных вод, были предложены авторами статьи с учетом того, что выявлены ярко выраженные магнитные свойства данных сорбентов [9–20]. Магнитные свойства сорбента могут значительно расширить направление его использования, поскольку существует возможность вводить сорбенты в очищенную жидкость в виде дисперсной фазы и извлекать из среды физическим методом. Малое время подготовительных процедур и синтеза, низкие энергозатраты и легкая масштабируемость являются несомненными дополнительными преимуществами предлагаемого метода.

**Методология исследований.** В качестве исходного материала выбраны отходы промывки фильтров обезжелезивания Гомельского водозабора «Ипуть» с определенным содержанием железа 55,4%, в качестве прекурсора магнитного сорбента использовались растворы кислотного выщелачивания железосодержащих осадков станций обезжелезивания. Кислотное выщелачивание железа из осадков проводилось 20%-й азотной кислотой в течение 60 мин при комнатной температуре и механическом перемешивании с частотой 100 об/мин. В качестве восстановителя использовался глицин с мольным соотношением «окислитель – восстановитель» равным 1.

В данной работе, с целью исследования влияния температуры инициации экзотермической реакции синтеза на состав получаемых продуктов и сорбционные свойства получаемых материалов, температурные диапазоны были расширены и составляли 300–700 °С с шагом 100 °С. Железосодержащие магнитные сорбенты получали методом экзотермического горения в растворе согласно реакциям и методике, представленным в источнике [17]. Образцы полученного сорбента после синтеза хранили в эксикаторе при комнатной температуре для их дальнейшего исследования.

В качестве органического модельного загрязнителя применили широко используемый для этих целей краситель метиленовый голубой (далее – МГ). Для приготовления раствора метиленового голубого концентрацией 10 мг/л использована дистиллированная вода.

Все эксперименты по адсорбционному равновесию проводились при следующих условиях: к 50,0 мл раствора МГ с начальной концентрацией 10 мг/л добавляли 100 мг образца сорбента при постоянном перемешивании. Образцы оставляли в колбах на 24 часа при периодическом перемешивании. После адсорбции твердую фазу отделяли от жидкой центрифугированием. Анализ всех растворов на содержание МГ проводили по определению оптической плотности на характерной длине волны 645 нм с использованием спектрофотометра PV 1251C Solar. Стандартные калибровочные графики были подготовлены путем измерения оптического поглощения для различных концентраций красителя при  $k_{\max} = 645$  нм; неизвестные концентрации красителя до и после адсорбции рассчитывались по калибровочным графикам.

Удельную поверхность  $S_{уд}$ , м<sup>2</sup>/г, определяли по формуле [21, 22]

$$S_{уд} = V \cdot C \cdot N \cdot A_m / (m \cdot M),$$

где  $V$  – объем раствора метиленового голубого, см<sup>3</sup>;  
 $C$  – концентрация метиленового голубого, г/см<sup>3</sup>;  
 $N$  – постоянная Авогадро,  $N = 6,023 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>;  
 $A_m$  – площадь, занимаемая одной молекулой адсорбированного красителя в плотно упакованной пленке, на поверхности графита, равная  $106 \cdot 10^{-20}$ , м<sup>2</sup>;  
 $m$  – масса навески исследуемого образца, г;  
 $M$  – молекулярная масса метиленового голубого, равная 319,85 г.

Нефтеемкость ( $HE$ ) сорбента определяли следующим образом. В чашку Петри наливали водопроводную воду. Сверху наливали 5 мл отработанных масел локомотивного депо Гомель и диспергировали в ультразвуковой ванне. Далее навеску 100 мг исследуемого магнитного сорбента равномерно распределяли по поверхности масла. Сбор сорбированных нефтепродуктов осуществляли неодимовым магнитом, помещенным в полиэтиленовый пакетик по размеру магнита. После однократного проведения магнитом по поверхности масла его поднимали над поверхностью и давали стечь избытку масла в течение 2 минут. После этого магнит доставали из пакетика и взвешивали навеску сорбированных нефтепродуктов с пакетом. Расчет нефтеемкости сорбента  $HE$ , г/г, выполняли по формуле

$$HE = (m_1 - (m_2 + m_3)) / m_3,$$

где  $m_1$  – масса пакета с навеской сорбента и удерживаемым нефтепродуктом, г;  
 $m_2$  – масса пакетика с учетом удерживаемого нефтепродукта (холостая проба), г;  
 $m_3$  – масса навески сорбента, г.

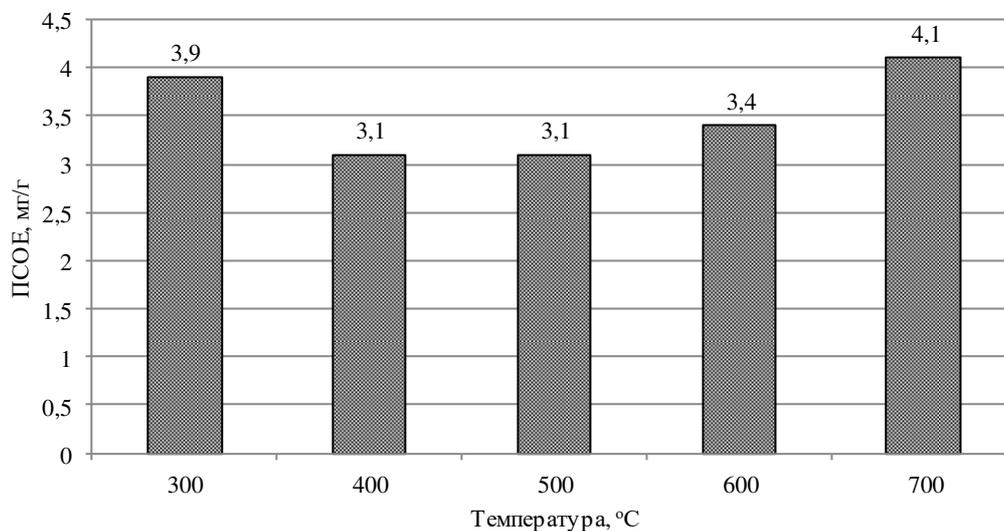
**Основная часть.** Полная статическая обменная емкость (далее – ПСОЕ) образцов сорбента варьируется от температуры синтеза и имеет достаточно стабильные показатели, которые отражены на рисунке 1. Исследуемые образцы характеризуются достаточно высокими значениями обменной емкости: от 3,1 до 4,1 мг/г – ПСОЕ превышает значения для ряда природных и синтетических материалов (например, ПСОЕ сорбента из железистого шлама в зависимости от способа приготовления образцов варьируется от 0,9 до 5,7 мг/г [7]).

Вместе с тем, при более низких температурах, как видно на графике (см. рисунок 1), предполагается присутствие остаточного углерода, что и определяет более высокие показатели обменной емкости. При повышении температуры до 400 °С можно предположить, что углерод выгорает и, как следствие, полная статическая обменная емкость снижается. В свою очередь, при температуре синтеза выше 600 °С ПСОЕ несколько выше, чем при более низких температурах. Авторы выдвигают предположение, что органическая часть при синтезе выгорает более полно и характеристики выражаются сильнее, что способствует более высоким показателям поглощения вещества при равновесии в данных рабочих условиях и наличии более развитой удельной поверхности.

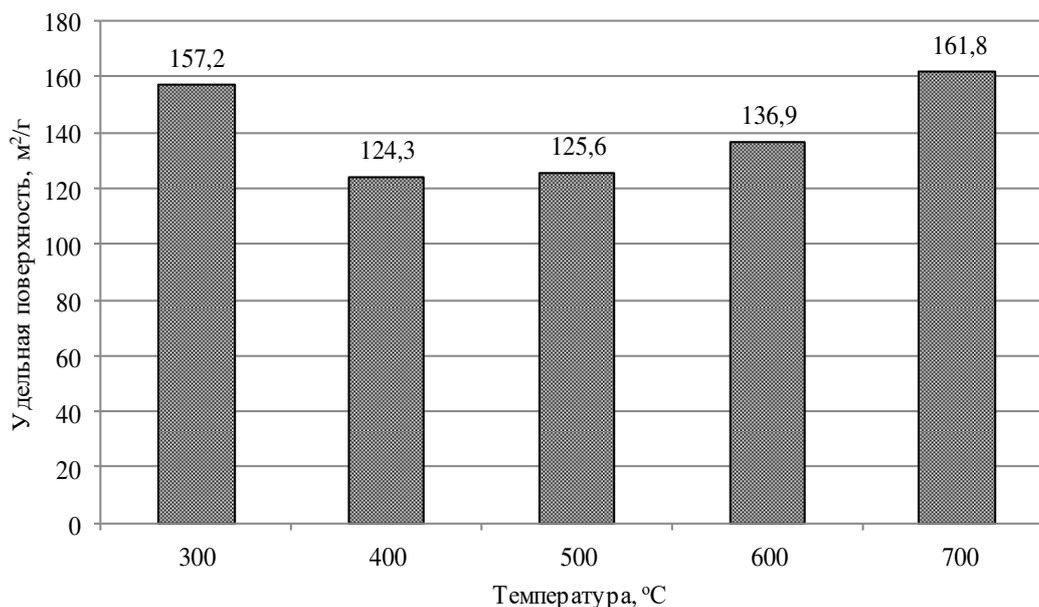
Принимая, что сорбция МГ на поверхности полученных образцов осуществляется в мономолекулярный слой, можно рассчитать удельную поверхность. Данный способ широко применяется для сравнительного анализа образцов [3]. На рисунке 2 представлены результаты изучения влияния температуры обработки образцов сорбентов на величину их удельной поверхности – одной из наиболее важных характеристик полученных материалов.

Сравнивая данные результаты с результатами определения ПСОЕ и удельной поверхности можно сделать предположение, что чем больше выгорает органический восстановитель, тем меньше углерода остается в полученном образце, что приводит к снижению удельной поверхности. Экспериментально показано, что при температуре синтеза 700 °С более развитая поверхность образующихся оксидов в значи-

тельной степени повышает и ПСОЕ, и удельную поверхность сорбента. При исследовании шлама химводоподготовки ТЭЦ в качестве нефтяного сорбента [6] удельная поверхность в зависимости от температуры обработки образцов изменялась от 23,1 до 64,7 м<sup>2</sup>/г. Исследованные почвы и глины по МГ имеют удельную поверхность от 7,8 до 344,5 м<sup>2</sup>/г, но, в основном, не превышают 90 м<sup>2</sup>/г [23].



**Рисунок 1. – Зависимость полной статической обменной емкости от температуры синтеза железосодержащих образцов сорбента**



**Рисунок 2. – Зависимость удельной поверхности от температуры синтеза железосодержащих образцов сорбента**

Для оценки сорбционных свойств полученных материалов нефтеемкость определяли по величине сорбционной емкости по отношению к отработанным маслам. Особенности применения стандартной методики с учетом предположения авторов, что сорбент обладает ярко выраженными магнитными свойствами, описаны в [24]. Результаты представлены на рисунке 3.

При проведении сравнительного анализа нефтеемкости существующих промышленных сорбентов и предложенного авторами наноструктурированного магнитного сорбента, полученного из осадков после промывки фильтров обезжелезивания, можно сделать вывод, что предложенный сорбент значительно превышает показатели нефтеемкости природных органических материалов для сбора нефти и их модификаций [22; 25; 26] (например, кора осины / сосны – 0,5/0,3 г/г; лигнин гидролизный – 1,5–3,0 г/г; уголь бурый

измельченный – 1,0–2,0 г/г; МАУ-А2 – 0,38 г/г). Если сравнивать с рыночными продуктами, то полученные значения сопоставимы с коммерческим целлюлозным материалом 2,5–5 г/г [27], аэрогелем ПВДФ 3–7 г/г [28], гидрофобизированными гидролизными лигнинами 1,6–2,5 г/г (по мазуту) [29].

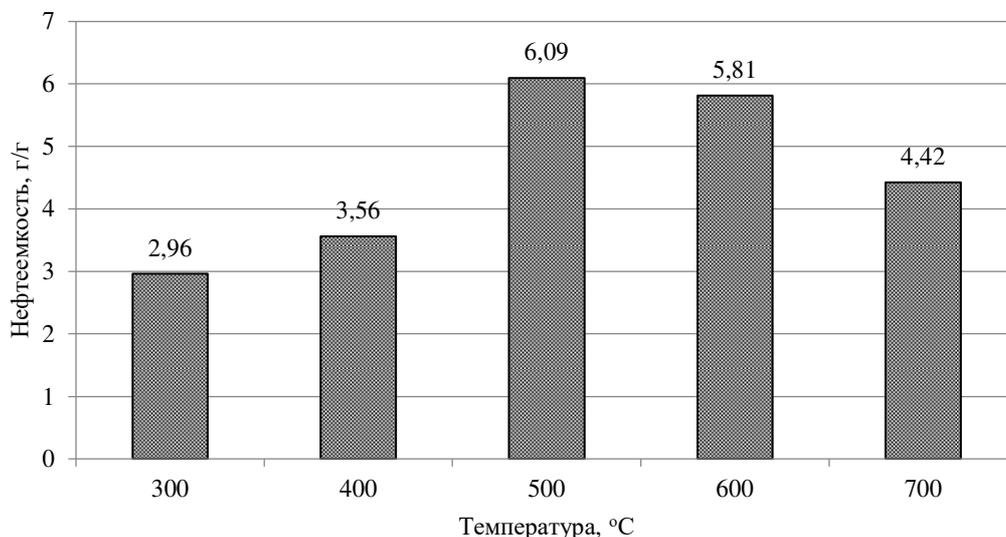


Рисунок 3. – Зависимость нефтеемкости от температуры синтеза железосодержащих образцов сорбента

Из полученных зависимостей видно, что образцы сорбента, восстановителем в которых выступал глицин имеют достаточно высокие показатели нефтеемкости. При этом, наиболее оптимальной температурой синтеза является диапазон средних температур от 500 до 600 °С, что объясняется не только более развитой удельной поверхностью, но и наличием оксидов железа, так как определение нефтеемкости проводилось методом магнитной сепарации.

**Заключение.** В результате проведения исследований можно сделать выводы:

- осадок после промывки фильтров обезжелезивания является перспективным исходным материалом для получения наноразмерных магнитных сорбентов методом экзотермического горения в растворах;
- полученные сорбенты обладают достаточно высокой удельной поверхностью (более 150 м<sup>2</sup>/г), сравнимой с суммарной площадью поверхности пористых адсорбентов [22];
- нефтеемкость, определенная для образцов сорбента, достигает значений 6,09 г/г и сопоставима с нефтеемкостью природных органических материалов и некоторых композиционных материалов, предлагаемых в качестве нефтяных сорбентов;
- наиболее перспективным сорбентом являются образцы, полученные при температуре 500 °С;
- наличие магнитных свойств по сравнению с обыкновенными сорбентами позволит извлекать сорбент из водных сред посредством наведенного магнитного поля;
- получение магнитных нефтяных сорбентов возможно без использования дорогостоящих технологий с одновременным использованием отходов станций обезжелезивания, что позволит сократить негативное антропогенное влияние на окружающую среду и получить экономический эффект, как минимум за счет снижения себестоимости продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стахов, Е.А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов / Е.А. Стахов. – Л. : Недра, 1983. – 263 с.
2. 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.
3. Горелая, О.Н. Сорбент для очистки нефтесодержащих сточных вод на основе отходов станций обезжелезивания / О.Н. Горелая, В.И. Романовский // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 10, – С. 48–54.
4. Пропольский, Д.Э. Полифункциональный модифицированный уголь для очистки подземных вод / Д.Э. Пропольский, В.И. Романовский // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. – № 4. – С. 103–111.

5. Romanovski, V. New approach for inert filtering media modification by using precipitates of deironing filters for underground water treatment / V. Romanovski // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – P. 31706–31714.
6. Romanovski, V. Agricultural Waste Based-Nanomaterials: Green Technology for Water Purifications / V. Romanovski // *Aquananotechnology : 1st Edition. Applications of Nanomaterials for Water Purification* ; Editors: Kamel Abd-Elsalam Muhammad Zahid. – Elsevier, 2021. – 622 p.
7. Singh, A.K. Simple and green fabrication of recyclable magnetic highly hydrophobic sorbents derived from waste orange peels for removal of oil and organic solvents from water surface / A.K. Singh, K. Ketan, J.K. Singh // *Journal of environmental chemical engineering*. – 2017. – Т. 5. – № 5. – С. 5250–5259.
8. Fingas, M.F. The basic of oil spill cleanup / M.F. Fingas, W.S. Duvall // *Environmental Emergency Branch. Environmental Protection Service, Environmental Canada*. – 1979. – 88 p.
9. Горелая, О.Н. Влияние условий синтеза на фазовый состав магнитных сорбентов из осадков станций обезжелезивания / О.Н. Горелая // *Инновационные материалы и технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Минск, 9–10 янв. 2020 / Белор. гос. техн. ун-т. – Минск : БГТУ, 2020. – С. 258–260.*
10. Propolsky, D. Modified activated carbon for deironing of underground water / D. Propolsky [et al.] // *Environmental Research*. – 2020. – Vol. 182. – 108996.
11. Romanovskiy, V. One-step synthesis of polymetallic nanoparticles in air environment / V. Romanovski [et al.] // *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* – 2018. – V. 61. – N.9–10. – P. 43–48.
12. Romanovskii, V. Modified Anthracites for Deironing of Underground Water / V. Romanovskii, A. Khort // *Journal of Water Chemistry and Technology*. – 2017. – Vol. 39. – Issue 5. – P. 299–304.
13. Graphene@metal nanocomposites by solution combustion synthesis / A. Khort [et al.] // *Inorganic Chemistry*. – 2020. – № 59 (9). – P. 6550–6565.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Железосодержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / В. И. Романовский [и др.] // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2019. – № 4. – С. 18–22.
18. Khajeh, M. Nanoadsorbents: classification, preparation, and applications (with emphasis on aqueous media) / M. Khajeh, S. Laurent, K. Dastafkan // *Chemical reviews*. – 2013. – Т. 113. – № 10. – P. 7728–7768.
19. Горелая, О.Н. Синтез наноструктурированных сорбентов нефтепродуктов из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / О.Н. Горелая, Е.В. Романовская // *Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т транспорта ; под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – Ч. 1. – С. 277–279.*
20. Горелая, О.Н. Магнитный сорбент из отходов водоподготовки для очистки нефтесодержащих сточных вод / О.Н. Горелая, В.И. Романовский // *Вестник БрГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2020. – № 2. – С. 61–64.
21. Каменщиков, Ф.А. Нефтяные сорбенты / Ф.А. Каменщиков, Е.И. Богомольный. – М. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 268 с.
22. Pernyeszi, T. Methylene Blue Adsorption Study on Microcline Particles in the Function of Particle Size Range and Temperature / T. Pernyeszi, R. Farkas, J. Kovács // *Minerals*. – 2019. – V. 9. – № 9. – P. 555.
23. Testing a simple methylene blue method for surface area estimation in soils / R. Aringhieri [et al.] // *AGROCHIMICA-PISA*. – 1992. – V. 36. – P. 224–224.
24. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей / Е. В. Веприкова [и др.] // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. – 2010. – Т. 3. – № 3. – С. 285–304.
25. Грузинова, В.Л. Сорбционные свойства и эксплуатационные характеристики угольных волокнистых материалов / В.Л. Грузинова, В.И. Романовский // *Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F. Строительство. Прикладные науки* – 2015. – № 16. – С. 141–145.
26. Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean-up / Teas C. [et al.] // *Desalination*. – 2001. – Vol. 140. – № 3. – P. 259–264.

27. Байбурдов, Т.А. Полимерные сорбенты для сбора нефтепродуктов с поверхности водоёмов: обзор англоязычной литературы за 2000-2017 гг. (Ч. 2) / Т.А. Байбурдов, С.Л. Шмаков // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Химия. Биология. Экология. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 145–153.
28. Нефтесорбент на основе гидролизного лигнина / Д.Д. Гриншпан [и др.]. // Вестн. НАН Беларуси. Сер. Химические науки. – 2011. – № 2. – С. 23–28.

Поступила 09.12.2020

## MAGNETIC SORBENT FROM WATER TREATMENT WASTE FOR REMOVAL OF PETROLEUM PRODUCTS FROM AQUATIC MEDIA

*O. GORELAYA, N. BUDEIKO, V. ROMANOVSKI*

*The article presents results of a study of the properties of sorption materials obtained as a result of the synthesis of nanosized iron oxides from the precipitation of deferrization filters wash water. The method of solution combustion synthesis was chosen. Glycine was used as a reducing agent in a stoichiometric ratio according to the reaction equation. The total static exchange capacity and specific surface area of the synthesized sorbent samples (up to 161.8 m<sup>2</sup>/g) were determined by the sorption of methylene blue dye. The sorption capacity by oil products (up to 6.09 g/g) of the materials obtained they not inferior to the existing sorbents.*

**Keywords:** *sorbent; solution combustion synthesis; wastewater treatment; oil products; iron removal station sludge.*

УДК 621.928.93

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ЦИКЛОНЕ С РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КОНТУРОМ

к-т техн. наук П.С. ГРЕБЕНЧУК, Д.Ю. МЫТЬКО

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

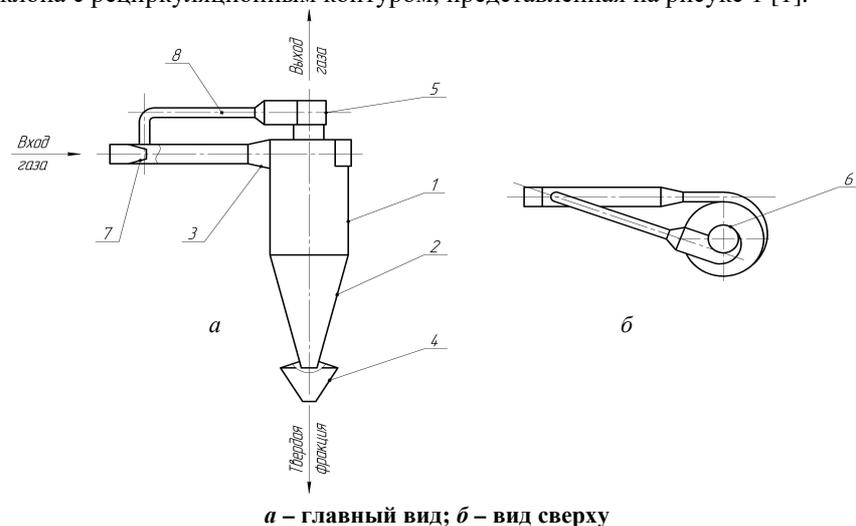
Данная работа посвящена разработке научных основ многоступенчатой сепарации тонкодисперсных частиц в поле центробежных сил с применением рециркуляции несущего потока. Рассмотрена новая конструкция центробежного пылеуловителя с рециркуляционным контуром и исследованы параметры его работы. Предложена математическая модель, описывающая движение газового потока в циклоне и рециркуляционном контуре. Получены зависимости потерь давления, полной скорости потока и ее составляющих во всех зонах аппарата от скорости газового потока на входе в циклон. На основании анализа полученных результатов оценено влияние режимных и конструктивных параметров циклона на его эффективность и энергозатраты.

**Ключевые слова:** очистка газов, центробежный пылеуловитель, рециркуляционный контур, скорость газового потока, эффективность, защита окружающей среды.

**Введение.** Проблема защиты окружающей среды от выбросов загрязненного газа чрезвычайно актуальна. По данным ООН ежегодно в атмосферу выбрасывается 2,5 млн т пыли. Экологические проблемы, обусловленные выбросами в атмосферу загрязненных газовых потоков, постепенно обостряются в связи с ростом промышленного производства и степени загрязнения воздушного бассейна. По мнению американских экологов, количество пыли, образующейся в промышленности, будет увеличиваться ежегодно на 4% за счет роста промышленного производства, что приведет к серьезному загрязнению атмосферы и негативному влиянию на здоровье людей. В связи с этим очистка промышленных выбросов с отходящими газами представляет одну из самых актуальных задач как в санитарном, так и в технологическом и экономическом отношениях.

Постоянный рост количества пыли, образующейся в промышленности, потребует совершенствования существующего пылеулавливающего оборудования, среди которого наиболее часто используются центробежные (циклонные) пылеуловители. Основными параметрами, характеризующими работу циклонных пылеуловителей, является эффективность улавливания пыли и гидравлическое сопротивление. Эффективность улавливания пыли зависит от многих факторов (геометрических размеров, режимных параметров). Эффективность очистки газов может быть существенно увеличена за счет применения внешней частичной рециркуляции газового потока. Идея таких конструкций состоит в том, чтобы часть отходящего газового потока перенаправить назад во входной патрубке циклона. До недавнего времени научные исследования циклонных пылеуловителей с внешней или внутренней рециркуляцией потока в Республике Беларусь не проводились. Наши исследования имеют целью восполнить этот пробел.

**Основная часть.** На основании анализа существующих циклонов с рециркуляцией потока, распределения скоростей и давлений в них, а также траекторий движения дисперсных частиц разработана новая конструкция циклона с рециркуляционным контуром, представленная на рисунке 1 [1].



а – главный вид; б – вид сверху

Рисунок 1. – Циклон с частичной рециркуляцией газового потока

Пылеуловитель работает следующим образом. Запыленный газовый поток подается в центральное отверстие трубы Вентури 7 и далее во входной патрубке циклона 3. В циклоне твердые частицы под действием центробежных сил движутся к стенкам цилиндрического корпуса 1, и далее по коническому днису 2 поступают в нижерасположенный бункер 4. Самые мелкие твердые частицы следуют за потоком воздуха и поступают в выхлопную трубу 6 циклона, где они движутся в основном в пристеночной области. Далее часть уже очищенного газового потока в выхлопной трубе с наибольшим содержанием неуловленных мелких частиц поступает в улитку 5, откуда направляется по рециркуляционной трубе 8 обратно в трубу Вентури 7 и далее – на повторное улавливание. Часть очищенного газового потока с наименьшим содержанием частиц движется в выхлопной трубе 6 ближе к центру и выводится из аппарата.

Подача мелкой неуловленной фракции частиц обратно в циклон повышает концентрацию частиц в циклоне, вероятность их столкновения и образования агломератов. В результате достигается более высокая эффективность очистки. В выхлопной трубе может быть дополнительно установлен лопастной раскручиватель, позволяющий снизить потери давления в аппарате.

Для математического описания движения газового потока в данном циклоне была выбрана RNG  $k$ - $\varepsilon$ -модель, полученная при помощи теории ренормализованных групп [2]. Она имеет схожую форму со стандартной  $k$ - $\varepsilon$ -моделью, но включает следующие улучшения:

- дополнительный член в уравнении для  $\varepsilon$ , который улучшает точность вычислений для жидкостей с высокими скоростями деформаций;
- учтено влияние завихренности на турбулентность, что увеличивает точность для высокозавихренных жидкостей;
- аналитические формулы для турбулентных чисел Прандтля, тогда как стандартная модель использует заданные пользователем постоянные значения;
- аналитически полученные формулы для эффективной вязкости, которые предназначены для жидкостей с низкими числами Рейнольдса. Тем не менее, эффективное использование этой опции зависит от правильного рассмотрения пристеночной области.

Данные улучшения делают RNG-модель более точной и надежной, позволяя эффективно применять ее для более широкого класса жидкостей по сравнению со стандартной  $k$ - $\varepsilon$ -моделью.

Окончательные уравнения модели имеют следующий вид [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь опишем лишь вновь введенные величины:

$\alpha_k$ ,  $\alpha_\varepsilon$  – обратные эффективные числа Прандтля для  $k$  и  $\varepsilon$ , соответственно;

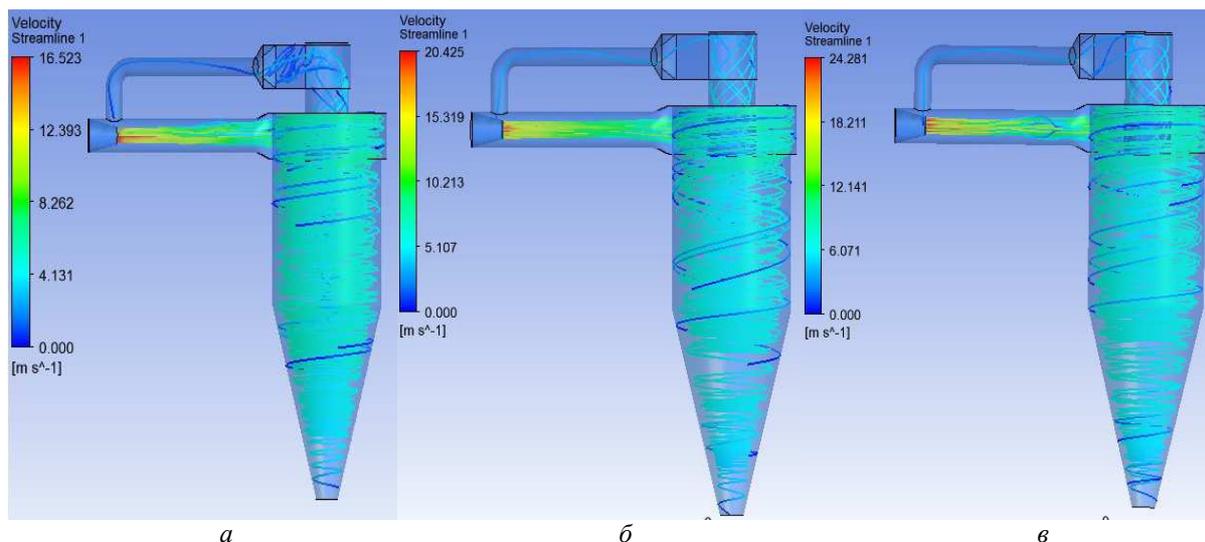
$\mu_{eff}$  – эффективная вязкость среды. Данная вязкость приблизительно равна  $\mu_t$  из стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели для высоких чисел Рейнольдса. Для низких чисел Рейнольдса создателями модели [2] предлагается дополнительное дифференциальное уравнение, позволяющее более точно вычислить  $\mu_{eff}$ .

Для создания геометрической модели циклона с рециркуляционным контуром было использовано 3D-моделирование. Сетка состоит из тетраэдров с уменьшением элементарной ячейки к стенке модели [3]. Размер элементарной ячейки –  $10 \cdot 10^{-3}$  м, число ячеек после генерации составило более 289 000, что говорит о достаточно высокой точности сетки.

Моделирование движения газа в циклоне с рециркуляционным контуром проводилось при трех различных скоростях на входе в патрубок, которые определялись из диапазона условной скорости газа [3]. Плотность газа была принята  $1,225 \text{ кг/м}^3$  (плотность воздуха при нормальных условиях). Диаметр цилиндрической части циклона 0,3 м, входного патрубка и рециркуляционной трубы – 0,085 м и 0,045 м, соответственно.

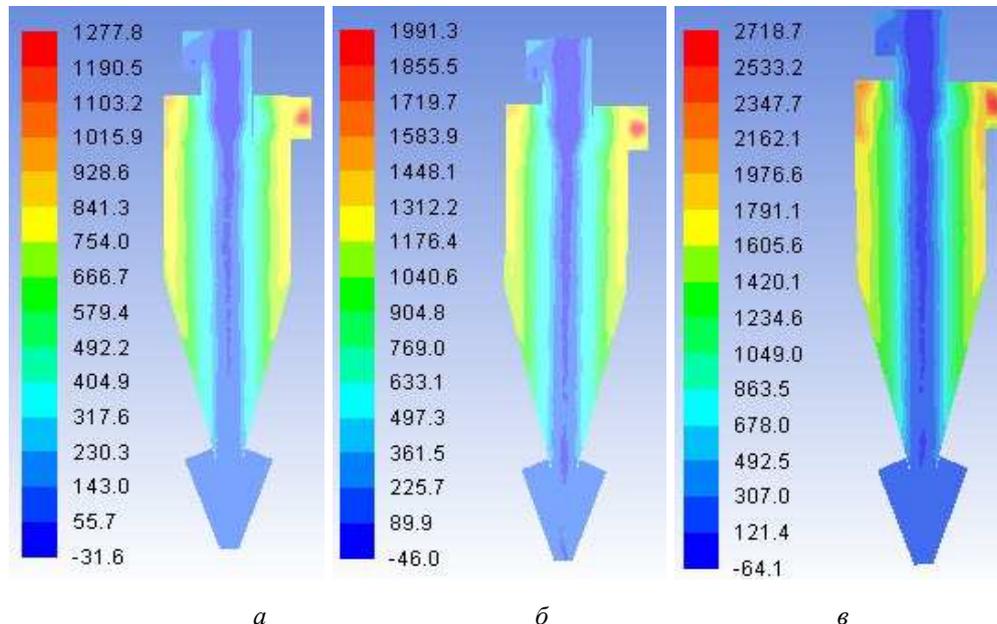
На рисунке 2 показан план скоростей потока в циклоне с рециркуляционным контуром при разных скоростях газа на входе.

На рисунке 2 показано, что газовый поток движется в пристеночной области циклона с максимальной скоростью у входа в патрубок, которая постепенно снижается к нижней части цилиндрического корпуса. Также можно заметить, что поток заходит в рециркуляционный контур циклона, тем самым можно сказать, что рециркуляция газового потока осуществляется.



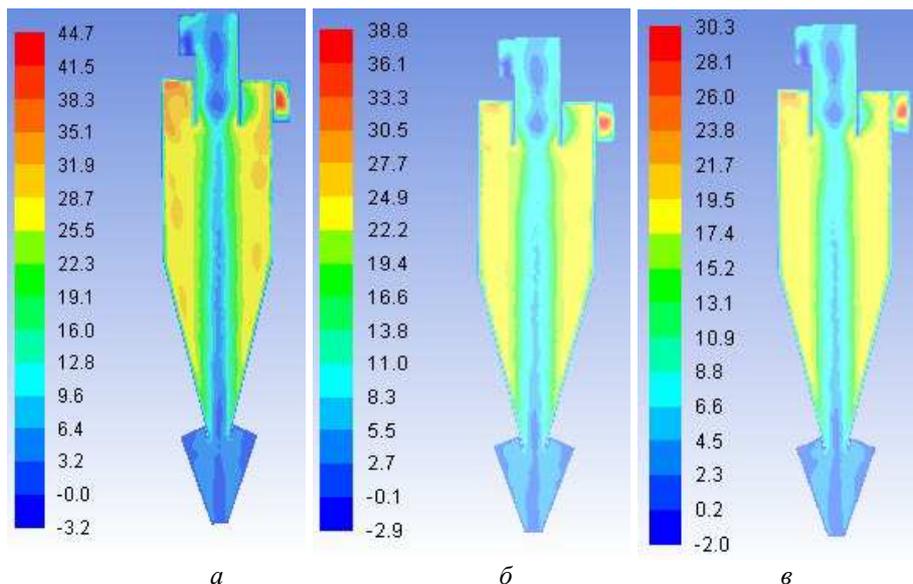
Скорость газа во входном патрубке: *a* – 16 м/с; *б* – 20 м/с; *в* – 24 м/с  
Рисунок 2. – Скорость движения потока по траекториям

На рисунке 3 представлены результаты моделирования гидравлического сопротивления в циклоне с рециркуляционным контуром. Можно заметить, что гидравлическое сопротивление увеличивается у стенок циклона, а с увеличением скорости газа на входе в аппарат оно снижается у стенок конической части. При этом гидравлическое сопротивление, а значит и потери давления в аппарате в целом увеличиваются в данной конструкции по сравнению с традиционными вариантами циклонов незначительно, то есть использование рециркуляционного контура не приведет к существенному росту энергопотребления установки при значительном повышении эффективности пылеулавливания.



Скорость газа во входном патрубке: *a* – 16 м/с; *б* – 20 м/с; *в* – 24 м/с  
Рисунок 3. – Гидравлическое сопротивление в циклоне, Па

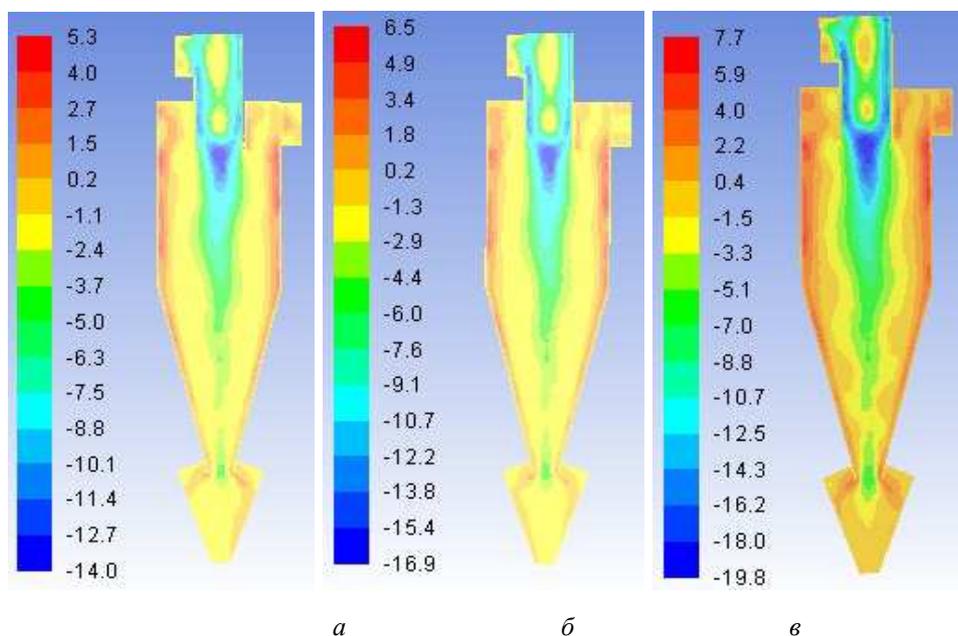
На рисунке 4 представлены планы тангенциальных скоростей в циклоне с рециркуляционным контуром. Как известно, рост этой составляющей полной скорости потока повышает эффективность пылеулавливания, поскольку тем самым повышается центробежный фактор разделения [4]. На рисунке 4 видно, что с увеличением скорости газа во входном патрубке снижается скорость вихря по центральной оси аппарата. В то же время скорость восходящего центрального вихря, как и нисходящего у стенок аппарата, увеличивается, что говорит об адекватности модели.



Скорость газа во входном патрубке: *a* – 16 м/с; *б* – 20 м/с; *в* – 24 м/с

Рисунок 4. – Тангенциальная скорость в циклоне, м/с

Наконец, на рисунке 5 изображены результаты моделирования осевой скорости в циклоне с рециркуляционным контуром. Эта составляющая полной скорости повышает производительность аппарата. Как известно, эффективно влиять на направление вектора полной скорости потока, то есть на соотношение осевой и тангенциальной скоростей, можно изменением геометрии самого циклона: угла наклона входного патрубка (в нашем случае он равен нулю) и в меньшей степени – высоты конической и цилиндрической части [4]. Поэтому с увеличением скорости газа во входном патрубке осевая скорость должна увеличиваться как в центре аппарата, так и в пристеночной области, что мы и наблюдаем на рисунке 5. При этом интенсивность разрежения по оси циклона также увеличивается с ростом скорости на входе (рисунок 5, *в*).



Скорость газа во входном патрубке: *a* – 16 м/с; *б* – 20 м/с; *в* – 24 м/с

Рисунок 5. – Осевая скорость в циклоне, м/с

**Заключение.** В результате проведенных исследований было смоделировано движение воздушного потока в циклоне с рециркуляционным контуром. Установлено, что наибольшую скорость имеет поток у стенок аппаратов в верхней их части (на входе в циклон), далее скорость газа снижается и имеет минимальное значение в нижней конической части.

Значительная часть частиц на выходе из выхлопной трубы движется у стенок и поступает в рециркуляционный контур, через который возвращается в аппарат на повторное отделение. Таким образом, в предложенной конструкции центробежного пылеуловителя удастся достичь более высокой степени очистки газа, в особенности от сверхтонких частиц пыли.

Анализ изменения всех составляющих полной скорости газового потока, а также гидравлического сопротивления аппарата в зависимости от скорости во входном патрубке показал адекватность предлагаемой математической модели и возможность ее использования для оценки вышеуказанных параметров циклонов различных конструкций и корректировки их конструктивных и режимных параметров с целью повышения эффективности и снижения энергозатрат.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мытько, Д.Ю. Проподимость газа в циклоне с рециркуляционным контуром / Д.Ю. Мытько, Д.И. Мисюля, П.С. Гребенчук // Нефтехимия – 2019: материалы II междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 16–18 сент. 2019 г. / Белар. Гос. тeнг. ун-т. – Минск : БГТУ, 2019. – С. 169–175.
2. Renormalization group modeling and turbulence simulations / S.A. Orszag [et al.] // International conference on near-wall turbulent flows. – Tempe, Arizona, 1993. – 1031 p.
3. Шаблий, Л.С. / Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent : учеб. пособие / Л.С. Шаблий, А.В. Кривцов, Д.А. Колмакова. – Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 108 с.
4. Гупта, А. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М. : Мир, 1988. – 588 с.

*Поступила 02.07.2020*

#### RESEARCH OF THE MOTION OF A GAS FLOW IN A CYCLONE WITH A RECIRCULATION CIRCUIT

*P. HREBIANCHUK, D. MYTSKO*

*This work is devoted to the development of scientific foundations for multistage separation of fine particles in the field of centrifugal forces using the recirculation of the carrier flow. A new design of a centrifugal dust collector with a recirculation loop is considered and the parameters of its operation are investigated. A mathematical model is proposed that describes the movement of a gas flow in a cyclone and in a recirculation loop. The influence of the operating parameters of the cyclone on its efficiency and energy consumption is analyzed. The dependences of pressure losses, total flow rate and its components in all zones of the apparatus on the gas flow rate at the cyclone inlet are obtained. Based on the analysis of the results obtained, the influence of the operating and design parameters of the cyclone on its efficiency and energy consumption was evaluated.*

**Keywords:** *gas cleaning, centrifugal dust collector, recirculation circuit, gas flow rate, efficiency, environmental protection.*

УДК 692:004

**ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПАКЕТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ***канд. физ.-мат. наук, доц. В.В. ДАВЫДОВСКАЯ, И.А. ЕФИМЧИК  
(Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина)**Е.В. ДАНЧЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)*

В ходе проектирования и выполнения строительных процессов возникает ряд задач, связанных с оптимизацией расположения строящихся объектов, изготовления конструкций, моделированием процессов и систем, прогнозированием и т.д. В данной работе продемонстрированы некоторые возможности среды MATLAB на примере решения отдельных прикладных задач в строительстве. Работа выполнена в рамках проекта международной технической помощи Erasmus+ 609557-EPP-1-2019-LV-EPPKA2-SVHE-JP «Развитие практико-ориентированного личностно-центрированного образования в сфере моделирования кибер-физических систем».

**Ключевые слова:** MATLAB, toolboxes, строительство, оптимизация, экспериментальные данные, нагрузка, пластина.

**Введение.** Студенты строительных специальностей за время своего обучения в вузе должны овладеть навыками решения технических задач для того, чтобы в своей дальнейшей профессиональной деятельности они смогли, например, правильно устанавливать машиноёмкость строительных процессов и необходимое количество рабочих, машин, механизмов, материалов и т.д.; замерять и подсчитывать объёмы работ, состав строительных операций и процессов; обоснованно выбирать метод выполнения строительного процесса и др. В настоящее время технические задачи, в основном решаются с использованием ЭВМ и специальных прикладных программ (Excel, Mathematica, Maple, MathCAD, MATLAB и т.д.). В качестве рабочего инструмента выберем современную среду MATLAB, которая благодаря удобному интерфейсу и встроенному языку программирования широко используется для решения различных технических задач, моделирования физических процессов, создания приложений, анализа данных [1; 2].

Одна из важных ролей в MATLAB отводится специализированным группам программ, которые называются Toolboxes – встроенные наборы инструментов, представляющие собой коллекцию объектов и функций, которые написаны на языке MATLAB для решения определенного класса задач [3].

Продemonстрируем некоторые возможности среды MATLAB, на примере решения некоторых прикладных задач, могущих возникать в процессе строительства.

**Решение задач оптимизации с помощью пакета Optimization Toolbox MATLAB.** В качестве примера рассмотрим задачу о размещении строящегося объекта. Задача может иметь несколько возможных вариантов постановки, отличающихся друг от друга количеством жилых домов и их расположением на координатной плоскости [напр., 4]. В нашем случае имеются четыре жилых дома, расположенных в некотором микрорайоне города (рисунок 1). Требуется определить местоположение объекта для строительства (для примера объектом строительства выберем школу). Необходимо построить школу в удобном для всех жителей микрорайона месте, предполагая, что сумма расстояний от построенного объекта до всех жилых домов будет минимальным значением.

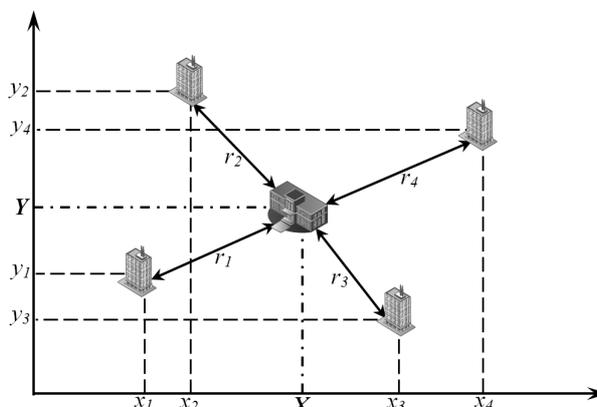


Рисунок 1. – Схема расположения строящейся школы

Данная задача может быть решена с помощью Optimization Toolbox, пакета расширения MATLAB, содержащего набор классических алгоритмов для оптимизации стандартных задач и задач большой размерности. Для решения данной задачи использовалась функция fmincon, которая находит минимум для

скалярной функции нескольких переменных с ограничениями, начиная с начального приближения. Подробную информацию по использованию данной функции можно найти в справочной системе среды MATLAB [5]. В общем случае, эта задача относится к нелинейной оптимизации с ограничениями или к нелинейному программированию. При изменении входных данных, данная функция может быть также использована и для нахождения максимума.

Координаты исходных домов могут быть записаны как координаты соответствующих точек в виде  $(x_i, y_i)$ , где  $i = 1, 2, 3, 4$ . Координаты школы, которую предполагается построить, можно положить равными  $(X, Y)$ . Очевидно, они служат переменными рассматриваемой задачи оптимизации, каждая из которых по своему характеру может принимать действительные значения (см. рисунок 1).

В некоторой фиксированной прямоугольной системе координат значения переменных  $x, y$  могут быть как положительными, так и отрицательными. Задачу о строительстве школы можно считать задачей оптимизации без ограничений.

В качестве целевой функции данной задачи будем рассматривать сумму расстояний от искомой точки  $(x, y)$  до каждой из заданных точек.

Расстояние от  $i$ -го дома до школы можно определить по формуле

$$r_i = \sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2}, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Общее расстояние от всех четырех домов до школы будет определяться выражением

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

Таким образом, математическая постановка задачи о строительстве школы может быть записана в следующем виде:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2} \rightarrow \min_{x, y \in R}, \quad (2)$$

где  $R$  – область значений для  $x$  и  $y$ .

Поскольку целевая функция данной задачи является нелинейной, задача о строительстве школы относится к классу задач нелинейного программирования без ограничений, поэтому в файле 'nonlinear.m' в качестве нелинейных ограничений заданы пустые вектора, что говорит об их отсутствии (рисунок 2, а, в).

В целевой функции 'f.m' заданы координаты жилых домов и функция, определяющая квадрат расстояний от школы до домов (рисунок 2, б).

```

a
1 % Задание линейных ограничений
2 A=[];
3 b=[];
4 Aeq = [ ]; % Ограничения-равенства отсутствуют
5 beq = [ ]; % Ограничения-равенства отсутствуют
6 lb = [ ]; % Левые простые ограничения на неотрицательность
7 ub = [ ]; % Правые простые ограничения отсутствуют
8 % Задание исходной точки для алгоритма оптимизации
9 X0 = [0; 0];
10 % Установка нестандартных опций и значений параметров
11 options = optimset('LargeScale', 'off', ...
12 'Display','iter', 'TolX', 0.01);
13 % Запуск решателя fmincon
14 [X_opt,f_opt] = fmincon(@f, X0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, ...
15 @nonlinear, options)
16
б
1 function f = myfun(X)
2 x=[2;6;30;24];
3 y=[4;20;6;18];
4 f=0;
5 for i=1:length(x)
6 f=f+sqrt((X(1)-x(i))^2+(X(2)-y(i))^2);
7 end;
в
1 function [g, h] = nonlinear(X)
2 g = [];
3 h = [];

```

б – листинг создания целевой функции ('f.m'); в – листинг создания условных ограничений ('nonlinear.m')

Рисунок 2. – Листинг основной программы вызова функции fmincon (а)

Как показано на рисунке 3, расстояние от школы до некоторых домов получилось больше, однако в рассмотренном примере решалась простейшая модельная задача, в которой учитывалось только расположение домов, устранить этот недостаток можно через применение нелинейных ограничений, например, учесть количество учащихся в каждом доме, или наличие общественного транспорта и др.

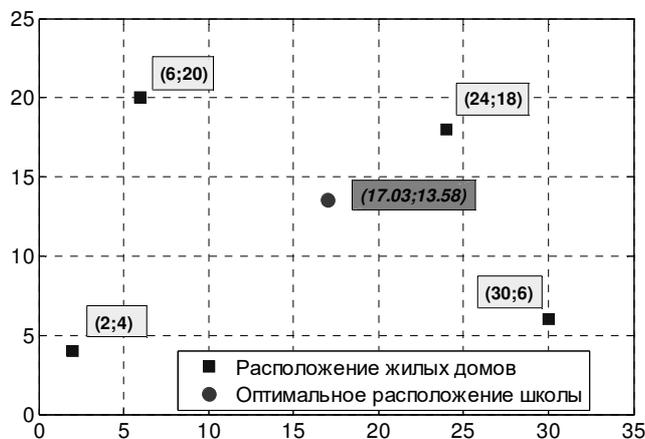


Рисунок 3. – Вычисленное оптимальное значение координат расположения школы и расположения жилых домов

Рассмотрим задачу с наличием нелинейных ограничений в следующем примере.

Довольно часто в строительстве встречаются задачи по оптимальному расходу или раскрою материала. Данную задачу можно отнести к задаче оптимизации с ограничениями. Таковая может быть решена с использованием различного программного обеспечения, например, MS Excel [6], мы рассмотрим решение данной задачи в MATLAB, для чего будем использовать ту же функцию `fmincon` (рисунок 5, в, г).

Например, требуется изготовить призматическую емкость без крышки, дно которой имеет форму равностороннего треугольника и объём 1 куб. метр так, чтобы на её изготовление было израсходовано как можно меньше листового материала.

Для начала необходимо построить математическую модель (рисунок 4).

Введем следующие параметры:

- $x_1$  – сторона равностороннего треугольника, являющегося основанием емкости;
- $x_2$  – высота емкости.

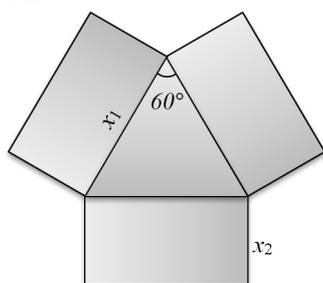


Рисунок 4. – Схема раскройки

Объем емкости равен произведению площади основания на высоту:

$$S_{нов} = S_{осн.} + S_{бок} = \frac{x_1^2}{2} \cdot \sin(60^\circ) + 3 \cdot x_1 \cdot x_2. \tag{3}$$

$$V = S_{осн.} \cdot x_2 = \frac{x_1^2}{2} \cdot \sin(60^\circ) \cdot x_2. \tag{4}$$

Это будет целевая функция (рисунок 5, а). По условию задачи она должна стремиться к максимуму. Так как по условию задачи радиус основания емкости и ее высота должны быть положительными, с учетом введенных обозначений запишем накладываемые ограничения (рисунок 5, б) в виде системы следующих отношений:

$$\begin{cases} V = 1, \\ x_1 > 0, \\ x_2 > 0. \end{cases} \tag{5}$$

**a**

```

1 function f2 = myfun(X)
2     f2=X(1)^2/2*sin(60*pi/180)+3*X(1)*X(2);

```

**б**

```

1 function [g, h] = nonlinear2(X)
2     g=[];
3     h(1)=X(1)^2/2*sin(60*pi/180)*X(2)-1; % Нелинейное ограничение равенство
4

```

**в**

```

1 A=[];
2 b=[];
3 Aeq=[]; % Ограничения-равенства отсутствуют
4 beq=[]; % Ограничения-равенства отсутствуют
5 lb=[0; 0]; % Левые простые ограничения отсутствуют
6 ub=[]; % Правые простые ограничения отсутствуют
7 % Задание исходной точки для алгоритма оптимизации
8 XO=[1; 1];
9 % Установка нестандартных опций и значений параметров
10 options=optimset('LargeScale','off',...
11 'Display','iter','TolX',0.01);
12 % Запуск решателя fmincon
13 [X_opt,f_opt]=fmincon(@f2,XO,A,b,Aeq,beq,lb,ub,...
14 @nonlinear2,options)

```

**2**

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
0      3      3.43301      0.567      Infeas
1      6      4.03665      0.3274      1      -0.692      15
2      9      5.2484      0.01507      1      1.24      13.5
3     12      5.18132      0.007227      1      -0.0793      12.8 Hessia
4     15      5.17644      0.005685      1      -0.0142      12
5     18      5.19618      9.142e-006      1      0.0198      12
6     21      5.19615      3.976e-007      1      -3.32e-005      12 Hessia
Optimization terminated: magnitude of search direction less than 2*options.TolX
and maximum constraint violation is less than options.TolCon.
No active inequalities.

X_opt =
    1.9993
    0.5777

f_opt =
    5.1962

>>

```

**a** – Листинг создания целевой функции ('f1.m'); **б** – Листинг создания условных ограничений ('nonlinear1.m')  
**в** – Листинг основной программы вызова функции fmincon

Рисунок 5. – Результат выполнения основной программы (2)

Обработка экспериментальных данных с помощью пакета Curve Fitting Toolbox MATLAB. Методы получения аналитического вида зависимостей, исследуемых измерением параметров от времени или различных косвенных характеристик, играют очень важную роль при проведении инструментального

обследования строительных конструкций (например, прочность бетона – от скорости прохождения ультразвука через его структуру, или зависимость скорости роста трещин от времени и др.). Аналитические зависимости дают возможность прогнозировать изменение анализируемых характеристик за различный период времени, а также использовать косвенные характеристики для оценки механических параметров строительных материалов [7]. На основе результатов экспериментальных исследований с помощью методов корреляционного и регрессионного анализа устанавливается вид аналитической зависимости.

В состав MATLAB входит пакет Curve Fitting Toolbox, позволяющий выполнять предварительную обработку и сглаживание данных, приближение данных линейными и нелинейными параметрическими и непараметрическими (интерполяционные и сглаживающие сплайны) моделями, анализ качества приближений, вычисление их характеристик, визуализацию данных и полученных моделей (рисунок 6).

Пусть прочность бетона проектного класса В20 контролируется методом отскока прибором КМ. Требуется установить зависимость прочности бетона (МПа) от величины отскока (мм) и оценить ее погрешность. Для установления зависимости между переменными были изготовлены и испытаны 11 серий образцов (таблица 1). Прочность бетона представлена выборкой  $y$ , соответствующая величина отскока представлена выборкой  $x$ .

Таблица 1. – Данные испытаний

№ испытания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Отскок $x$ , мм	18,6	17,8	18,1	16,0	19,2	18,8	17,8	16,4	18,4	18,8	17,3
Прочность $y$ , МПа	26,7	24,0	23,6	16,0	27,6	26,5	22,2	18,4	24,9	26,2	21,0

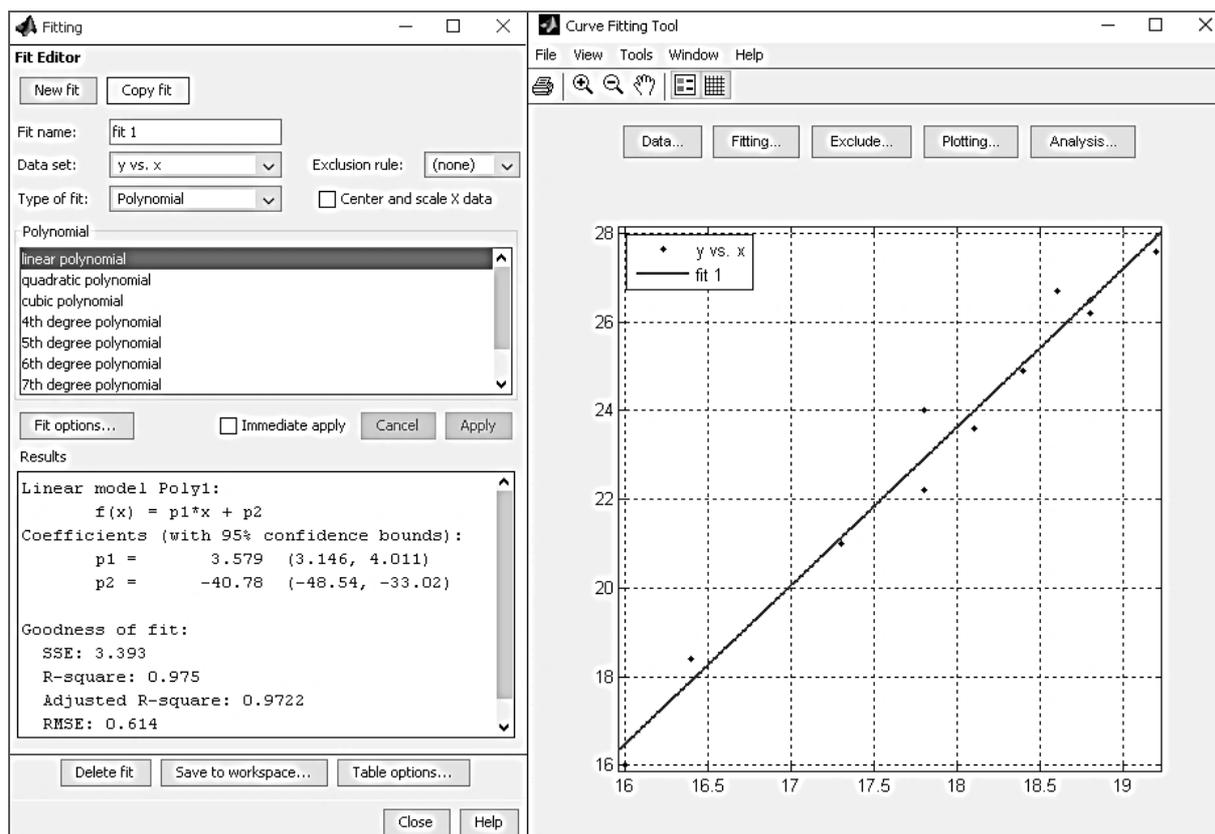


Рисунок 6. – Линейная аппроксимация результатов испытаний в Curve Fitting Tool

Следует отметить, что в MATLAB также есть встроенное приложение Basic Fitting, вызов которого осуществляется из графического меню, и оно также позволяет выполнять интерполирование и экстраполирование экспериментальных данных.

Приложение позволяет выводить уравнение используемого полинома, норму невязок, а также вычислять значение полинома за пределами заданного интервала и наносить эти точки на график. Приложение имеет простой доступный интерфейс и широкую функциональность (рисунок 7).

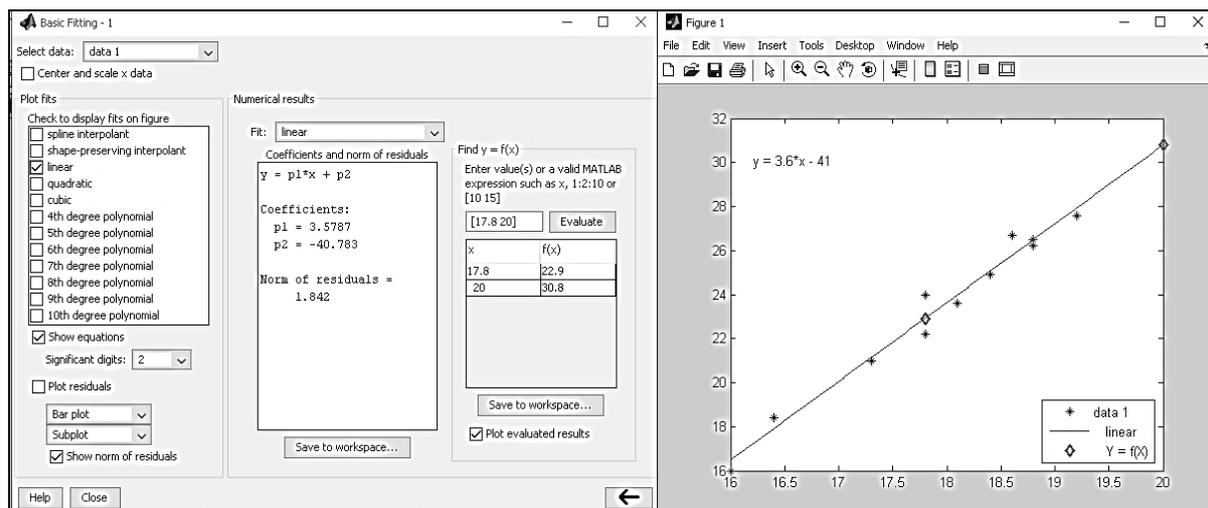


Рисунок 7. – Линейная аппроксимация результатов испытаний в Basic Fitting

**Исследование элементов строительных конструкций с использованием пакета Partial Differential Equation (PDE) Toolbox.** В настоящее время наблюдается постоянное расширение производства, а установка нового, более мощного, высокопроизводительного оборудования влечет за собой увеличение нагрузок, передающихся на несущие строительные конструкции зданий и сооружений, а, следовательно, и всё большее влияние на них динамических воздействий, в том числе и групповых от большого количества однотипных машин и механизмов.

Пакет MATLAB Partial Differential Equation (PDE) Toolbox содержит средства для исследования и решения нестационарных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. В пакете используется метод конечных элементов. Команды и графический интерфейс могут быть использованы для математического моделирования уравнений в частных производных применительно к широкому классу инженерных и научных приложений, включая задачи сопротивления материалов, расчеты электромагнитных устройств, задачи тепломассопереноса и диффузии [2].

Пакет PDE Toolbox встроен в MATLAB, инженеру предлагается работать с его функциями, программируя в среде MATLAB. Тем не менее, PDE Toolbox также обладает и графическим интерфейсом, который позволяет работать с двухмерной моделью без навыков программирования. Следует отметить, что основные возможности программы все же представлены функциями, а графический интерфейс – лишь дополнительное средство, которое не всегда удобно [2].

Partial Differential Equation Toolbox служит эффективным средством для решения эллиптических, параболических, гиперболических и нелинейных дифференциальных уравнений, а также систем дифференциальных уравнений в частных производных с большим числом переменных. Графический интерфейс пользователя Partial Differential Equation Toolbox включает в себя набор типовых моделей классических инженерных и научных задач в таких областях, как сопротивление материалов, электромагнитное поле, поле проводящей среды, теплопроводность, диффузия и др. При выборе определенной модели коэффициенты уравнения автоматически заменяются физическими параметрами, такими как модуль упругости, диэлектрическая проницаемость и т.п. Граничные условия также могут быть заданы в подходящем для данной задачи виде. Графические средства пакета позволяют визуализировать различные параметры уравнения и их комбинации в соответствии с физическим смыслом задачи [8].

Рассмотрим решение типовой задачи на исследование нагрузки, оказываемой на различные элементы строительных конструкций, подобные задачи решаются, как правило, с использованием ЭВМ и различных численных методов [9].

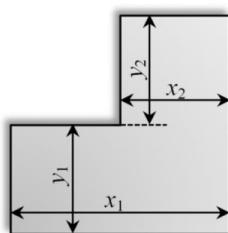


Рисунок 8. – Вид пластины

Пусть имеется металлическая пластина, жестко закрепленная по краям (рисунок 8) и равномерно нагруженная по площади (нагрузка  $P$ ). Прогиб пластины  $W$  описывается уравнением Пуассона:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = \frac{P}{D},$$

где  $D$  – изгибная жесткость:  $D = Eh^3 / [12 \cdot (1 - \nu^2)]$ , где  $E$  – модуль упругости;  $h$  – толщина пластины;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Необходимо рассчитать прогиб пластины при следующих исходных данных:  $x_1 = 10$  мм;  $x_2 = y_1 = y_2 = 5$  мм;  $E = 70 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>;  $h = 4$  мм;  $P = 80$  Н;  $\nu = 0.28$ .

Полученное решение позволяет провести подробный анализ распределения нагрузки по поверхности пластины и степени ее прогиба под действием данной нагрузки (рисунки 9 – 11).

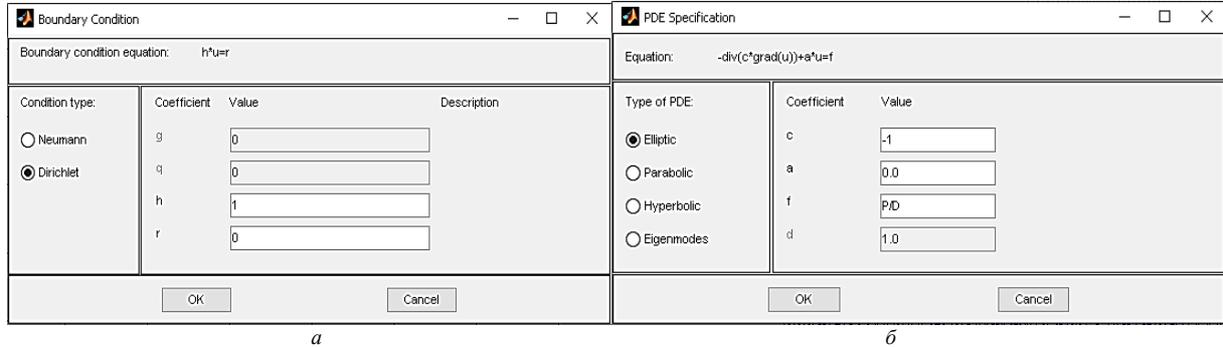


Рисунок 9. – Установка нулевых граничных условий Дирихле (а) и выбор типа дифференциального уравнения с определением его коэффициентов (б)

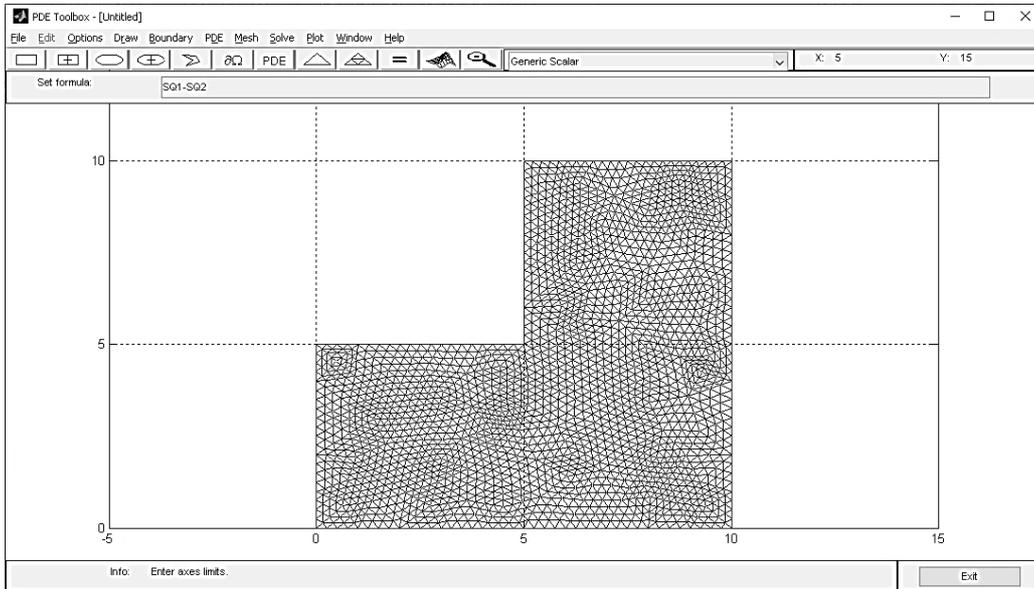


Рисунок 10. – Модель пластины в PDE Toolbox с выполненной триангуляцией

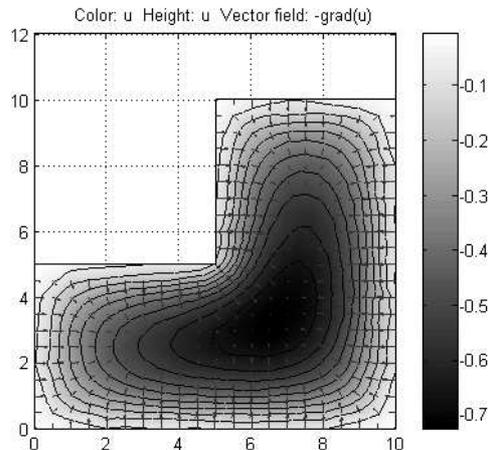


Рисунок 11. – Распределение нагрузки по поверхности пластины

**Заключение.** Таким образом, среда MATLAB является мощным инструментом для решения задач широкого спектра применения, а организация встроенных возможностей в виде отдельных тематических Toolboxes значительно упрощает поиск нужной функции, необходимой для решения задачи.

Среда MATLAB может быть полезна для студентов различных технических специальностей, прежде всего, строительных, в их дальнейшей профессиональной деятельности при решении различных прикладных задач. Преимущество программы состоит также в том, что большинство Toolboxes имеют свой графический интерфейс, что позволяет пользователю, слабо владеющему основами программирования, выполнить необходимые действия для получения необходимого результата. Основы работы в среде MATLAB могут частично изучаться студентами строительных специальностей в рамках учебного материала таких дисциплин, как «Информатика», «Компьютерные и информационные технологии», «Информационные технологии в образовании» и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов, В.П. MATLAB. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
2. Лазарев, Ю.Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB : учеб. курс / Ю.Ф. Лазарев. – СПб. : Питер, 2005. – 511 с.
3. Перечень Toolbox среды MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.mathworks.com/products.html>. – Дата доступа: 24.04.2020.
4. Ходыкин, В.Ф. Сборник задач по математическому программированию / В.Ф. Ходыкин, А.А. Преображенский. – Донецк : Изд-во ДНУ, 2002. – 218 с.
5. Справочная документация функции fmincon [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>. – Дата доступа: 24.04.2020.
6. Каюгина, С.М. Решение задач оптимального раскроя средствами MS Excel / С.М. Каюгина // Молодой учёный. – 2016. – № 23. – С. 54–57.
7. Чихунов, Д.А. Методика и техника для контроля прочности бетонов и других искусственных каменных материалов / Д.А. Чихунов // Строительная инженерия. – 2005. – № 2. – С. 13–16.
8. Список функций PDE Toolbox [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/pde.html>. – Дата доступа: 24.04.2020.
9. Белубекян, М.В. Расчет изгиба жестко закрепленной пластины при равномерной нагрузке по уточненной теории / М.В. Белубекян, Ю. Г. Саноян // Математическое моделирование и краевые задачи : сб. тр. IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Самара, 29–31 мая 2007 г. / СамГТУ ; редкол.: В.П. Радченко (отв. ред.) [и др.]. – Самара, 2007. – Ч. 1. – С. 42–45.

Поступила 06.09.2020

#### APPLICATION OF MODERN INTEGRATED PACKAGES FOR SOLVING APPLIED PROBLEMS IN THE CONSTRUCTION PROCESS

V. DAVYDOVSKAYA, I. YEFIMCHIK, E. DANCHENKO

*In the course of the design and implementation of construction processes, a number of tasks arise related to optimizing the location of facilities under construction, manufacturing structures, modeling processes and systems, forecasting, etc. This paper demonstrates some of the capabilities of the MATLAB environment, using the example of solving certain applied problems in construction. The work was carried out within the framework of the international technical assistance project Erasmus+ 609557-EPP-1-2019-LV-EPPKA2-CBHE-JP «Development of practically-oriented student-centred education in the field of modelling of Cyber-Physical Systems».*

**Keywords:** MATLAB, toolboxes, construction, optimization, experimental data, load, plate.

УДК 697.94

**УГЛУБЛЕННЫЙ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

*канд. техн. наук, доц. А.В. ЗАДОЯННИЙ, Ю.Н. ЕВДОКИМЕНКО*  
(Киевский национальный университет строительства и архитектуры)  
e-mail: zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua

*Приведены результаты расчетов относительной эксергетической эффективности основных психрометрических процессов в центральных системах кондиционирования воздуха. Расчеты проведены по оригинальной методике, которая базируется на современной теории эксергетического анализа с учетом составляющих эксергии влажного воздуха и энергоносителей. В методике учтены отдельные составляющие эксергии воздуха – термическая, химическая концентрационная (влажностная) и механическая, что дает возможность учитывать и анализировать их термодинамические потенциалы отдельно и определять показатели относительной эффективности процессов нагревания, охлаждения, увлажнения и осушки воздуха. Эта отличительная от традиционной методики особенность является корректным инструментом для сравнительной оценки энергоэффективности каждого отдельного процесса. Углубленность эксергетического анализа приведенной в работе методики заключается в учете всех составляющих эксергии влажного воздуха. Термодинамические потенциалы составляющих в процессах обработки воздуха соизмеримы друг с другом, что позволяет их корректно сравнивать при анализе энергоэффективности. В работе показана возможность определения эксергетической эффективности отдельно по составляющим процессам при комбинированной обработке воздуха с учетом весомости каждого отдельного процесса. Результаты приведенных расчетов демонстрируют уровень энергетической эффективности основных психрометрических процессов и дают возможность корректного сравнения каждого из них. Представленные в работе научно-методологические положения углубленного эксергетического анализа процессов обработки воздуха в центральных кондиционерах могут служить базовой методикой для оценки, оптимизации и корректировки схемных решений по критерию эксергетической эффективности систем кондиционирования воздуха на всех стадиях их жизненного цикла и при разработке новых систем и функциональных элементов.*

**Ключевые слова:** системы кондиционирования воздуха, психрометрические процессы; эксергетический анализ; эксергетический коэффициент полезного действия.

**Введение.** Системы обеспечения микроклимата в крупных коммерческих и промышленных зданиях являются крупнейшими потребителями энергии, доля которых по данным [1] достигает 70%. Среди них доминируют системы кондиционирования воздуха (далее – СКВ).

Повышение уровня энергосбережения в указанных системах обеспечения микроклимата зданий и сооружений невозможно без корректной оценки их эффективности. Эксергетический анализ технических систем является совершенным и перспективным методом для оценки энергетических потерь и широко используется при оценке эффективности систем кондиционирования воздуха [2]. Однако используемые отдельными исследователями в рамках эксергетического метода оценки эффективности СКВ не всегда дают корректные результаты. В работе [3] нами было указано на некорректность результатов при оценке эксергетической эффективности отдельных процессов центральных СКВ и сплит-систем, где для первого случая было получено значение эксергетического КПД меньше нуля, а для второго – больше единицы. Указанные результаты были получены при использовании традиционной методики эксергетического анализа, который приемлем для объектов, где энергетические потоки имеют достаточно высокие термодинамические потенциалы. К ним относятся тепловые и атомные станции, химические, металлургические комбинаты и другие подобные предприятия, где значения основных физических параметров состояния – давления и температуры – в различных процессах составляют десятки мегапаскаль и тысячи градусов Цельсия. В СКВ указанные параметры в процессах обработки воздуха имеют ощутимо меньшие значения и варьируются в пределах не более 3...5 кПа для давления воздуха, не более 100 кПа – для энергоносителей в системах тепло- и холодоснабжения. Значения температуры в СКВ не превышают регламентированных температурными графиками для систем коммунального теплоснабжения, а для воздуха, обрабатываемого в СКВ, – не более и не менее значений окружающей среды для соответствующих периодов года.

Традиционный метод эксергетического анализа не в полной мере может быть приемлемым для СКВ ввиду того, что оперирует потенциалами тепломеханической эксергии, которые, как уже указывалось выше, дают достаточно корректную оценку для соответствующих объектов анализа с высокими энергетическими потенциалами. В случае СКВ интерес представляют составляющие полной эксергии влажного воздуха – термическая, механическая и химическая концентрационная (влажностная) – для воздуха, а для энергоносителей – горячей и холодной воды – механическая и термическая составляющие.

В работе [4] нами было показано, какие виды эксергии и их потенциалы приемлемы и могут корректно отображать процессы обработки влажного воздуха в СКВ. Там же приведены соответствующие формулы для их расчета, апробированные в проектной и учебной практике, а также при эксплуатации систем.

Следует заметить, что эксергетические потенциалы составляющих эксергии влажного воздуха в СКВ соизмеримы, что дает основание утверждать о целесообразности учета при анализе всех составляющих.

**Основная часть.** Эксергетический метод предусматривает анализ термодинамических систем с целью их дальнейшей оптимизации по одному из основных параметров – эксергетической эффективности или эксергетическому КПД (ЭКПД). Указанный параметр как результат эксергетического анализа определяют как отношение полезного эффекта к подведенной эксергии от энергоносителей. В СКВ для общественных и административных зданий в целом и в их отдельных функциональных элементах к полезным эффектам следует отнести психрометрические процессы, которые последовательно проходят обработку воздуха перед подачей в обслуживаемое помещение. К основным из них следует отнести нагревание, охлаждение, осушку и увлажнение воздуха. Психрометрические процессы в СКВ характеризуются изменением следующих параметров: температуры, энтальпии, влагосодержания (характеризуется значением парциального давления водяных паров) и относительной влажности воздуха.

Значения эксергии в указанных процессах определялись по известным зависимостям удельно на килограмм сухого воздуха и для воздушного потока в каждой конечной и начальной точках [2]. Разность эксергетических потенциалов и потоков каждого отдельного процесса рассматривалась как полезная часть эксергии, полученная воздухом от энергоносителя. Эксергетические потенциалы в характерных точках процессов определялись для каждой составляющей эксергии воздуха отдельно.

Расчетные зависимости для определения эксергетических потоков воздуха следующие, кДж/с: для термической составляющей

$$E_{a,h}^{cs} = G_a^{cs} \left[ T_a^{ext} \left( c_{p,d,a} + d_a^{cs} c_{p,w,v} \right) \left( \frac{T_a^{cs}}{T_a^{ext}} - 1 - \ln \frac{T_a^{cs}}{T_a^{ext}} \right) \right]; \quad (1)$$

для влажностной составляющей

$$E_{a,ch,cn,w}^{cs} = G_a^{cs} \left[ T_a^{ext} R_v \left( \left( 0,622 + d_a^{cs} \right) \ln \frac{0,622 + d_a^{ext}}{0,622 + d_a^{cs}} + d_a^{cs} \ln \frac{d_a^{cs}}{d_a^{ext}} \right) \right]; \quad (2)$$

для механической составляющей

$$E_{a,m}^{cs} = G_a^{cs} \left[ \left( T_a^{ext} R_v \left( 0,622 + d_a^{cs} \right) \ln \frac{P_a^{cs}}{P_a^{ext}} \right) \right], \quad (3)$$

где  $G$  – массовый поток воздуха, кг/с;

$T$  – абсолютная температура, °К;

$c$  – массовая теплоемкость, кДж/кг°К;

$d$  – влагосодержание, кг/кг;

$P$  – абсолютное давление воздуха, кПа;

$R$  – газовая постоянная водяного пара, кДж/кг°К;

Индексы:  $a$  – воздух;  $h$  – теплота;  $cs$  – текущее состояние;  $ext$  – наружный;  $p$  – изобарный;  $d$  – сухой;  $w$  – влажный;  $v$  – пар;  $cn$  – концентрация;  $ch$  – химический.

Удельные значения эксергии воздуха определялись по приведенным зависимостям без множителя  $G$ . Начальные и конечные параметры психрометрических процессов определялись на основании паспортных данных соответствующего оборудования отечественных и зарубежных производителей, а также по результатам лабораторных и натурных замеров.

Расчетные зависимости для определения эксергетических потоков энергоносителей следующие, кДж/с: поток физической (термической и механической) эксергии энергоносителя – горячая и холодная вода:

$$E_{w,i,ph} = g_{w,i,m} \left[ \left\{ c_{p,w,i} \left( T_{w,i}^{cs} - T_a^{ext} \right) - T_a^{ext} \ln \frac{T_{w,i}^{cs}}{T_a^{ext}} \right\} + v_{w,i}^{cs} \left( P_{w,i}^{cs} - P_a^{ext} \right) \right], \quad (4)$$

где  $g_{w,i,m}$  – массовый поток воды, кг/с;

$c_{p,w,i}$  – изобарная теплоемкость воды, кДж/кг°К;

$T_{w,i}^{cs}$  и  $T_a^{ext}$  – абсолютная температура, соответственно, теплоносителя и наружного воздуха, °К;

$v_{w,i}^{cs}$  – удельный объем воды, м<sup>3</sup>/кг;

$P_{w,i}^{cs}$  и  $P_a^{ext}$  – абсолютное давление, соответственно, теплоносителя и наружного воздуха, кПа.

В формуле (4) в фигурных скобках – термическая составляющая эксергии воды, а второе слагаемое в квадратных скобках – механическая.

Эксергию потока хладагента в состоянии насыщенного пара определяли по формуле, кДж/с

$$E_{cl,r,v,sat,ph} = g_{cl,r,m} \left[ c_{p,r,sat,v} \left\{ (T_{cl,r,sat,v}^{cs} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left( \frac{T_{cl,r,sat,v}^{cs}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{cl,r,sat,v} (P_{cl,r,sat,v}^{cs} - P_a^{ext}) \right] \quad (5)$$

а в состоянии жидкости по формуле

$$E_{cl,r,l,ph} = g_{cl,r,m} \left[ c_{p,r,l} \left\{ (T_{cl,r,l} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left( \frac{T_{cl,r,l}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{cl,r,l} (P_{cl,r,l} - P_a^{ext}) \right], \quad (6)$$

где индексы *cl* – хладагент; *m* – массовый; *sat* – насыщенный; *v* – объем; *r* – хладагент; *l* – жидкость;

Эксергетическую эффективность ЭКПД процессов определяли как для процесса отдельно с несколькими эффектами (общая эффективность), например – охлаждение и увлажнение, так и отдельно для увлажнения или охлаждения (функциональная эффективность) воздуха. При этом использовали следующие расчетные зависимости:

– функциональная эффективность

$$\eta_f^{ex} = \frac{\Delta E_{a,us,i}}{\Delta E_{e,t,wast}}; \quad (7)$$

– общая эффективность

$$\eta_o^{ex} = \frac{\Sigma \Delta E_{a,us,i}}{\Delta E_{e,t,wast}}, \quad (8)$$

где  $\Delta E_{a,us,i}$  – разница эксергетических потоков воздуха *i*-ой полезной составляющей, кВт;

$\Delta E_{e,t,wast}$  – использованная эксергия энергоносителя на реализацию процесса;

$\Sigma \Delta E_{a,us,i}$  – сумма разницы эксергетических потоков воздуха полезных составляющих эксергии.

Психрометрические процессы, по которым были проведены расчеты эксергетической эффективности, представлены на I-d-диаграммах рисунка 1.

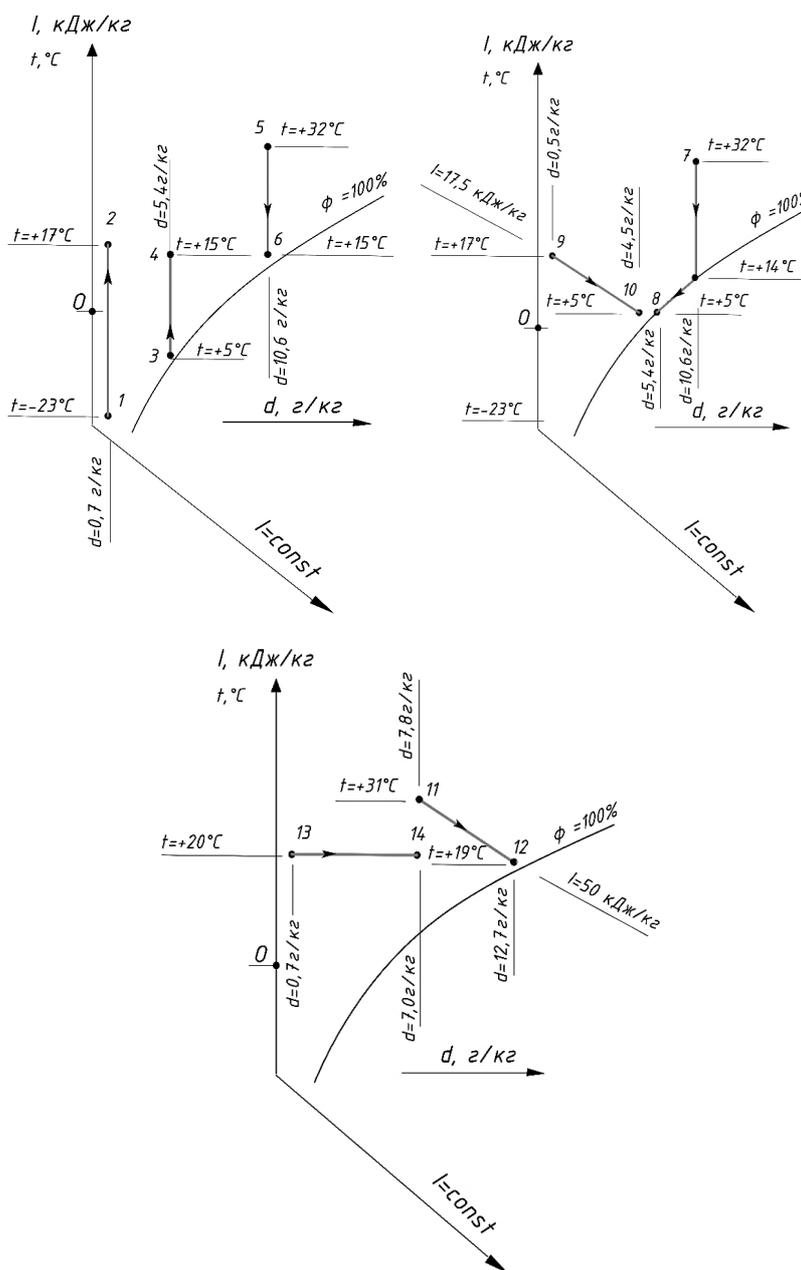
Результаты расчетов эксергетических потенциалов и ЭКПД приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты расчетов эксергетических потенциалов и эксергетической эффективности основных психрометрических процессов в СКВ

Психрометрический процесс	Разность эксергетических потенциалов и потоков воздуха в психрометрическом процессе по составляющим				Использованная эксергия энергоносителя на реализацию процесса, кВт	Эксергетическая эффективность процесса, %	
	Термическая удельная, кДж/кг/ абсолютная, кВт	Влажностная удельная, кДж/кг/ абсолютная, кВт	Механическая удельная, кДж/кг/ абсолютная, кВт	Полная абсолютная, кВт		Функциональная	Общая
1	2,77	–	0,13	5	6	7	8
Нагревание (процесс 1-2)	2,77	–	0,13	6,62	32,4	8,5	19,5
	6,32	–	0,3				
Нагревание (процесс 3-4)	0,796	–	0,049	1,92	3,279	24,2	58,5
	1,813	–	0,111				
Охлаждение (процесс 5-6)	0,509	–	0,049	1,271	2,64	19,2	48,1
	1,159	–	0,112				
Охлаждение и осушка с конденсацией влаги (процесс 7-8)	1,307	0,216	0,397	4,375	9,79	15,5	44,6
	2,978	0,492	0,905				

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Адиабатное увлажнение (процесс 9-10)	1,186	0,677	0,042	4,345	6,32	10,7	68,7
	2,7	1,549	0,096				
Адиабатное охлаждение (процесс 11-12)	0,25	0,338	0,178	1,743	11,59	2,1	15,08
	0,569	0,769	0,405				
Изотермическое увлажнение (процесс 13-14)	0,038	1,128	0,0149	2,69	5,61	20,1	47,9
	0,086	2,56	0,033				



1–2, 3–4 – нагревание; 5–6 – сухое охлаждение; 7–8 – охлаждение и осушка с конденсацией влаги;  
9–10 – адиабатическое увлажнение; 11–12 – адиабатное охлаждение; 13–14 – изотермическое увлажнение

Рисунок. – I-d-диаграммы основных психрометрических процессов обработки воздуха  
в системах кондиционирования воздуха

Результаты расчетов показывают достаточно корректные показатели, которые позволяют численно определить значения эксергетических потенциалов и потоков каждого отдельного процесса обработки воздуха в СКВ. Полученные значения эксергетической эффективности психрометрических процессов демон-

стрируют уровни использования эксергии потоков различных энергоносителей для реализации соответствующих процессов обработки воздуха. Наибольшие значения ЭКПД отмечаются в процессах нагревания воздуха в холодный период года (процесс 3-4) и адиабатного увлажнения (процесс 9-10). В случае нагрева относительно высокий показатель ЭКПД, равный 58,5%, можно объяснить небольшой разницей температур нагреваемого воздуха (от 5 до 15 °С), положительным значением начальной температуры и небольшими эксергетическими затратами энергоносителя. Сравнение процесса нагрева 3-4 с процессом нагрева 1-2 для холодного периода года от расчетной температуры для Киева –22°С показывает значительную разницу как по показателю ЭКПД, так и по эксергетическим затратам энергоносителя, отличие в значениях которого составляет более, чем в десять раз. Что касается адиабатического увлажнения в процессе 9-10, то относительно высокое значение ЭКПД, равное 68,7%, характерно для подобных процессов, которые осуществляются без подвода энергоносителя за счет испарения влаги при орошении воздуха в форсуночных камерах кондиционеров. Наименьшее значение ЭКПД получено для процесса адиабатического охлаждения воздуха 11-12, что говорит о низкой эффективности его использования для охлаждения.

**Заключение.** Представленные в статье результаты эксергетического анализа основных психрометрических процессов в СКВ получены впервые с использованием оригинальной методики авторов. Методика позволяет получать достоверные численные значения и корректно оценивать показатели эксергетического анализа процессов обработки воздуха в СКВ с учетом всех составляющих эксергии влажного воздуха. Методика может быть использована для оценки показателей энергоэффективности процессов в СКВ при проектировании и обследовании систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Задоянний, О.В. Методологічні питання задоволення основної вимоги «Економія енергії»/ О.В. Задоянний, Ю.М. Євдокименко // Енергоефективність в будівництві та архітектурі : наук.-техн. зб. ; Відповід. ред. П.М. Куліков. – Київ : КНУБА, 2017. – Вип. 9. – С. 84–88.
2. Эксергетические расчеты технических систем : справ. пособие / В.М. Бродянский [и др.] ; под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского / АН УССР. Ин-т техн. теплофизики. – Киев : Наук. Думка, 1991. – 360 с.
3. Обґрунтування поглибленого ексергоекономічного аналізу систем кондиціонування повітря // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. збір. – Київ : КНУБіА, 2019. – Вип. 31. – С. 24–32.
4. Задоянний, О.В. Види ексергії в системах кондиціонування повітря та їх визначення / О.В. Задоянний, Ю.М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – Київ : КНУБіА, 2016. – Вип. 19. – С. 3–15.

Поступила 10.12.2020

#### IN-DEPTH EXERGETIC ANALYSIS OF THE MAIN PSYCHROMETRIC PROCESSES IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

A. ZADOYANNY, Y. YEVDOKIMENKO

*The article presents the results of calculations of the relative exergy efficiency of the main psychrometric processes in central air conditioning systems. The calculations were carried out according to the original method, which is based on the modern theory of exergy analysis, taking into account the components of the exergy of moist air and energy carriers. The method takes into account the individual components of the exergy of air - thermal, chemical concentration (moisture) and mechanical, which makes it possible to take into account and analyze their thermodynamic potentials separately and determine the indicators of the relative efficiency of the processes of heating, cooling, humidification and air drying. This distinctive feature from the traditional methodology is the correct tool for comparative assessment of the energy efficiency of each individual process. The depth of the exergy analysis of the method presented in the work consists in taking into account all the components of moist air exergy. The thermodynamic potentials of the components in air handling processes are comparable to each other, which allows them to be correctly compared when analyzing energy efficiency. The paper shows the possibility of determining the exergetic efficiency separately by the components of the processes in combined air treatment, taking into account the weight of each individual process. The results of the above calculations show the level of energy efficiency of the main psychrometric processes and make it possible to correctly compare each of them. The scientific and methodological provisions of in-depth exergy analysis of air handling processes in central air conditioners presented in the work can serve as a basic method for assessing, optimizing and adjusting circuit solutions according to the criterion of exergy efficiency of air conditioning systems at all stages of their life cycle and also in the development of new systems and functional elements.*

**Keywords:** air conditioning systems; psychrometric processes; exergetic analysis; exergetic efficiency.

УДК 628.544

## СИНТЕЗ ДИГИДРАТА СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

М.А. КОМАРОВ, Н.Г. КОРОБ

(Белорусский государственный технологический университет);

В.И. РОМАНОВСКИЙ

(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск)

Все виды гипсовых вяжущих (строительного, высокопрочного и ангидритового) получают в основном из следующих гипсосодержащих материалов – природного гипса, техногенных продуктов (сульфогипса, фосфогипса, борогипса, титаногипса, цитрогипса и др.). В качестве аналога этим материалам был предложен синтетический гипс, полученный как целевой продукт из отработанной разбавленной серной кислоты и карбоната кальция. Размеры кристаллов дигидрата сульфата кальция при оптимальных размерах технологических параметров и времени выдержки до 4,5 часов увеличивались с 18 до 28 мкм и при этом соединялись в агломераты с размерами в большей степени лежащими в диапазоне от 200 до 600 мкм, а также приобретали призматическую форму вместо игольчатой, что упрощало и ускоряло промышленный процесс фильтрации. Наше исследование показывает, что синтетический гипс, полученный путем взаимодействия суспензией карбоната кальция и серной кислоты (в том числе отработанной), является перспективным аналогом для стран, у которых существуют проблемы с гипсосодержащим сырьем.

**Ключевые слова:** отработанная серная кислота, мел, дигидрат сульфата кальция.

**Введение.** Вовлечение отходов производства в хозяйственный оборот является актуальной задачей, которой посвящается все больше исследований [1–9]. В мире образуется более 50 видов гипсосодержащих отходов, среди которых наиболее масштабными являются фосфогипс, сульфогипс и др.

К настоящему времени в мире, разработано множество технологических схем переработки фосфогипса на различные гипсовые вяжущие, однако по экономическим соображениям лишь примерно 2–3% данного техногенного продукта, по данным ООН [10], перерабатывается на гипсовые вяжущие и другие строительные материалы. Такое крайне неудовлетворительное положение обусловлено многостадийностью обезвреживания примесей, в том числе радиоактивных изотопов, в ходе подготовки фосфогипса к последующей переработке. Следует также отметить, что полученный по «дигидратной» технологии фосфогипс, помимо того, что содержит кислые примеси фосфатов, характеризуется игольчатой формой кристаллов, которая негативно влияет на свойства гипсовых вяжущих [11].

Перспективность применения сульфогипса в качестве сырья для гипсовых вяжущих подтверждается данными экономического анализа, проведенного компанией Roskill (Великобритания) относительно стоимости его по сравнению с природным гипсом [12]. Из него следует, что в странах Западной Европы стоимость одной тонны природного гипса в долларах США составляет 10–15, а стоимость тонны синтетического гипса – 3,5–5. В США стоимость одной тонны гипса, получаемого при десульфуризации составляла 8–9,5 долларов США и объем его выпуска постоянно растет, составляя в настоящее время около 700 тыс. тонн в год [12].

Наиболее существенное влияние на свойства гипсового вяжущего оказывают, помимо содержания основного вещества, такие свойства, как параметры элементарной ячейки кристаллической решетки [13], морфология кристаллов  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и его физические свойства, в частности, плотность гипсового камня. Эти характеристики, как правило, отличаются не только в сырье различных месторождений, но и в определенной мере даже в пределах участков одного месторождения. Именно это является основной причиной трудностей, связанных с управлением технологическим процессом производства строительного и высокопрочного гипсовых вяжущих. В связи с этим в последнее время предпринимаются попытки разработать научные подходы в оценке качества природного гипсового сырья, а также создания теоретической равновесной морфологии гипса [14].

Более однородным по химическому составу и физическим свойствам является полученный искусственным путем как целевой продукт синтетический дигидрат сульфата кальция. При получении синтетического гипса использовались различного рода исходные продукты, начиная с техногенных и заканчивая специально получаемыми синтетическими. Так, в патентах [15; 16] описываются способы получения  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  путем нейтрализации сточных вод, содержащих в значительном количестве ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Однако получаемый таким образом гипс из-за неизбежного присутствия в нем значительного количества примесей рекомендован лишь в качестве наполнителя при производстве изоляционных и огнестойких материалов, бумаги, красок, синтетических смол и др.

Как показал проведенный анализ литературных и патентных источников, свойства гипсового вяжущего в определенной степени зависят от размера и формы исходного  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Чем крупнее кристаллы

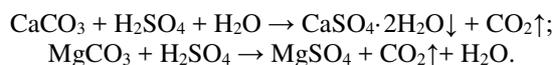
дигидрата сульфата кальция, чем ближе их форма приближается к кубической и отдаляется от игольчатой, тем крупнее кристаллы образующегося полугидрата сульфата кальция, меньше водопотребность и, соответственно, выше прочность вяжущего. Кроме того, осадок дигидрата сульфата кальция должен обладать хорошей фильтруемостью, а это свойство также зависит от формы и величины кристаллов продукта. Гипс, получаемый из природного сырья, может обладать непостоянством прочностных показателей, и связано это, в первую очередь, с кристаллохимическими особенностями гипсового камня, обусловленными различной морфологией кристаллов гипса и присутствием в их структуре различных примесей. Получение синтетического гипса может быть ориентировано на получение кристаллов заданного габитуса, а, следовательно, высоких прочностных свойств гипсового вяжущего, получаемого на его основе.

При производстве гипса, как и при любом другом производстве, важным является природоохранительный аспект. Поиск и внедрение в производство материалов на основе отходов производств определяет актуальность и необходимость проведения исследований, результаты которых позволят научно обосновать эффективность их использования. Например, такими отходами являются отходы водоподготовки [17–19], которые практически не используются повторно, однако представляют собой перспективные материалы для вторичного использования, а также отходы гальванических производств [20]. При производстве гипса таким сырьевым компонентом на основе отходов производств может быть рассмотрена, например, отработанная разбавленная серная кислота, которая образуется на ряде предприятий химического комплекса. Данная кислота с целью утилизации подвергается дополнительному разбавлению, затем нейтрализации и зачастую сбрасывается в реки, так как процесс регенерации весьма затратный и восстановленная серная кислота намного дороже свежей концентрированной. Также возможно вовлечение в технологический процесс еще одного отхода, такого как отсев мелкой фракции известняка, который образуется на сахарных, металлургических заводах и заводах по производству извести в шахтных печах. Он накапливается в отвалах, занимающих большую территорию полезных земель. Помимо использования отходов при производстве гипса необходимо, чтобы процесс характеризовался максимально комплексным использованием сырья в целях снижения воздействия на окружающую среду.

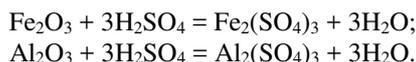
**Методология исследований.** Для проведения синтеза синтетического гипса были выбраны в качестве сырьевых материалов: отработанная разбавленная серная кислота, получаемая при производстве жаростойких волокон, вода и мел. Отработанная разбавленная серная кислота представляет собой маслообразную жидкость желтоватого оттенка, плотностью 1,41–1,43 г/см<sup>3</sup> при 25 °С и концентрацией 53–55%. В своем составе содержит органические примеси, в том числе терефталевую кислоту (до 0,014 мас.%). Кроме того, в ней присутствует гидрозинсульфат – до 2,5 г/л и железо в количестве 55–58 мг/л. Химический состав мела, мас. %: CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> в пересчете на CaCO<sub>3</sub> – 95,57; CaCO<sub>3</sub> – 94,5; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,21; н.о. – 1,98; H<sub>2</sub>O – 0,48; Вода питьевая: содержание железа – 0,3 мг/л; окисляемость перманганатная – не более 5 мг O<sub>2</sub>/л; pH – 6,0–9,0.

Осаждение дигидрата сульфата кальция проводилось путем смешивания серной кислоты и меловой суспензии в реакторе при постоянном перемешивании со скоростью вращения мешалки 90–150 об/мин и постоянном подогреве до 40–60 °С. Движущей силой кристаллизации являлось пересыщение в реакционной системе. Полнота реакции осаждения контролировалась по окончанию газовой выделению и изменению водородного показателя реакционной смеси.

При разложении мела серной кислотой протекают следующие химические реакции:



В связи с тем, что в меле содержатся глинистые минералы (каолиниты), которые в общем виде можно представить формулой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O), при разложении мела серной кислотой также протекают следующие реакции (SiO<sub>2</sub> – нерастворимая примесь):



Затем готовится раствор серной кислоты заданной концентрации (53–55 мас.%). Серная кислота со скоростью 0,55–0,85 л/ч подается в реактор к меловой суспензии, которая постоянно перемешивается. Температура внутри реактора поддерживается в интервале 40–60 °С. Окончание реакции взаимодействия фиксируется по завершению выделения углекислоты и достижения нейтрального значения pH. В полученную суспензию дигидрата сульфата кальция вводится добавка, выполняющая роль агломерирующего вещества. Суспензия при постоянном перемешивании выдерживается в течение 2,5–4 часов с целью укрупнения частиц дигидрата сульфата кальция. По прошествии указанного времени суспензия отправляется на фильтрацию, где осуществляется отделение осадка дигидрата сульфата кальция от маточного раствора. Полученный кек дигидрата сульфата кальция подвергается сушке, а маточный раствор отправляется на стадию приготовления

меловой суспензии. Полученный дигидрат сульфата кальция может использоваться в технологиях переработки на гипсовые вяжущие, производстве композиционных материалов строительного и технического назначения, а также медицине, либо в технологиях, где необходим сам дигидрат сульфата кальция.

Морфологию и элементный состав образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi Field Emission Scanning Electron Microscope SU-70 (Япония), оснащенного X-Max Silicon Drift Detector (SDD) (Oxford Instruments, Англия) для элементного анализа. Фазовый состав полученных образцов определяли на приборе Panalytical X'PERT PRO diffractometer (Голландия). Для анализа результатов использовали библиотеку PDF2 database. Обработка проводилась в программе HighScore Plus. Средний размер кристаллитов рассчитывали по формуле Шерера:

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

где  $K = 1$ ,  
 $\lambda = 0.155418$  нм (CuK $\alpha$  line),  
 $\beta$  – ширина пика на полувысоте,  
 $\theta$  – угол дифракции.

Термогравиметрический анализ проводили на приборе NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. Скорость нагрева 10 °С в минуту до температуры 950 °С.

**Результаты и обсуждение.** Из полученных данных элементного анализа следует, что соотношение по атомной массе между Са и S составляет  $11,40 \pm 0,58 : 11,92 \pm 0,73$ . С учетом стандартного отклонения полученных результатов соотношение составляет 1:1, это также подтверждает, что полученный материал из отработанной серной кислоты и карбоната кальция является  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Управлением кристаллизацией дигидрата сульфата кальция занимались многие исследователи, которые изучали факторы, оказывающие существенное влияние на осаждение дигидрата сульфата кальция, в том числе температуры, перенасыщения, влияние органических и неорганических добавок [21; 22]. Несмотря на значительные исследования образования сульфата кальция в водной среде осталось множество неопределенностей, в том числе факторов, которые позволяют получать частицы двуводного гипса заданной формы и размера, а также сростки кристаллов – частицы.

Как указывалось, ранее, между размером, формой кристаллов и прочностными показателями вяжущего на его основе существует взаимосвязь. Это объясняется тем, что при таком режиме формируется большее количество крупных призматической формы кристаллов  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (рисунок 1) по сравнению с другими условиями синтеза, дающими преимущественно кристаллы игольчатой формы большой длины и малой ширины [23]. Оптимальные параметры синтеза синтетического гипса из отработанной серной кислоты и карбоната кальция позволяют получить именно кристаллы призматической формы, а не игольчатой, что видно на рисунке 1. Кристаллы данной формы позволяют также облегчить стадию фильтрации (центрифугирования), так как кристаллам игольчатой формы легче, чем кристаллам призматической формы, проскочить сквозь отверстие в сетке центрифуги и тем самым снизить выход полезного продукта ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

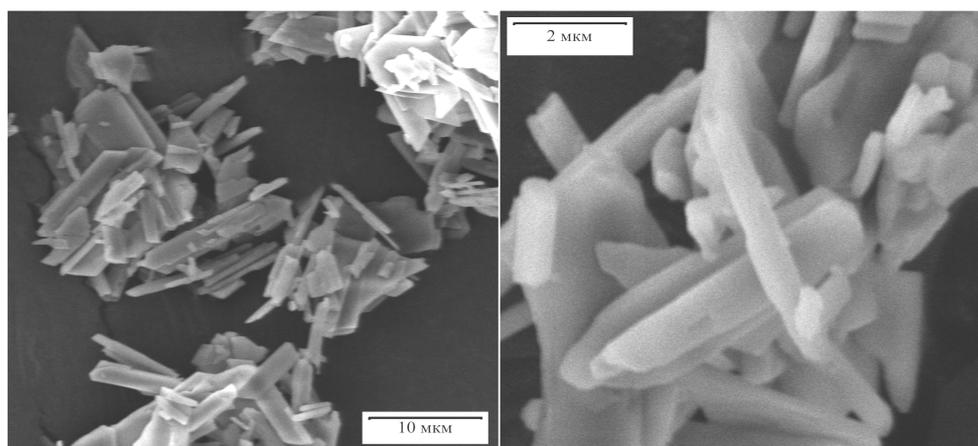


Рисунок 1. – Микрофотографии синтезированных кристаллов  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Авторами [24] методом управляемого синтеза были получены кристаллы дигидрата сульфата кальция, но кристаллы получались отдельными, в нашем исследовании была получена отличительная особенность – кристаллы дигидрата сульфата кальция получают в виде сростков (частиц), что укрупняет полу-

чаемые частицы и позволяет существенно облегчить стадию центрифугирования, увеличив при этом прочностные показатели получаемого вяжущего на его основе.

Примеси, содержащиеся в меле (глинистые минералы, кварц), присутствуют в составе непромытого кека – осадка двухводного гипса. После проведения промывок осажденного дигидрата сульфата кальция примесных компонентов не наблюдалось (рисунок 2).

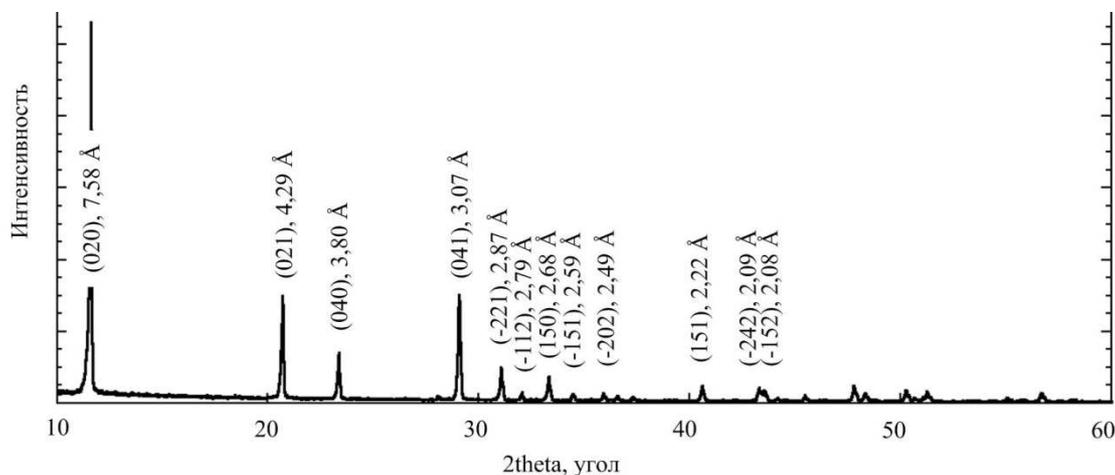


Рисунок 2. – Рентгенограмма синтетического гипса

Эффективное удаление примесей из осадка свидетельствует о том, что они не являются сокристаллизованными в структуре  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , а сорбированными на поверхности кристаллов.

На рисунке 3 представлены результаты просвечивающей электронной микроскопии синтезированного образца.

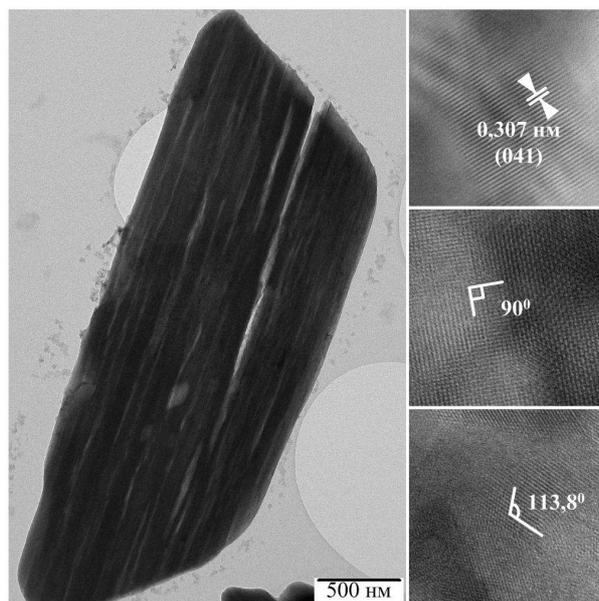
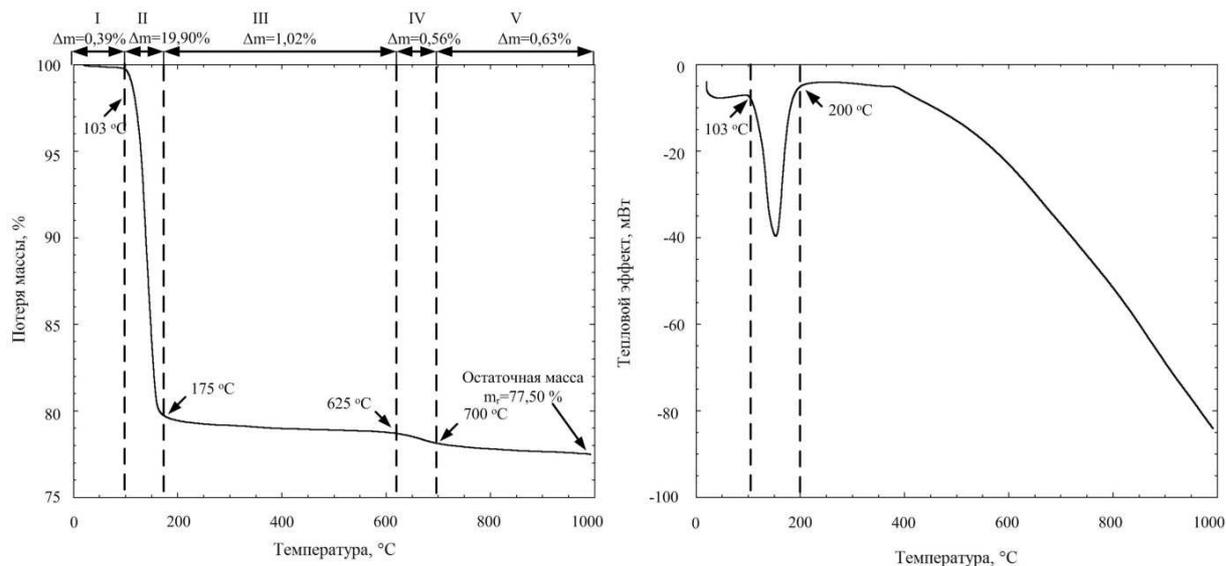


Рисунок 3. – ПЭМ образца синтетического гипса

Указанное на рисунке 3 межплоскостное расстояние  $3.07 \text{ \AA}$  соответствует пику  $29.1 \text{ } 2\theta$  (см. рисунок 2). Бета угол  $113,8^\circ$  несколько отличается от стандартного значения  $118,43^\circ$  и близко к другому значению пространственной группы  $C2/c$  со значениями:  $a \sim 6,27$ ,  $b \sim 15,20$ ,  $c \sim 5,67 \text{ \AA}$ , бета  $\sim 114^\circ$ .

На I интервале с  $0^\circ \text{ C}$  до  $103^\circ \text{ C}$  происходит удаление остаточной физической влаги, что связано с изменением массы на  $0,39\%$ . На II интервале в области  $103\text{--}175^\circ \text{ C}$  регистрируется эндотермический эффект, связанный с удалением кристаллизационной воды. При  $103^\circ \text{ C}$  начинается отделение  $1,5$  молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  с получением  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , после чего начинают отделяться оставшиеся  $0,5$  молекулы кристаллизационной  $\text{H}_2\text{O}$  с дальнейшим получением  $\text{CaSO}_4$ . Процесс дегидратации завершается при достижении температуры в  $175^\circ \text{ C}$ , при котором теряется  $19,90\%$  массы образца. Следует отметить, что температура ука-

занных эндоэффектов на 15–20 °С ниже, чем у природного гипса. Это можно объяснить большей дисперсностью синтетического гипса, а также присутствием в нем минеральных примесей, влияющих на топохимический механизм дегидратации  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . На III интервале в области 175–625 °С завершается процесс отщепления оставшейся кристаллизационной воды и получается растворимый ангидрит. Это связано с потерей массы в количестве 1,02%. На IV интервале регистрируется размытый относительно неглубокий эндотермический эффект при 625–700 °С соответствует началу разложения остатков карбонатсодержащих соединений, т.е. примесей карбоната магния, который является реликтовым компонентом мела что соответствует потере массы в 0,56%. На V интервале завершается процесс разложения реликтовых карбонатов Ca и Mg, что соответствует потере массы в 0,63%. По полученным данным изменения массы от температуры также можно сделать вывод о том, что полученный материал является  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



**Рисунок 4. – Зависимость изменения массы синтетического гипса, полученного сернокислотным разложением мела от температуры**

Проведенный поиск литературных источников показал, что целенаправленным получением синтетического дигидрата сульфата кальция в промышленных масштабах никто не занимался, так как существуют огромные запасы природного гипсового камня. Однако есть ряд государств, у которых нет своих месторождений, но существуют месторождения карбонатов кальция и химические производства, где выпускается или используется серная кислота. Данные исследования доказали возможность целенаправленного получения дигидрата сульфата кальция из карбонатного сырья и серной кислоты, но еще более важным является то, что мы доказали возможность использования отходов производства в данном синтезе, а именно в использовании отработанной серной кислоты производства химических волокон и отсева мелкой фракции известняка, которая образуется на сахарных и металлургических заводах при выпуске извести в шахтных печах.

**Закключение.** Анализ параметров процесса синтеза дигидрата сульфата кальция из местного карбонатного сырья (мела) и отработанной серной кислоты дают основание утверждать, что такой процесс является осуществимым для получения целевого продукта заданного качества.

При описанном режиме формируется большее количество крупных кристаллов пластинчатой формы  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , что облегчает стадию фильтрации и увеличивает прочностные показатели гипсовых вяжущих на основе синтетического гипса. Разработанный цикл получения синтетического дигидрата сульфата кальция является замкнутым по воде, т.е. вся выделенная вода в процессе центрифугирования используется для приготовления меловой суспензии на первом этапе производства. Структурно-управляемый синтез дигидрата сульфата кальция позволил получать его частицы размером 200–500 мкм, что значительно облегчает процесс отделения получаемого гипса от маточного раствора и позволяет методом центрифугирования отделять не менее 95 мас.% образующихся кристаллов. Оставшаяся часть в маточном растворе является затравочной для следующего цикла синтеза. Примеси, внесенные вместе с сырьем, эффективно удаляются из получаемого осадка с помощью промывки, что свидетельствует о том, что они не являются сокристаллизованными в структуре  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , а сорбируются на поверхности.

Получаемый синтетический гипс по оптимальным параметрам имеет в своем составе не менее 95 мас.% дигидрата сульфата кальция, что соответствует природному гипсовому камню I сорта [25].

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Горелая, О.Н. Сорбент для очистки нефтесодержащих сточных вод на основе отходов станций обезжелезивания / О.Н. Горелая, В.И. Романовский // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2020. – № 10, – С. 48–54.
3. Romanovski, V. New approach for inert filtering media modification by using precipitates of deironing filters for underground water treatment / V. Romanovski // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – P. 31706–31714.
4. Romanovski, V. Agricultural Waste Based-Nanomaterials: Green Technology for Water Purifications / V. Romanovski // *Aquananotechnology*; Edit.: K. Abd-El salam Muhammad Zahid. – Elsevier, 2020. – 1. Ed.: Applications of Nanomaterials for Water Purification. – 622 p.
5. 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.
6. 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.
7. Железосодержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / В.И. Романовский [и др.] // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2019. – № 4. – С. 18–22.
8. Горелая, О.Н. Магнитный сорбент из отходов водоподготовки для очистки нефтесодержащих сточных вод / О.Н. Горелая, В.И. Романовский // *Вестник БрГТУ. Сер. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2020. – № 2. – С. 61–64.
9. Грузинова, В.Л. Сорбционные свойства и эксплуатационные характеристики угольных волокнистых материалов / В.Л. Грузинова, В.И. Романовский // *Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки*. – 2015. – № 16. – С. 141–145.
10. Phosphogypsum: potential uses and problems—a review / E. Saadaoui [et al.] // *International Journal of Environmental Studies*. – 2017. – T. 74. – № 4. – С. 558–567.
11. Rajkovic, M.B. Investigation of the possibilities of phosphogypsum application for building partitioning walls—elements of a prefabricated house / M.B. Rajkovic, D.V. Toskovic // *APTEFF*. – 2002. – T. 33. – С. 1–174.
12. Roskill analyses of worldwide gypsum and anhydrites supply and demand / *Zement – Kalk – Gips Int*. – 2010. – Vol. 63, № 1. – P. 19–20.
13. Production of calcium crystalline sulfate dihydrate by hydration of heat treated waste gypsum boards in citric acid solution / K. Yoshiyuki [et al.] // *Sekko, sekkai, semento, chikyu kankyo no kagaku = J. Soc. Inorg. Mater., Jap.* – 2012. – Vol. 19, № 360. – P. 311–316.
14. Massaro, F.R. Theoretical equilibrium morphology of gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). A syncretic strategy to calculate the morphology of crystals / F.R. Massaro, M. Rubbo, D. Aquilano // *Crystal Growth & Design*. – 2010. – T. 10. – № 7. – С. 2870–2878.
15. A method of producing fibrous gypsum: Pat. 53-33319 Japan, MKI G 11B 1/11, H 01 F 5/70. / Kudo Nosekiho; Japan. – № 55 – 12387; declare 05.11.73; publ. 04.23.77.
16. A method for producing fibrous gypsum: Pat. EP0126050 A1WO, C 01 F 11/46 / B. Aktiebolag; Nils Eric Ferdinand, Lars – Erik – Herbert (Sweden). – № 19840850139; declare 05.02.84; publ. 11.24.84. – 7 p.
17. Романовский, В.И. Термохимическая и механохимическая переработка отходов сетчатых полимеров : дис. ... канд. тех. наук : 25.00.36; 05.17.06 / В.И. Романовский ; Белор. гос. технол. ун-т. – Минск, 2008. – 178 л.
18. Романовский, В.И. Термохимическая и механохимическая переработка отработанных синтетических ионитов с получением ценных химических веществ и сорбционных материалов / В.И. Романовский // *Перспективы науки*. – 2011. – № 4. – С. 132–138.
19. Романовский, В.И. Получение керамических материалов строительного назначения с использованием отходов станций обезжелезивания / В.И. Романовский, Е.В. Крышилович, П.А. Клебеко // *Вода magazine*. – 2018. – № 2. – С. 126.
20. Некоторые направления использования отходов гальванического производства / Марцуль В.Н. [и др.]. // *Труды БГТУ*. – Минск : БГТУ, 2012. – № 3(150). – С. 70–75.
21. Ahmi, F. Kinetics and morphology of formed gypsum / F. Ahmi, A. Gadri // *Desalination*. – 2004. – T. 166. – С. 427–434.
22. Hamdona, S.K. Crystallization of calcium sulfate dihydrate in the presence of some metal ions / S.K. Hamdona, U.A. Al Hadad // *Journal of Crystal Growth*. – 2007. – T. 299. – № 1. – С. 146–151.
23. Influence of temperature and solution composition on the formation of calcium sulfates / K. Luo [et al.]. // *Particuoology*. – 2010. – T. 8. – № 3. – С. 240–244.

24. Role of agitation and temperature on calcium sulfate crystallization in water injection process / M. Kamalipour [et al.]. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Т. 151. – С. 362–372.
25. Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия : ГОСТ 4013-82. – Взамен ГОСТ 4013-74 ; введ. 01.07.83. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 2008. – 16 с.

Поступила 09.12.2020

#### SYNTHESIS OF CALCIUM SULFATE DIHYDRATE FROM TECHNOGENIC RAW MATERIALS

**M. KOMAROV, N. KOROB, V. ROMANOVSKI**

*All types of gypsum binders (construction, high-strength and anhydrite) are obtained mainly from the following gypsum-containing materials – natural gypsum, man-made products (sulfogypsum, phosphogypsum, borogypsum, titanium gypsum, citrogypsum, etc.). As an analogue of these materials, synthetic gypsum was proposed, obtained as a target product from spent dilute sulfuric acid and calcium carbonate. The sizes of crystals of calcium sulfate dihydrate at optimal sizes of technological parameters and holding time up to 4.5 hours increased from 18 to 28  $\mu\text{m}$  and at the same time joined into agglomerates with sizes, to a greater extent, lying in the range from 200 to 600  $\mu\text{m}$ , as well as acquired a prismatic shape instead of a needle, which simplified and accelerated the industrial filtration process. Our research shows that a promising analogue for countries that have problems with gypsum-containing raw materials is synthetic gypsum, obtained by interacting with a suspension of calcium carbonate and sulfuric acid, including waste.*

**Keywords:** spent sulfuric acid; chalk; calcium sulfate dihydrate.

УДК 666.942.3:666.9.035

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ НАНОДОБАВОК  
НА СВОЙСТВА БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИХ БЕТОНОВ***канд. техн. наук, доц. О.Т. МАЗУРАК, канд. техн. наук, доц. А.В. МАЗУРАК  
(Львовский национальный аграрный университет)**канд. техн. наук, доц. Н.Е. ЖУРАВСКАЯ  
(Киевский национальный университет строительства и архитектуры)  
e-mail: nzhur@ua.fm**д-р техн. наук, доц. У.Д. МАНУЩАК  
(Национальный университет «Львовская политехника»)*

*Показано, что одним из инновационных направлений получения быстротвердеющих бетонов является применение технологических приемов модифицирования их структуры путем введения нанодисперсных добавок (наночастицы гидросиликатов кальция в сочетании с поликарбоксилатным суперпластификатором). Разработаны эффективные составы быстротвердеющих бетонов, модифицированных комплексной нанодобавкой с различным расходом портландцемента. Установлено, что введение комплексного наномодификатора обеспечивает получение высокоподвижных стабильных бетонных смесей марки подвижности P5 при обеспечении водоредуцирующего эффекта  $\Delta B/C = 42,6...49,1\%$ . При исследовании кинетики твердения бетонов, модифицированных нанодобавками, установлено, что они характеризуются интенсивным набором ранней прочности ( $f_{ct2} / f_{ct28} = 0,63...0,72$ ), а за показателем проектной прочности относятся к высокопрочным (C50/60–C55/67). Механизм обеспечения повышенной прочности быстротвердеющих бетонов, модифицированных нанодобавками, достигается уплотнением междузернового пространства цементной матрицы за счет высокого водоредуцирующего и дефлокуляционного эффектов добавки поликарбоксилатов, а также внедрения дополнительных центров кристаллизации в поровом пространстве при введении наночастиц гидросиликатов кальция. Использование нанодобавок комплексного действия повышает эффективность использования модифицированного портландцемента в бетонах от 4,1... 4,8 кг/МПа.*

**Ключевые слова:** *быстротвердеющий бетон, нанодобавки, поликарбоксилатный суперпластификатор, ускоритель твердения, подвижность, ранняя прочность.*

**Введение.** В практике современного строительного производства наблюдается тенденция постоянного возрастания интереса и необходимости в передовых строительных материалах, как для возведения новых высококачественных зданий и сооружений, так и для ремонта и повышения эффективности существующей инфраструктуры. Такие материалы должны характеризоваться высокой функциональностью, доступностью, долговечностью, быть экономически эффективными в структуре жизненного цикла строительных объектов. Кроме того, интенсивные способы сооружения зданий предъявляют повышенные требования к критерию скорости выполнения процесса к заданным срокам распалубки, ввода конструкции или сооружения в эксплуатацию за снижение материалоемкости, уменьшение энергетических и трудовых затрат [1]. Обязательным условием скоростной технологии является применение высокотехнологичных быстротвердеющих бетонов с обеспечением высоких показателей их эксплуатационной надежности.

Современные технологии бетонов основаны на применении химических модификаторов различных видов и механизмов воздействия, что позволяет регулировать свойства композитов соответственно с назначением и условиями эксплуатации. Для повышения подвижности, прочности бетона, снижение трудоемкости бетонных работ используют суперпластификаторы. Среди основных недостатков пластифицирующих добавок – длительный эффект пластификации, что может негативно влиять на набор ранней прочности бетонов, приготовленных из высокоподвижных смесей [2]. Нанотехнологии – инновационный подход в строительном производстве для создания бетонов с регламентированными свойствами, основанный на применении потенциала частиц нанометрического масштаба и заключается в возникновении качественных изменений физико-химических показателей и реакционной способности системы, обеспечении создания условий для проявления эффекта самоорганизации структуры [2–4].

Уникальная технология ускорителя твердения X-SEED (Crystal Speed Hardening concept) базируется на введении синтетически полученных наночастиц CSH-кристаллов, которые являются готовыми центрами кристаллизации гидросиликатов и обеспечивают их рост без энергетического барьера в пространстве между цементными зёрнами [5]. Модификационные эффекты и механизмы влияния введенных наноматериалов, особенности гидратации и свойства цементных систем заключаются в реализации эффектов посева центров кристаллизации, возрастании химической активности, и как результат – ускорение гидратации и набор ранней прочности портландцементов [2; 6].

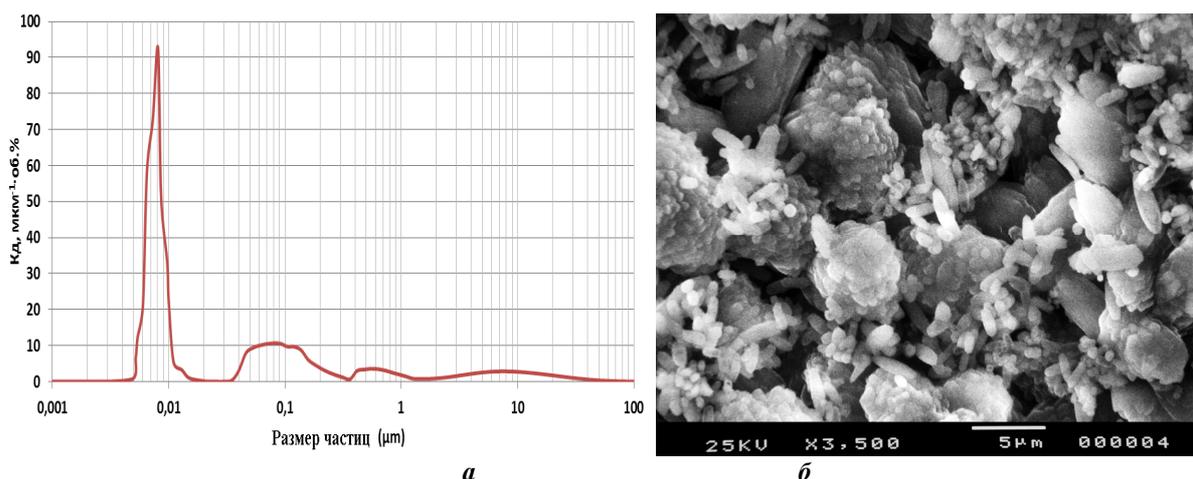
Одним из широко применяемых приемов нанотехнологии в производстве высококачественных бетонов является использование эффективных суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов (PC) [7]. В последние годы разработаны высокоэффективные суперпластификаторы нового поколения группы «Glenium» с наноспроектированными молекулярными цепочками для высокого водоредуцирования и длительного сохранения подвижности бетонной смеси [8; 9].

Обобщение результатов исследований в области технологии монолитного бетонирования свидетельствует, что решение проблемы разработки высокотехнологичных быстротвердеющих строительных композитов для обеспечения быстрого ввода объектов в эксплуатацию и их надежной эксплуатации в течение всего жизненного цикла в значительной мере достигают за счёт модифицирования комплексными нанокompозитами – материалами из минеральной и полимерной составляющих, объединенных на наноразмерном уровне. Задача исследования – изучение эффективности влияния комплексного наномодификатора на основе PC-суперпластификатора и инновационного ускорителя твердения на реологические свойства и кинетику твердения бетонов.

**Основная часть.** Запроектированы тяжелые бетоны марки по легкоукладываемости бетонной смеси P5 на основе портландцемента ПЦ I - 500 P с расходом вяжущего 350 и 430 кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси. Для обеспечения высоких показателей подвижности и скорости твердения модифицировали комплексным наномодификатором (НМ), содержащим поликарбоксилатный суперпластификатор MasterGlenium ACE 430 (PC) и ускоритель твердения Master X-SEED (суспензия частиц гидросиликатов кальция наноразмерного диапазона). Проведено моделирование рецептурных решений наномодифицированных портландцементных композиций, которые характеризуются прерывистым гранулометрическим составом по S-типу распределения частиц по размерам. Как показано на рисунке 1, а, именно небольшая доля частиц нанометрического масштаба определяет избыточную поверхностную энергию портландцементной композиции.

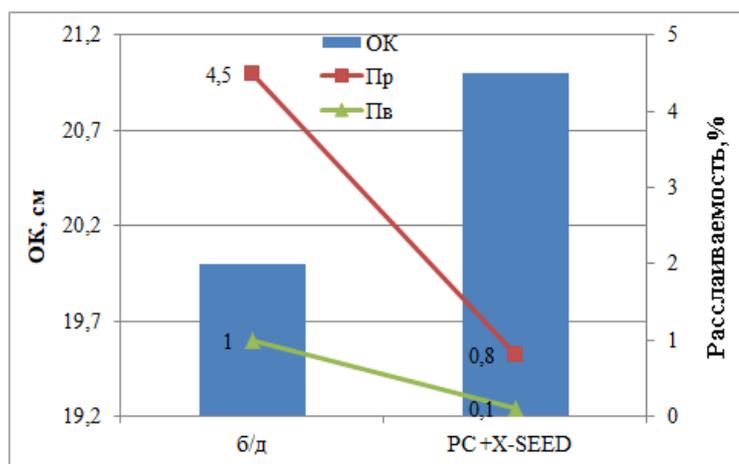
Современные исследования позволили рассматривать бетон с точки зрения наноразмерного уровня как материал, характеризующийся сложной гетеромасштабной структурой гидратированных цементных фаз, минеральных добавок. Свойства бетона определяются видом, размером и характером взаимодействия компонентов каждого структурного уровня, создает возможность нанотехнологического регулирования процессов структурообразования и контроля эксплуатационных характеристик [1; 9; 10]. Нанотехнологии охватывают область науки и технологии, касающуюся элементов меньше 100 нм, в строительстве она расширяется до 200 нм и сопутствующих нановзаимодействий [4; 8; 12].

Основной задачей модифицирования нанодобавками является обеспечение управляемого структурообразования с большим количеством наноразмерных продуктов гидратации. Значительное количество поверхностных атомов в наночастицах, которые определяются избытком поверхностной энергии, влияет на увеличение активности реакционной способности материала и определяет его объемные свойства, при этом существенно возрастает роль межфазной поверхности [2; 8]. Введение наночастиц может существенно изменять физико-химические взаимодействия в цементирующей матрице, играя роль катализаторов или центров кристаллизации в зависимости от химического состава поверхности и концентрации (рисунок 1, б).

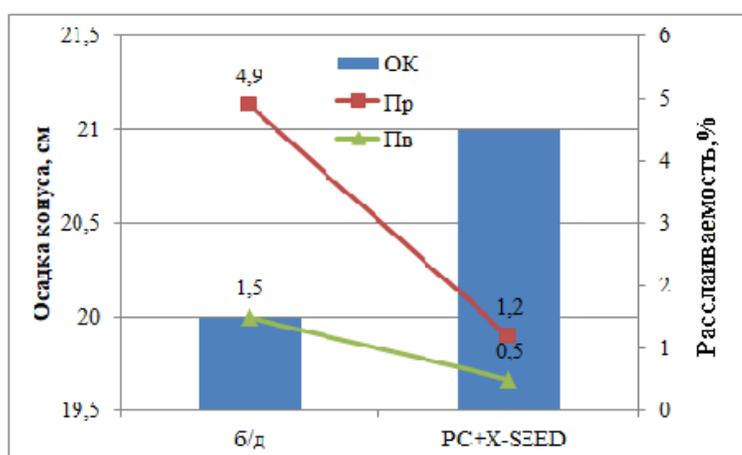


**Рисунок 1.** – Дифференциальный коэффициент поверхностной активности (а) и микроструктура кристаллов модельной наномодифицированной портландцементной композиции (б)

Подвижность запроектированных бетонных смесей с расходом ПЦ I-500 P = 430 кг/м<sup>3</sup> соответствует марке P5 за В/Ц = 0,53. Использование наномодификатора дает возможность приготовить консистенцию равнодвижимых смесей по В/Ц = 0,27 с обеспечением водоредуцирующего эффекта ΔВ/Ц = 49,1% (рисунок 2, а). При уменьшении расхода вяжущего до 350 кг/м<sup>3</sup> заданную подвижность бетонных смесей достигают при водопотребности 0,35 с обеспечением водоредуцирующего эффекта ΔВ/Ц = 42,6% (рисунок 2, б).



а



б

а – с расходом портландцемента 350 кг; б – с расходом портландцемента 430 кг

Рисунок 2. – Свойства бетонных смесей

Результаты определения показателей расслаиваемости контрольных высокоподвижных бетонных смесей показали превышение значений, установленных нормативными документами, и несоответствие требованиям стандарта ДСТУ БВ 2.7-96-2000. Следует отметить, что при использовании наномодификатора PC + X-SEED за счет существенного водоредуцирующего эффекта и высокой водоудерживающей способности наночастиц обеспечиваются показатели однородности бетонных смесей, отвечающих требованиям стандарта – водоотделение  $P_v = 0,1...0,5\%$  и раствооротделение  $P_r = 0,8...1,2\%$ . При этом средняя плотность наномодифицированных бетонных смесей составляет  $2420...2430 \text{ кг/м}^3$ , что определяется оптимальной упаковкой частиц.

Испытания модифицированного нанодобавками бетона номинального состава 1:1,37:2,79 (расход вяжущего  $430 \text{ кг/м}^3$ ) с высокоподвижными смесями показали, что прочность на сжатие через 1 и 2 суток составляет 50,3 и 66,7 МПа, соответственно (рисунок 3, а).

Значение прочности быстротвердеющего модифицированного нанодобавками бетона через 28 суток ( $f_{cm28} = 92,4 \text{ МПа}$ ) соответствуют требованиям класса прочности С 55/67, при этом показатель удельной прочности составляет  $f_{cm2} / f_{cm28} = 0,72$ . По этим показателям наномодифицированный бетон относится к высокопрочным с быстрым нарастанием прочности. Повышение ранней и конечной прочности наномодифицированных бетонов происходит за счет высокого водоредуцирующего эффекта поликарбоксилатного суперпластификатора, введения дополнительных центров кристаллизации, обеспечения равномерного распределения продуктов гидратации за счет уплотнения пространства между зернами [10; 11].

Определение прочностных показателей бетона (расход вяжущего  $350 \text{ кг/м}^3$ ), модифицированного нанодобавками PC + X-SEED, показало, что через сутки твердения прочность возрастает в шесть раз по сравнению с бетоном на основе ПЦ I-500 и составляет 39,5 МПа (рисунок 3, б).

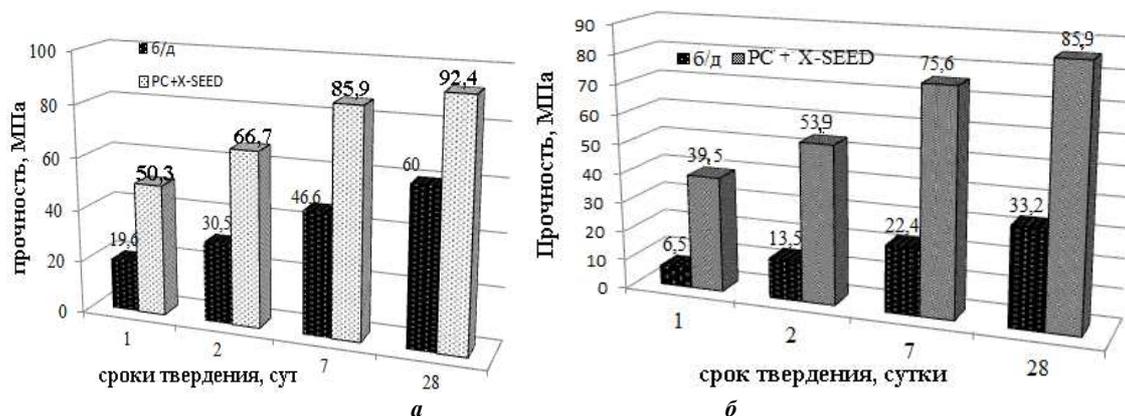


Рисунок 3. – Прочность бетонов с расходом вяжущего 430 кг/м<sup>3</sup> (а) и 350 кг/м<sup>3</sup> (б)

Через двое суток прочность наномодифицированного бетона возрастает до 53,9 МПа, что обеспечивает технический эффект  $\Delta R_{cm2} = 300\%$ . Показатели прочности быстротвердеющего наномодифицированного бетона через 28 суток ( $f_{cm28} = 85,9$  МПа) соответствуют требованиям класса С 50/60 с обеспечением высокой скорости набора прочности ( $f_{cm1} / f_{cm28} = 0,46$  и  $f_{cm2} / f_{cm28} = 0,63$ ), что позволяет классифицировать их как быстротвердеющие высокопрочные.

Уменьшение количества портландцемента на 22% (430...350 кг/м<sup>3</sup>) в составе модифицированного бетона с нанодобавками вызывает снижение ранней прочности через сутки на 21,7%, однако через 28 суток спад прочности незначительный, что показывает эффективность использования комплексного модификатора на основе нанодобавок.

Согласно оценке критерия экономической эффективности быстротвердеющих бетонов, модифицированных нанодобавкой PC + X-SEED комплексного действия, по показателю удельного расхода вяжущего на единицу проектной прочности модифицирование бетонов нанодобавками приводит к повышению показателя эффективности использования портландцемента до 4,1...4,7 кг/МПа по сравнению с 7,2...10,5 кг/МПа для бетонов контрольного состава.

**Заключение.** Модифицирование комплексным модификатором на основе нанодобавок в бетоне позволяет снизить водопотребление до 40% при сохранении равноподвижности и обеспечения показателей стабильности бетонной смеси. Запроектированные модифицированные бетоны с нанодобавками характеризуются быстрым нарастанием прочности ( $f_{cm2} / f_{cm28} = 0,63 - 0,72$ ), высокой прочностью в проектном возрасте и ростом технико-экономических показателей от 4,1...4,8 кг/МПа.

Широкое внедрение модифицированных нанодобавками быстротвердеющих бетонов в современных технологиях и строительных материалах обеспечит повышение эффективности возведения монолитных конструкций, что обусловлено минимизацией времени распалубочной прочности, ускорением процесса твердения в различных температурных режимах, а также более качественным проведением ремонтных и восстановительных работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dni betonu : tradycja i nowoczesność [Electronic resource] : konferencja, Wisła, 11–13 października 2010 / Red. P. Kijowski, J. Deja. – Kraków, 2010. – Mode of access: <https://docplayer.pl/33181602-Dni-betonu-tradycja-i-nowoczesnosc-konferencja-wisla-pazdziernika-2010-red-piotr-kijowski-jan-deja-krakow-cop.html>. – Date of access: 15.10.2020.
2. Ashani, H.R. Role of Nanotechnology in Concrete a Cement Based Material: A Critical Review on Mechanical Properties and Environmental Impact / H. R. Ashani, S. P. Parikh, J. H. Markna // International Journal of Nanoscience and Nanoengineering. –2015. – № 2 (5). – P. 32–35.
3. Фаликман, В. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах / В. Фаликман // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 1. – С. 31–34.
4. Шейнич, Л.А., Процессы самоорганизации структуры строительных композитов / Л.А. Шейнич, Е.К. Пушкарева. – Київ: Гамма-принт, 2009. – 153 с.
5. Diamond, S. Densified silica fume: particle size and dispersion in concrete / S. Diamond // Materials and Structures. – 2006. – Vol. 39, – № 9. – P. 849–859.
6. Di Luzio, G. Gianluca Cusatis Solidification–microprestress–microplane (SMM) theory for concrete at early age: Theory, validation and application / G. Di Luzio // International Journal of Solids and Structures. – 2013 – № 50. – P. 957–975.

7. Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete / J. Plank [et al.] // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2009. – № 1. – P. 5–12.
8. Peculiarities of nanomodified portland systems structure formation / U. Marushchak [et al.] // Journal of Chemistry & Chemical Technology. – 2019. – Vol. 13. – №. 4 – P. 510–517.
9. Nehdi, M. Early-age properties of concrete: overview of fundamental concepts and state-of-the-art research / M. Nehdi, A. M. Soliman // Construction Materials. – 2011. – № 164. – P. 57–77.
10. Hajok, D. Gdyliczysięjakość i szybkośćwiązania / D. Hajok // Polskicement. Budownictwo, technologie, architektura. – 2011. – № 3 (55). – S. 42–43.
11. Research of nanomodified Portland cement compositions withhighearly age strength / U. Marushchak [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 6/6. – P. 50–57.
12. Zhuravska, N. Protection of building materials against biodeterioration using energy saving nanotechnology / N. Zhuravska // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2014. – Vol. 13, № 8. – P. 145–152.

Поступила 10.12.2020

### FEATURE OF NANO-ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF RAPID HARDENING CONCRETES

**O. MAZURAK, A. MAZURAK, N. ZHURAVSKA, U. MARUSHCHAK**

*It is demonstrated that the application of processing methods for the modification of their structures is one of the most innovative ways of the fast hardening concrete obtainment. It is determined that the exploitation of a complex nanomodifier on the basis of polycarboxylate superplasticizer and an innovatory hardening accelerator based on calcium silicate hydrate colloidal particles guarantees the high flowability and durability of fresh concretes. Flow characteristics of nanomodified fresh concrete determined by slump test is 210 mm with the providance of a water-reducing effect  $\Delta W/C=42.6...49.1\%$ . The stability indices (water and mortar liberation) of concrete mixtures, modified by complex nanoadmixture, are advanced compared to control concrete mixture. The concretes nanomodified by calcium silicate hydrate colloidal particles and polycarboxylate superplasticizer are featured with significant acceleration of the early strength kinetics. It is proved that nanomodified concrete can be distinguish by high early strength (specific strength  $(f_{cm2} / f_{cm28} = 0.63...0.72)$  and high strength after 28 days (85...92 MPa). The enhanced performance of fast hardening concretes is ensured by the filling up the empty space inside cementitious matrix, seeding effect whereby the C-S-H additive provides new nucleation sites within the pore space between the cement particles, high water reducing effect connected with an efficient dispersion effect of polycarboxylates. Designed nanomodified concretes are Rapid hardening high strength ones. The application of a complex nanomodifier enlarges the effectiveness of Portland cement usage in concrete (specific expenditure of Portland cement is 4.1...4.8 kg/MPa).*

**Keywords:** rapid hardening concrete, nanomodifiers, polycarboxylate superplasticizer, hardening accelerator, flowability, early strength.

УДК 303.725.33

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ КОРРЕКЦИИ ОШИБКОЙ (ЕСМ)  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

**А.С. МИЩЕНКО, канд. экон. наук, доц. В.А. АКУЛИЧ**  
(Белорусский государственный экономический университет, Минск)  
6482575@mail.ru; Akulich@macrocenter.by

*Приведен инструментарий в виде эконометрических моделей для прогнозирования экономического роста в строительной отрасли. Эмпирическим путем доказано наличие определяющего краткосрочного и долгосрочного влияния инвестиций в строительные-монтажные работы на валовую добавленную стоимость в строительстве. С помощью процедуры Энга – Грейнджера было установлено наличие коинтеграции между строительными-монтажными работами и валовой добавленной стоимостью в строительстве Беларуси. Это делает возможным применение модели коррекции ошибкой для прогнозирования экономического роста в строительной отрасли Беларуси.*

**Ключевые слова:** валовая добавленная стоимость (ВДС); строительные-монтажные работы (СМР); строительная отрасль; прогнозирование; ЕСМ-модель; коинтеграционный анализ.

**Введение.** Представители бизнеса предъявляют высокий спрос на прогнозы в строительной отрасли. Чтобы удовлетворить этот спрос международные консалтинговые компании (GlobalData Plc, KPMG, McKinsey & Company, и др.) выпускают обзоры, которые содержат прогнозы развития отрасли. Как правило, эти прогнозы выходят ежеквартально с временным горизонтом от трех до пяти лет. Они касаются как темпов роста мировой строительной индустрии, так и темпов роста в отдельных регионах и странах.

Так, до пандемии аналитики GlobalData предсказывали ускорение темпов роста мировой строительной индустрии с 2,6% в 2019 году до 3,1% в 2020 году. Однако после вспышки COVID-19 прогноз роста в 2020 году был понижен до 0,5% [3]. На этом уровне он был сохранен и на 2021 год. Аналитики McKinsey прогнозируют в ближайшие годы наиболее высокие темпы роста строительной отрасли в Китае, затем в странах АСЕАН (в частности в Индонезии и Малайзии), в развитых странах Азии (Японии, Сингапуре, Австралии), затем в Северной Америке, и наконец, в Европе, особенно выделяя страны Восточной Европы [8, с. 39]. При прогнозировании роста в строительстве аналитики McKinsey учитывают динамику инвестиций, ВВП, численности населения, урбанизации, изношенности транспортной и энергетической инфраструктуры, зданий, господдержки развития инфраструктуры, развития государственно-частного партнерства [8, с. 40]. Ряд эконометрических моделей на данных нескольких стран (Турции, Тайваня, Китая, Сингапура, Кореи, Кабо-Верде, Пакистана, Индии, Шри-Ланки) показывают наличие взаимосвязи между инвестициями в строительство и ростом ВВП. «Инвестиции в строительство очень быстро влияют на рост ВВП, однако рост строительной отрасли в вялой экономике сжимается больше, чем ВВП» [1, с. 19].

Согласно опросу, проведенному компанией KPMG Global среди 20% строительных организаций, которые являются лидерами в области инноваций, 83% руководителей считают, что в ближайшие 5 лет принятие управленческих решений будет происходить на основе данных, включая использование аналитики данных и прогнозного моделирования для планирования и мониторинга проектов [4, с. 36].

Помимо консалтинговых компаний прогнозами развития строительной отрасли занимаются отраслевые ассоциации. Эти прогнозы, как правило, посвящены отдельным странам и являются более детальными. Характерным примером такого прогноза служит трехлетний прогноз Ассоциации строительных товаров в Великобритании [2]. В нем приведены прогнозные значения не только в процентах, но и в денежных единицах, в том числе по каждому подсектору – строительству логистических центров, реконструкции автомобильных и железных дорог, портов, систем водо- и электроснабжения, производству стройматериалов [2, с. 47].

Для прогнозирования роста в строительной отрасли конкретной страны часто используются регрессионные модели временных рядов – от самых простых в виде одного уравнения (OLS, ARDL, ARIMA, ЕСМ, и др.) до более сложных в виде системы уравнений (VAR, VECM, VARMA, BVAR, SVAR, и др.). Согласно кибернетическому закону необходимого разнообразия (закон Р. Эшби), чем больше обстоятельств учитывает модель (число предикторов, многосторонние взаимные связи, временные лаги, сдвиги, инерцию, кратко- и долгосрочные связи, коинтеграцию, и т.п.), тем более точный прогноз она способна давать. Например, векторная авторегрессионная модель с коррекцией ошибками (VECM) при наличии одного или нескольких коинтеграционных соотношений будет давать более точные прогнозы по сравнению со стандартной векторной авторегрессионной моделью (VAR). В этом можно убедиться на примере прогнозирования курса акций [7].

Чтобы избежать получения ложной регрессии при построении большинства эконометрических моделей используются стационарные данные. Неслучайные компоненты (тренд, сезонность, цикл) изымаются из данных. Изъятие трендов во временных рядах может производиться одним из двух основных способов – переходом в разницы или в разрывы. В любом случае, их изъятие приводит к негативному «побочному» эффекту – модель перестает учитывать долгосрочную связь между переменными. В 1981 г. К. Грейнджер предложил решение этой проблемы. Он математически доказал, что лагированная разность двух переменных (зависимой и независимой) служит ценным предиктором для объяснения поведения зависимой переменной, при условии, если их линейная комбинация является стационарной. Поскольку ошибка оценки (или остаток) регрессионного уравнения как раз и представляет собой разность между переменными (1), то она (ошибка с одним временным лагом) и включается в модель в качестве дополнительного предиктора (2).

$$y_t = c + \Theta x_t + \varepsilon_t \iff \varepsilon_t = y_t - c - \Theta x_t \quad (1)$$

$$\Delta y_t = \delta + \beta \Delta x_t + \gamma \varepsilon_{t-1} \text{ или } \Delta y_t = \delta + \beta \Delta x_t + \gamma (y_{t-1} - c - \Theta x_{t-1}) + \mu_t \quad (2)$$

где  $y_t$  – зависимая переменная;  
 $x_t$  – предиктор (независимая переменная);  
 $\Delta y_t$  – зависимая переменная в разностях 1-го порядка;  
 $\Delta x_t$  – предиктор в разностях 1-го порядка;  
 $c, \delta$  – константы;  
 $\Theta, \beta$  – коэффициенты регрессии;  
 $\gamma$  – коэффициент коинтеграции;  
 $\varepsilon_t, \mu_t$  – ошибки (остатки) регрессионных уравнений.

Отсюда и название – модель коррекции ошибкой (Error Correction Model) или ЕСМ-модель. Описанная в уравнениях (1) и (2) последовательность ее построения получила название процедуры Энгла – Грейнджера. Эта процедура относится к области коинтеграционного анализа.

Таким образом, если остаток парной регрессии, построенной на нестационарных временных рядах, является стационарным, то эти две переменные коинтегрированы между собой. В таком случае, связь между ними можно представить в виде ЕСМ-модели. Наличие коинтеграции означает, что несмотря на случайный (слабо предсказуемый) характер изменения переменных, существует долгосрочная связь между ними. Модель ЕСМ (в отличие от OLS) позволяет корректировать краткосрочные изменения с учетом их отклонения от долгосрочной связи. Коэффициент коинтеграции (в отличие от коэффициента регрессии) может принимать как отрицательные, так и положительные значения, и показывает отклонение поведения зависимой переменной от ее долгосрочного значения (равновесия). Модель ЕСМ использовалась в ряде стран для прогнозирования отдельных показателей развития строительной отрасли. Например, с помощью этой модели прогнозировался спрос на строительство в Австралии [5, с. 969], а также индекс цен в строительной отрасли Китая [6, с. 3].

Одной из задач данного исследования было построить эконометрическую модель для прогнозирования экономического роста в строительной отрасли Беларуси. В качестве рабочей гипотезы было выбрано предположение о наличии коинтеграционного соотношения между валовой добавленной стоимостью в строительстве и инвестициями в строительные-монтажные работы, что позволило бы построить ЕСМ-модель.

**Основная часть.** Основным показателем, который характеризует экономический рост в строительной отрасли, является показатель «валовая добавленная стоимость» (ВДС или англ. GVA).

Как известно из экономической теории, основными факторами экономического роста являются объем инвестиций в основной капитал, численность занятых и совокупная факторная производительность. В строительной отрасли основные инвестиции – это инвестиции в строительные-монтажные работы (СМР или англ. SMR). В качестве независимой переменной при построении регрессионной модели будем использовать показатель «объем инвестиций в строительные-монтажные работы в Республике Беларусь», в качестве зависимой переменной – «объем ВДС в строительстве в Беларуси».

Были использованы ежемесячные данные (с января 2014 г. по июнь 2020 г.). В сборниках Белстата данные приведены нарастающим итогом в текущих ценах. При подготовке к проведению эконометрического анализа они были представлены в уровнях в постоянных ценах (в ценах января 2014 г.). При дефлировании временных рядов (Вр.р.) был использован индекс цен в строительстве (таблица 1).

Чтобы избежать получения ложной регрессии необходимо работать со стационарными (данные, которые имеют нулевой порядок интегрированности) или условно стационарными данными (данные, которые имеют первый или второй порядок интегрированности). Для этого, в случае наличия в данных сезонной и трендовой (детерминированной и/или стохастической) компонент, необходимо их изъять.

Таблица 1. – Обозначения переменных

Обозначение	Название показателя	Тип Вр.р.
RGVA	Реальная ВДС в строительстве, в постоянных ценах (в ценах января 2014 г.), в млн BYN	I(0)
RSMR	Реальный объем инвестиций в СМР, в постоянных ценах (в ценах января 2014 г.), в млн BYN	I(0)
RGVA_s.a.	Реальная ВДС в строительстве, скорректированная на сезонность, в ценах января 2014 г., в млн BYN	I(0)
RSMR_s.a.	Реальный объем инвестиций в СМР в Беларуси, скорректированный на сезонность, в ценах января 2014 г., в млн BYN	I(0)
Ln_RGVA_s.a.	Логарифмы реальной ВДС в строительстве, скорректированные на сезонность	I(0)
Ln_RSMR_s.a.	Логарифмы реальных объемов инвестиций в СМР, скорректированные на сезонность	I(0)
DLn_RGVA_s.a.	Разницы 1-го порядка логарифмов реальной ВДС в строительстве, скорректированные на сезонность	I(1)
DLn_RSMR_s.a.	Разницы 1-го порядка логарифмов реальных объемов инвестиций в СМР, скорректированные на сезонность	I(1)

Примечание – I(0) – данные, которые имеют нулевой порядок интегрированности; I(1) – данные первого порядка интегрированности.

Все шесть тестов, выполненные в среде JDemetra, показали наличие сезонных составляющих в обоих временных рядах (таблица 2). В частности, Р-значения = 0.00 означают, что на 1%-м уровне значимости можно отвергнуть нулевую гипотезу (о том, что «сезонность отсутствует») и принять единичную гипотезу о том, что «сезонность присутствует».

Таблица 2. – Результаты тестирования на сезонность

Название теста	ВДС в строительстве		Инвестиции в СМР	
	Наличие сезонности	Р-значение	Наличие сезонности	Р-значение
1. Сезонная автокорреляция	да	0.0000	да	0.0000
2. Непараметрический тест Фризмана	да	0.0001	да	0.0000
3. Непараметрический тест Краскела – Уолиса	да	0.0000	да	0.0000
4. Спектральные пики авторегрессионного спектра	да	0.0000	да	0.0000
5. Спектральные пики периодограммы	да	0.0000	да	0.0000
6. Детерминированная сезонность	да	0.0000	да	0.0000

На рисунках 1 и 2 представлены выделенные в среде JDemetra с помощью модели TRAMO-SEATS ARIMA сезонные компоненты из Вр.р. показателей ВДС и СМР.

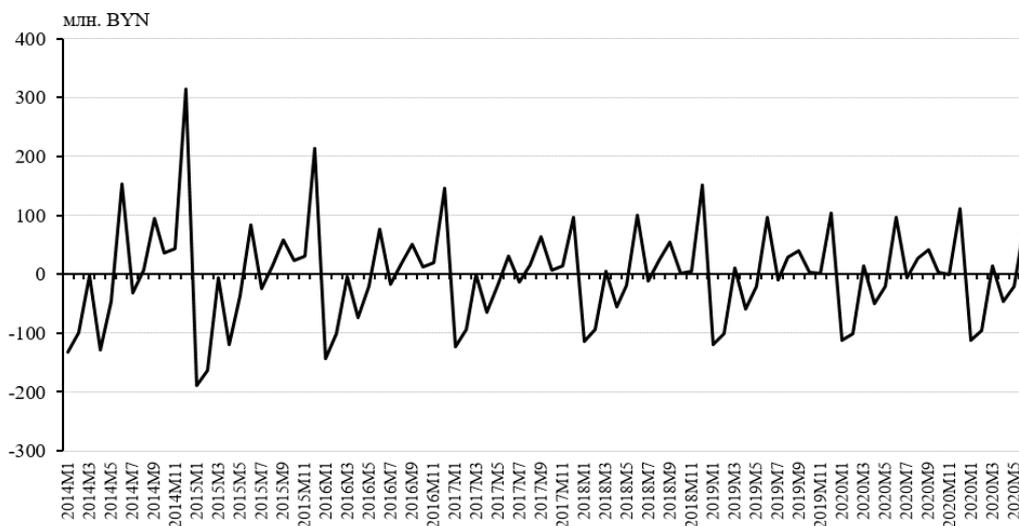


Рисунок 1. – Сезонная компонента реальной валовой добавленной стоимости в строительстве, млн BYN

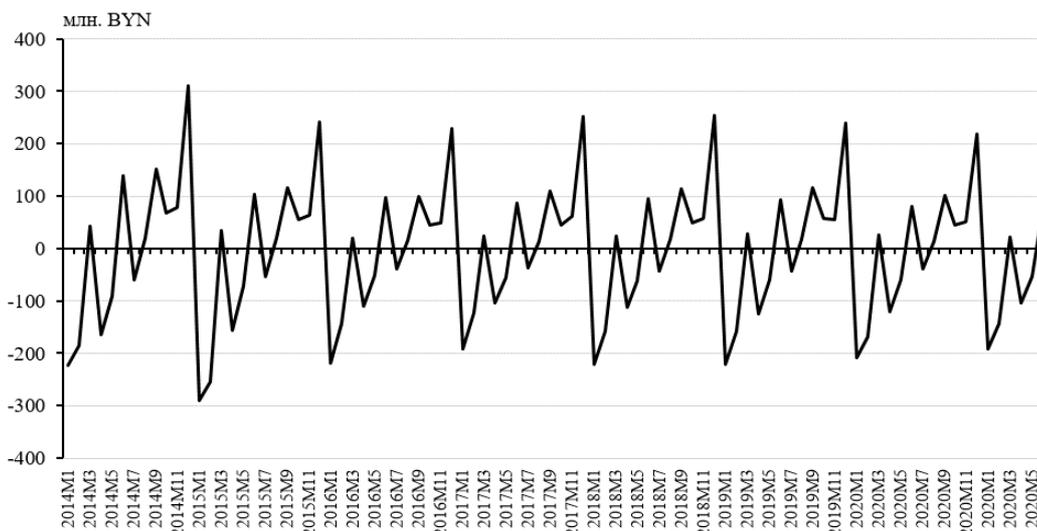


Рисунок 2. – Сезонная компонента реальных инвестиций в строительно-монтажные работы, млн BYN

Значения Вр.р. обоих показателей были скорректированы на сезонность и прологарифмированы. Во-первых, логарифмирование данных позволит получить коэффициенты регрессии в безразмерных величинах, что упростит их интерпретацию во время анализа. Во-вторых, логарифмирование – это процесс линеаризации. Поскольку для оценивания параметров модели используется метод линейного МНК, то в случае нелинейности процессов логарифмирование данных в ряде случаев позволяет улучшить условия для его использования.

Результаты расширенного теста Дикки – Фуллера (ADF) показали, что данные в уровнях по обоим Вр.р. имеют единичные корни и являются нестационарными. Поэтому был осуществлен перевод логарифмов в разницы первого порядка. Так как результаты тестов показали, что среднее арифметическое обоих Вр.р. равно нулю, то была использована спецификация теста ADF без константы. В таблице 3 представлены результаты тестирования обоих Вр.р. на стационарность.

Таблица 3. – Результаты тестирования временных рядов на стационарность с помощью расширенного теста Дикки – Фуллера (ADF).

Переменные	Спецификация	Длина лага	t-ADF статистика	Критические значения	P-значение
DLn_RGVA_s.a.	N	2	-8.31	-2.59	0.0000
DLn_SMR_s.a.	N	2	-12.88	-2.59	0.0000

*Примечание.* – N – спецификация теста ADF без константы и тренда. Критические значения t-ADF статистики приведены для 1%-го уровня значимости.

Как видно из таблицы 3, полученные значения коэффициентов по модулю больше критических значений. Кроме того, P-значения = 0.00, а это значит, что с вероятностью 0% верна нулевая гипотеза о наличии единичного корня, и с вероятностью 100% верна единичная гипотеза об отсутствии единичного корня, что означает стационарность данных. Причем все Вр.р. условно стационарны (разностно-стационарны) на 1%-м уровне значимости (P-факт < 0.01). Другими словами, мы имеем для работы данные, которые имеют не нулевой, а первый порядок интегрированности – I (1) (см. таблицу 1).

На этих данных можно анализировать наличие или отсутствие связи между переменными. По сути, из исходных данных исключены сезонная и трендовая компоненты. В обоих рядах после их преобразования остались только случайные компоненты. Если в динамике этих компонент есть схожие моменты, то значит можно с научной строгостью утверждать, что между этими показателями имеется связь.

Рассчитаем коэффициенты парной корреляции Пирсона (таблица 4).

Таблица 4. – Значения коэффициентов парной корреляции

	DLn_RSMR_s.a.	RSMR
DLn_RGVA_s.a.	0.352	–
RGVA	–	0.878

Значение коэффициента парной корреляции, рассчитанного на нестационарных данных, которые включают сезонные и трендовые составляющие, равно 0.878, что показывает наличие сильной связи. Но эта связь может быть ложной. Чтобы точно подтвердить наличие связи был рассчитан коэффициент парной корреляции на стационарных данных. Значение коэффициента парной корреляции, рассчитанного на данных, из которых исключены сезонные и трендовые составляющие, оказалось равным 0.352, что подтверждает наличие связи. Для связи между случайными компонентами это сравнительно высокое значение коэффициента.

Коэффициент парной корреляции показывает наличие или отсутствие связи между переменными, но не показывает направленность этой связи. Связь может быть как односторонней, так и двухсторонней. Определить направленность связи помогает регрессионный анализ.

В июне 2017 г. по реальной ВДС (RGVA) имеется значение, которое выбивается из ряда других значений и является всплеском. На таких коротких рядах (78 значений) один всплеск может существенно повлиять на результаты регрессионной модели. Поскольку мы работаем с разностями (приростами), а не с уровнями, то данный всплеск затрагивает два значения. Поэтому были введены две фиктивные переменные. Одну фиктивную переменную вводить нельзя, потому что у этих фиктивных переменных будут разные знаки коэффициентов регрессии.

Как следует из оценок параметров, полученных методом наименьших квадратов (МНК или OLS), регрессионная модель имеет вид:

$$DLn\_RGVA\_s.a. = 0.83 * DLn\_RSMR\_s.a - 1.11 * D1 + 1.01 * D2 \quad (3)$$

$$\text{Prob.} \quad (0.0000) \quad (0.0000) \quad (0.0000)$$

$$R^2 = 0.748 \quad DW = 2.92$$

Свободный член отсутствует в итоговом уравнении (при стационарных данных в нем нет необходимости, он незначим). Уравнение (3) характеризует влияние инвестиций в СМР на ВДС в строительстве. Значение скорректированного коэффициента детерминации ( $R^2$ ) показывает, что инвестиции в СМР на 74,8% определяют вариации ВДС, а на 25,2% вариации ВДС объясняются другими факторами. При увеличении объема инвестиций на одну условную единицу, показатель ВДС увеличится на 0.83 условной единицы.

Результаты тестов на гетероскедастичность (тест Уайта, тест Бреуша – Пагана – Годфрея) показывают, что она отсутствует. Результат теста Жака-Бера (JB-test) на нормальное распределение остатков модели показал, что остатки распределены нормально. Тест на равенство нулю среднего арифметического остатков модели также дал положительный результат. А вот результаты теста Льюнга – Бокса на автокорреляцию остатков модели не дали нужного результата. В качестве нулевой гипотезы в этом тесте заложено утверждение, что «автокорреляция отсутствует». По каждому из десяти исследуемых лагов по обеим трубкам Prob. < 0.05 (рисунок 3), и соответственно на 5%-м уровне значимости нельзя принять эту гипотезу, и следует признать, что автокорреляция, – и в остатках модели (трубка MA), и в значениях зависимой переменной (трубка AR), – присутствует.

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	-0.478	-0.478	18.302	0.000
		2	-0.016	-0.317	18.323	0.000
		3	0.105	-0.082	19.229	0.000
		4	-0.008	0.022	19.234	0.001
		5	-0.004	0.056	19.235	0.002
		6	-0.134	-0.155	20.769	0.002
		7	0.122	-0.062	22.071	0.002
		8	0.031	0.058	22.157	0.005
		9	-0.131	-0.046	23.698	0.005
		10	0.018	-0.104	23.728	0.008

Рисунок 3. – Результаты теста Льюнга – Бокса на автокорреляцию остатков модели

Таким образом, только три из четырех предпосылок теоремы Гаусса – Маркова выполнены, и остатки модели нельзя в полной мере признать белым гауссовским шумом. Имеет место автокорреляция. Собственно, это можно было предположить еще ранее по полученному значению критерия Дарбина – Уотсона ( $DW = 2.92$ ), который выше критического значения. Наличие автокорреляции чревато тем, что это может исказить оценки параметров и коэффициент детерминации. Поэтому вместо метода классического МНК был применен обобщенный МНК (ОМНК). Как следует из оценок параметров, полученных методом ОМНК, регрессионная модель имеет вид (4):



$$\begin{aligned} \text{Ln\_RGVA\_s.a.} &= 1.20 * \text{Ln\_RSMR\_s.a.} - 0988 * D1 - 1.851 & (5) \\ \text{Prob.} & (0.0000) & (0.0000) & (0.0015) \\ F &= 139.9 & \text{Prob. (F-statistics)} &= 0.0000 \\ R^2 &= 0.785 & DW &= 0.87 \end{aligned}$$

Несмотря на то, что полученные коэффициенты регрессии значимы на 1%-м уровне, высока вероятность, что мы имеем дело с ложной регрессией. Признаком этого является слишком низкое значение коэффициента Дарбина – Уотсона ( $DW = 0.87$ ). Построение такой модели было нужно для того, чтобы получить ее остаток. Далее остаток, представленный в виде Вр.р., был протестирован на стационарность с помощью теста ADF. Предварительно данный Вр.р. был протестирован на равенство его среднего арифметического нулю. Поскольку среднее арифметическое с вероятностью 100% равно нулю, то в качестве основной была использована спецификация теста ADF без константы. При этом спецификация теста ADF с константой и трендом дала лучшие результаты (таблица 6).

Таблица 6. – Результаты тестирования временных рядов на стационарность

Переменные	Спецификация	Длина лага	t-ADF статистика	Критические значения	P-значение
Остаток модели (ε)	N	2	-2.78	-2.59	0.0059
Остаток модели (ε)	C,T	2	-6.18	-4.08	0.0000

*Примечание.* – N – спецификация теста ADF без константы и тренда; C,T – спецификация с константой и трендом. Критические значения приведены для 1%-го уровня значимости.

Результаты теста ADF показывают, что остаток модели имеет стационарный вид. Это означает, что между переменными ВДС и СМР имеет место коинтеграция, а значит можно применить коинтеграционный анализ, и проверить наличие между переменными долгосрочной связи. Для этого нужно выполнить второй этап процедуры Энгла – Грэйнджера – добавить в качестве регрессора в модель лагированное значение остатка ( $RES(-1)$ ). В итоге было получено уравнение модели коррекции ошибкой или ЕСМ (6):

$$\begin{aligned} D\text{Ln\_RGVA\_s.a.} &= 0.87 * D\text{Ln\_RSMR\_s.a.} - 0.41 * \text{RES}(-1) - 1.06 * D1 + 1.02 * D2 & (6) \\ \text{Prob.} & (0.0000) & (0.0000) & (0.0000) & (0.0000) \\ R^2 &= 0.799 & DW &= 2.36 \end{aligned}$$

Результаты тестов (таблица 7, рисунок 5) показывают, что остаток модели является белым гауссовским шумом. Значит модель надежна, и ее результатам можно доверять.

Таблица 7. – Проверка остатка модели (6) на соответствие критериям теоремы Гаусса – Маркова

Тест Уайта		Тест Бреуша-Пагана-Годфрея		Тест Жака-Бера (JB-test)		Тест (mean = 0.00)	
F-stat.	Prob. F(5,70)	F-stat.	Prob. F(5,70)	Prob.		t-stat.	Prob.
0.259	0.933	0.215	0.929	0.26		0.101	0.919

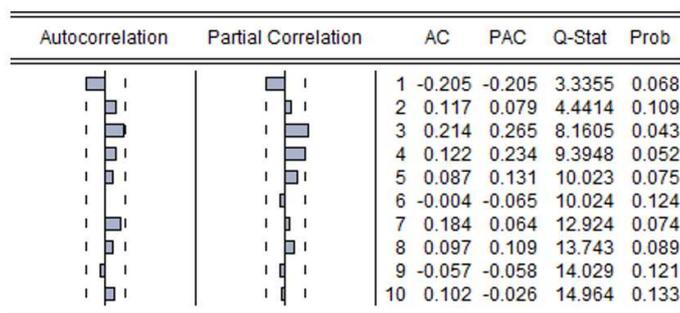


Рисунок 5. – Результаты теста Льюнга – Бокса на автокорреляцию остатков модели

В отличие от модели (4), модель (6) имеет большее разнообразие. Модель (6) представляет собой модель коррекции ошибкой (ЕСМ-модель). Она, как и предыдущая модель, построена на стационарных данных, но с добавлением регрессора ( $RES(-1)$ ), который отображает долгосрочную связь. Коэффициент при данной независимой переменной ( $= -0.41$ ) является коэффициентом коинтеграции. Отрицательный знак этого коэффициента означает, что в последние месяцы наблюдается инвестирование в СМР ниже своего долгосрочного равновесного уровня.

Фактические и предсказанные значения ВДС в строительстве, а также остатки модели представлены на рисунке 6.

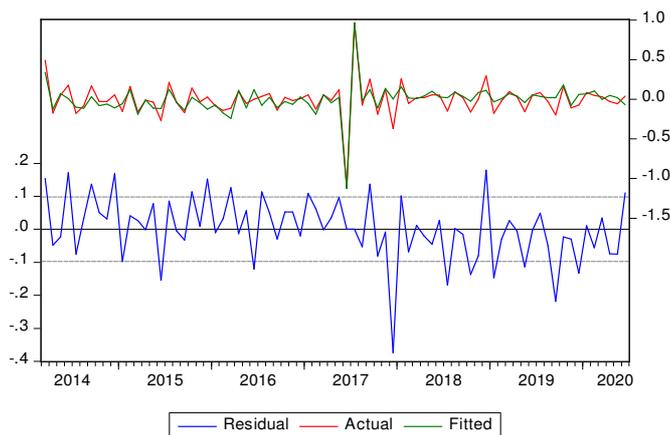


Рисунок 6. – Фактические и предсказанные значения валовой добавленной стоимости в строительстве

**Заключение.** Таким образом, построенная ЕСМ-модель (6) доказывает наличие краткосрочного и долгосрочного влияния инвестиций в СМР на ВДС в строительстве. Значение  $R^2$  показывает, что инвестиции в СМР на 79,9% определяют вариации ВДС, а на 21,1% вариации ВДС объясняются другими факторами. При увеличении объема инвестиций на одну условную единицу, показатель ВДС увеличится на 0.87 условной единицы. Поскольку объем инвестиций в СМР так существенно влияет на ВДС в строительстве, то он может служить хорошей объясняющей переменной для прогнозирования показателя ВДС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Berk, N. Causality between the Construction Sector and GDP Growth in Emerging Countries: The Case of Turkey / N. Berk, S. Biçen // Athens Journal of Mediterranean Studies. – 2017. Vol. 4, Issue 1. – P. 19–36.
2. Construction Industry Forecasts 2018-2020. – London : Construction Products Association, 2018. – 52 p.
3. Global Construction Outlook to 2024 (including Covid-19 Impact Analysis). – London : GlobalData Plc, 2020. – 92 p.
4. Global Construction Survey. Future-Ready Index: Leaders and followers in the engineering & construction industry. – Amstelveen : KPMG Global, 2019. – 44 p.
5. Jiang, H. Forecasting construction demand: A vector error correction model with dummy variables / H. Jiang, C. Liu // Construction Management and Economics. – 2011. – № 29. – P. 969–979.
6. Jiang, H. Construction Price Prediction Using Vector Error Correction Models / H. Jiang, Y. Xu, Chunlu Liu // Journal of Construction Engineering and Management. – 2013. – № 11. – P. 3–12.
7. Kuo, C.-Y. Does the vector error correction model perform better than others in forecasting stock price? An application of residual income valuation theory / C.-Y. Kuo // Economic Modelling. – 2016. – Vol. 52. Part B. – P. 772–789.
8. Construction and building technology: Poised for a breakthrough? / N. Santhanam [et al.]. – New York : McKinsey & Company, 2020. – 50 p.

Поступила 15.12.2020

#### USING THE ERROR CORRECTION MODEL (ECM) TO FORECAST ECONOMIC GROWTH IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

**A. MISHCHENKO, U. AKULICH**

*The toolkit in the form of econometric models for predicting economic growth in the building branch is presented. Empirically, it has been proven that there is a determining short-term and long-term impact of investments in construction and installation works on the gross value added in construction. Using the Angle-Granger procedure, it was established that there is cointegration between construction and installation work and gross value added in construction. This makes possible to apply the error correction model to predict economic growth in the construction industry in Belarus.*

**Keywords:** gross value added (GVA); construction and installation work; building branch; forecasting; ECM model; cointegration analysis.

УДК 628.544

**АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ОТХОДОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ****Т.М. МОНЯК***(Белорусский национальный технический университет, Минск)***Л.В. КУЛЬБИЦКАЯ; канд. техн. наук В.И. РОМАНОВСКИЙ***(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск)*

В статье обозначены аспекты использования отходов гальванических производств. Рассмотрены проработанные направления вторичного использования отходов гальванических производств. Авторами на основе возможности применения современных методов синтеза предложены природоохранные направления использования рассматриваемых отходов. Предлагаемый способ синтеза отличается быстротой синтеза, низкими энергозатратами, экологичностью, низкими требованиями к отходам, возможностью совместной переработки различных по составу отходов. Отмечена перспективность использования получаемых материалов в качестве магнитных сорбентов и магнитных фотокатализаторов для очистки сточных вод от органических загрязняющих веществ.

**Ключевые слова:** гальваническое производство; гальваношлам; сорбент; катализатор.

**Введение.** Значительную часть отходов химических производств занимают отходы гальванической промышленности или гальваношламы, которые представляют собой гетерогенные дисперсные системы, разнообразного химического и минералогического состава [1]. Учитывая большое количество накопленных и образующихся на предприятиях гальванических шламов, вопросы утилизации и вторичного использования данных отходов имеет важное значение на сегодняшний день. Анализируя количество образовавшихся за последнее десятилетия гальванических отходов в Республике Беларусь (рисунок 1), можно сделать вывод, что каждый год образуется в среднем около 8 тыс. т отходов данного вида [2].

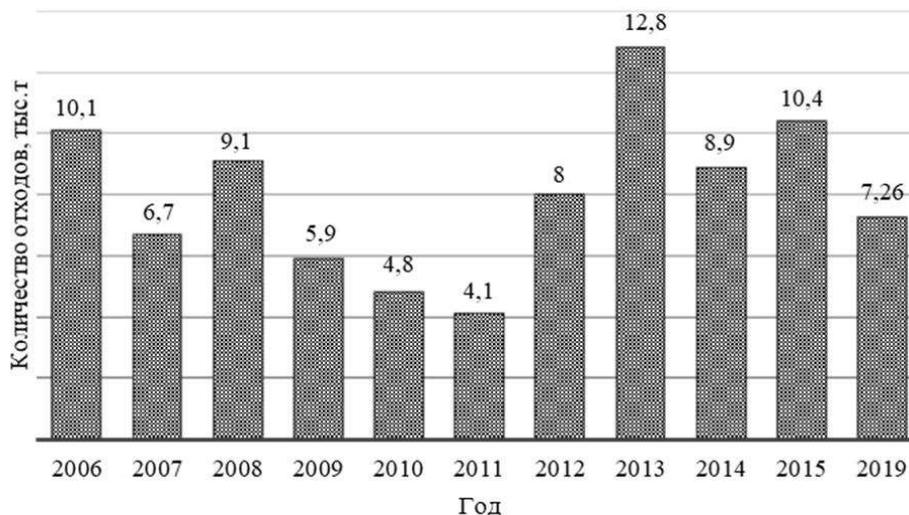


Рисунок 1. – Динамика образования отходов гальванического производства за 2006-2019 гг. [1]

Согласно статистическим данным реестров по использованию отходов в Республике Беларусь, зарегистрирован и представлен 21 объект по использованию отходов гальванических производств: 6 площадок, 2 хранилища отходов гальванического производства, 4 склада и помещения, существует 2 места хранения гальванических шламов, а также единично встречающиеся: ёмкость, шламособорник, резервуар и илосборник. Строительство и эксплуатация таких сооружений требует значительных экономических затрат, больших отчуждаемых территорий. Также необходимо учитывать тот факт, что находящиеся на хранении гальваношламы несут экологическую опасность, так как в своём составе имеют ряд опасных веществ: соединения цветных и тяжёлых металлов, кислоты. Данные соединения оказывают токсическое, канцерогенное и мутагенное воздействие на окружающий мир и человека, что ставит актуальной проблему их вторичной переработки и использования.

**Методология исследований.** Элементный состав отходов гальваношламов определяли при увеличении до 1000 крат методом сканирующей электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JSM 5610 LV с системой химического анализа EDX JED 2201 JEOL (Япония).

Нефтеемкость синтезированных материалов определяли следующим образом. В чашку Петри наливали водопроводную воду, а сверху наливали 5 мл машинного масла. Сверху в масло равномерно по поверхности вносили навеску 100 мг исследуемого сорбента. Сбор сорбированных нефтепродуктов осуществляли неодимовым магнитом, помещенным в полиэтиленовый пакетик. После однократного проведения магнитом по поверхности масла его поднимали над поверхностью и давали стечь избытку масла в течение 1 минуты. После этого магнит доставали из пакетика и взвешивали навеску сорбированных нефтепродуктов с пакетом. Расчет нефтеемкости сорбента, г/г, выполняли по формуле

$$HE = (m_1 - (m_2 + m_3)) / m_3,$$

где  $m_1$  – масса пакета с навеской сорбента и удерживаемым нефтепродуктом, г;

$m_2$  – масса пакетика с учетом удерживаемого нефтепродукта (холостая проба), г;

$m_3$  – масса навески сорбента, г.

**Основная часть.** В зависимости от состава, гальванические шламы относятся к отходам 1–3 классов опасности. В зависимости от основного металлкомпонента гальванические отходы можно разделять на группы: железо-, хром-, цинк-, свинец-, никель-, медьсодержащие гальваношламы. Нами были изучены 20 образцов гальваношламов, отобранных на предприятиях металлургической и машиностроительной промышленности страны. Усредненный элементный состав отходов гальванических производств (в мас.%): С – 7,7%, О – 20,0%, Na – 2,5%, Si – 2,9%, P – 1,6%, S – 1,6%, Ca – 6,4%, Cr – 7,0%, Fe – 32,3%, Pb – 2,8%, Zn – 6,6%, Cu – 3,7%, Ni – 1,6% от общей массы образца. Среднее содержание остальных элементов в исследуемых гальваношламах составляет менее 1%. При этом в единичных образцах содержится барий (9,9%), кадмий (7,1%), молибден (4,1%), олово (3,7%), алюминий (3,3%). Железо содержится во всех образцах и его содержание варьируется от 3,1 до 81,5%. Максимальное содержание хрома в образцах составляет 32,7%, кальция – 30,3%, кремния – 29,1, натрия – 14,4%, серы – 14,0%.

Нестабильность гальваношламов по химическому составу и консистенции (от жидкой суспензии до пастообразного состояния) является одним из основных факторов, отрицательно влияющих на поиск решения по обезвреживанию и использованию отходов гальванического производства [3]. В настоящее время проработаны следующие направления применения отходов гальванических производств: использование при получении строительных материалов, добавки в виде порошков к различным смесям, извлечение металлов из отходов [4; 5].

Большое количество исследовательских работ посвящено использованию гальваношламов в производстве строительных материалов. Существуют направления комплексного исследования по использованию железосодержащих осадков сточных вод гальванических производств в керамической промышленности [6]. В данных работах в качестве компонента керамической массы были использованы 15–25%-е осадки сточных вод гальванических производств. Такой способ позволил получать объемно окрашенную архитектурно-строительную керамику и кирпич насыщенных красно-коричневых и шоколадных тонов с достаточно высоким уровнем физико-технических свойств.

Метод утилизации гальваношламов с получением высокоэкологичной керамики описан в работе [7]. Он основан на прокаливании гальваношламов, содержащих гидроксидов железа 75–80% и хрома 20–25% при 500 °С, в качестве реагента керамического изделия использован фосфат алюминия. При последующей обработке и прокаливании из данного продукта удалялась вода и образовывалась смесь, содержащая малорастворимые соединения железа, хрома и алюминия. Были изучены и определены оптимальные параметры для проведения процесса по термической обработке шламов и их использования в качестве добавки к строительным материалам. В плане ресурсосбережения, использование гальваношламов в качестве добавок в массы строительной керамики наиболее целесообразно, так как в этом случае уменьшается потребление природного сырья до 30 мас.%, при этом утилизируется токсичный отход и уменьшается техногенная нагрузка на окружающую среду [8].

В исследованиях [9; 10] изучалась возможность приготовления обожженных глиняных кирпичей с добавлением гальванического шлама путем оценки физических свойств и экологического риска подготовленных глиняных кирпичей. Результаты показали, что использование гальванического шлама в производстве обожженного глиняного кирпича или керамики приводит к снижению водопоглощения и увеличению прочности на сжатие полученных образцов.

Также существует возможность переработки и использования твердого осадка сточных вод цеха гальванопокрытий при производстве керамзитового гравия. Предложенный способ утилизации гальва-

ношлама отвечает всем необходимым экологическим, технологическим и экономическим требованиям: высокотемпературная обработка переводит тяжелые металлы в невыщелачиваемые формы, обеспечивает их обезвреживание в составе керамзитового гравия, качество которого при этом улучшается за счет снижения плотности и увеличения коэффициента вспучивания, а производительность процесса повышается за счет расширения температурного интервала вспучивания [11].

Выполненный количественный и фазовый анализ состава отходов гальванических производств различных предприятий Украины показал, что многие шламы после предварительного обжига и подшихтовки пригодны для изготовления окрашенных глазурей в производстве керамической плитки. Получены глазурные покрытия имели цвета от оливково-серого до темно-зеленой окраски при использовании доломитового концентрата [12].

Исследование способов применения гальваношламов в качестве добавки к смесям на основе портландцемента, а также в шлакощелочные вяжущие принесли положительный результат. Было доказано, что даже при содержании гальваношламов в количестве 15 мас.% такие металлы, как хром, медь, цинк, стронций, олово, кобальт из изделий, на основе этих вяжущих не вымываются, т. е. обеспечивается их 100%-е связывание [13]. Успешно применены результаты модификации ангидридовых вяжущих гальваническими шламами, подвергнутыми термической обработке при повышенных температурах (до 1200 °С), за счет чего происходит повышение физико-механических показателей, прежде всего прочности при сжатии. Данный процесс происходит за счёт формирования более плотной структуры камня вследствие структурирования ангидридовой матрицы ультрадисперсным порошком обожженного шлама [14].

В работе [15] разработаны составы комплексных противоморозных химических добавок в цементы с применением гальванического шлама. Введение в состав цементного теста гальваношламов влияет и на тепловыделение при гидратации цемента. Разработанная противоморозная добавка предотвращает замерзание бетонной смеси при транспортировке, укладке и уплотнении, а также до начала активной тепловой обработки. Предложены и способы разработки комплексного ускорителя твердения на основе гальваношлама. Данный ускоритель твердения при введении в состав бетонной смеси позволяет увеличить прочность бетона в возрасте 16 часов и 1 суток на 200% и 13% соответственно при дозировке 3% от массы цемента [16]. Некоторые исследования подтверждают возможность применения технологий переработки и модификации гальваношламов в активированный минеральный порошок для асфальтобетона.

Была произведена комплексная экологическая оценка защитного полимерного покрытия, модифицированного тетраэтоксисилоаном и содержащего в качестве наполнителя отход гальванического производства. Разработанное защитное покрытие может использоваться для защиты бетонных поверхностей зданий и сооружений, элементов конструкций от воздействия неблагоприятных внешних воздействий: повышенная влага, ультрафиолетовое излучение, атмосферный озон [17].

Одним из направлений применения гальваношламов является возможность его использования в качестве пигментов. Проведенные авторами [18] исследования показали, что путем кислотно-щелочной обработки из гальваношламов можно получать компоненты, которые могут найти широкое применение для изготовления товаров народного потребления, а именно изготовление пигментов-наполнителей и красок, на основе выделенных из гальваношламов  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  и  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ . Авторами [19] получен ряд пигментов из отработанных гальванических растворов. Результаты экспериментов, приведенных в статье [20], показывают широкие возможности варьирования цветовых решений тротуарной плитки в зависимости от количества введенного в смесь шлама. Качественный анализ и определение показателя pH дали возможность сделать вывод о безопасности химического состава гальванического шлама и возможности его введения в состав бетонной смеси для изготовления тротуарной плитки.

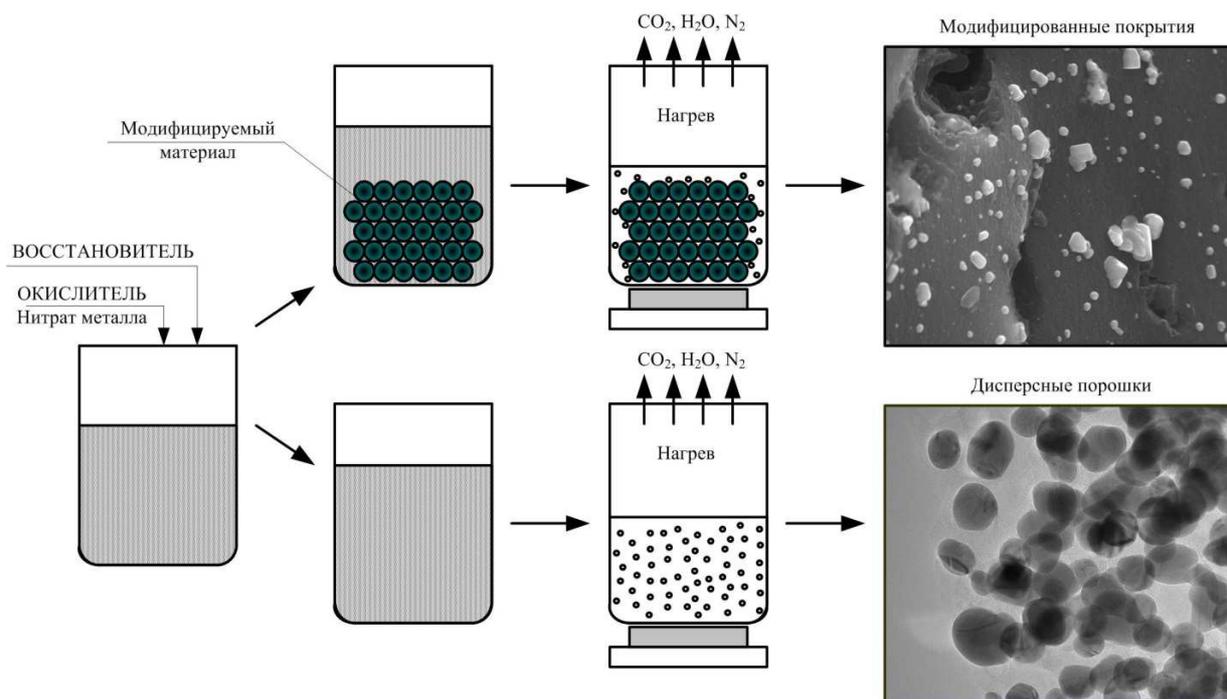
В исследовании [21] были изучены способы получения и использования гальваношлама в качестве антипиреновой добавки в количестве 10–50 мас.%, что позволило значительно улучшить огнестойкие свойства защитного покрытия на основе эпоксидной диановой смолы и полиметилфенилсилоксана. Предложена и изучена технология переработки гальваношламов сложного состава, содержащих не менее 10% тяжелых металлов и обедненных железом. Предлагаемая технология включает четыре основные стадии и предполагает извлечение из гальваношламов ценных компонентов с последующим использованием обезвреженного и обедненного шлама в производстве строительных материалов [22]. Авторами [23; 24] представлены результаты исследований по извлечению железа, хрома и никеля различными кислотами и другими химическими реагентами, а именно серной, соляной и азотной кислотой, Трилоном Б. Из исследования были сделаны выводы, о том, что серная кислота оказалось наиболее подходящим для выщелачивания агентом, который дал 99,6% железа 99,56% хрома и 99,7% извлечения никеля. Другие используемые кислоты, показали сравнительно одинаковый эффект извлечения металлов. Выщелачивание осадка Трилоном Б обеспечивает заметную степень извлечения меди и никеля в раствор при умеренном растворении

хрома. Одним из направлений использования гальванического шлама является технологический процесс восстановления меди из отходов с использованием разработанной комбинации выщелачивания, фильтрации и электрохимического извлечения [25].



**Рисунок 2. – Направления использования отходов гальванических производств**

Из анализа литературных источников можно сделать вывод, что для обеспечения использования отходов гальванических производств в качестве вторичного сырья возможно использование новых технологий. Например, можно предложить использование метода экзотермического горения в растворах для получения порошков или покрытий [26–28] соответствующих оксидов металлов (рисунок 3).



**Рисунок 3. – Получение металлических или оксидных наноразмерных частиц в виде порошка или покрытий методом экзотермического горения в растворах**

Данные реакции возможны при наличии окислителя (нитрат металла) и органического восстановителя, в качестве которого наиболее часто используются глицин, лимонная кислота, гексаметилентетрамин, мочевины. Схема протекающих реакций представлена ниже:



Получение наноразмерных частиц по данной реакции возможно за счет молекулярного перемешивания веществ (образование органометаллических комплексов) и большой доли выделяемых газов к единице образовавшегося оксида металла. Данные реакции отличаются существенным преимуществом

среди альтернативных методов. Время реакции составляет менее минуты, и она самоподдерживающаяся, отсутствуют сточные воды и отходы, выбрасываемые вещества не нормируются к выбросу, процесс легко масштабируем.

Наличие в составе отходов гальваношламов железа и никеля обеспечит магнитные свойства получаемых материалов, что позволит эффективно выделять их из обрабатываемых сред. А выбранный метод синтеза позволяет получать порошки с высокой удельной поверхностью. Так, предварительные исследования половины образцов показали, что наибольшую нефтеемкость имеют образцы, синтезированные при использовании в качестве восстановителя глицина. Нефтеемкость образцов составила от 2 до 7 г/г. Худшие результаты по нефтеемкости характерны для образцов, синтезированных с использованием гексаметилентетрамина в качестве восстановителя.

Наличие в первую очередь цинка обеспечит высокие фотокаталитические свойства синтезируемых материалов. При этом в совокупности с железом (феррит цинка) фотокаталитическая активность только возрастет. Также очень широко распространено применение железосодержащих катализаторов в органическом синтезе, например, в процессе Бериуса (гидрирование) используются катализаторы на основе оксида железа, олова и молибдена, а также в процессах дегидрирования (оксид железа), синтеза аммиака из водорода и азота (оксид железа), разложение спиртов и др.

Установлено, что в некоторых условиях синтеза методом экзотермического горения в растворах возможно образование металлов, а также полиметаллических структур и металл-графеновых структур. Сырьем для графена служит используемый органический восстановитель, а сам металл – катализатором.

Таким образом, полученные предложенным методом материалы могут найти применение в каталитическом органическом синтезе, технологии очистки сточных вод в качестве фотокатализаторов [29–31] или магнитных сорбентов нефтепродуктов [32; 33], либо применяться в качестве пигментов. Получаемые по данной технологии материалы характеризуются высокой удельной поверхностью и экологичностью процесса синтеза, в сравнении с аналогами [34].

**Заключение.** На основании анализа перспектив использования отходов гальваношламов можно сделать следующие выводы:

- переработка отходов гальваношламов затруднена вследствие:
  - 1) многокомпонентного состава отходов;
  - 2) небольших объемов образования, от нескольких тонн до нескольких десятков тонн в год на предприятии, в пересчете на сухое вещество;
  - 3) в некоторых случаях, наличия нефтепродуктов в составе отхода;
- в настоящее время проработаны направления использования отходов гальваношламов, включающие их непосредственное использование в качестве сырьевого компонента в составе смесей;
- использование новых, более экологичных методов по переработке отходов гальваношламов позволит значительно расширить спектр направлений их вторичного использования, например, для очистки сточных вод в качестве каталитических материалов и сорбентов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцева, И.В. Об использовании шламов отходов при производстве строительных материалов / И.В. Мальцева // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2. – С.49.
2. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minpriroda.gov.by/uploads/files/Reestr-objektov-po-ispolzovaniju-otxodov-5-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15.pdf> – Дата доступа: 20.11.2020.
3. Некоторые направления использования отходов гальванического производства / В.Н. Марцуль [и др.] // Труды БГТУ. – 2012. – № 3 (150). – С. 70–75.
4. Инвентаризация гальванических шламов и осадков очистных сооружений, образующихся на предприятиях Республики Беларусь / В.Н. Марцуль [и др.] // Труды БГТУ. – 2012. – № 3 (150). – С. 76–83.
5. Some applications of galvanic manufacture waste / V. Martsul [et al.] // Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances. – 2012. – № 3. – P. 66–70.
6. Получение стекловидных материалов с использованием осадков сточных вод гальванических производств / О.В.Кичкайло [и др.]. // Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производстве строительных материалов : межд. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 нояб. 2015 г. / Белор. гос. техн. ун-т. ; редкол.: И.М. Жарский (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГТУ, 2015. – С. 81–85.
7. Котов, В.В. Утилизация твердых отходов гальванического производства с получением керамических материалов / В.В. Котов, Г.Н. Данилова, И.С. Горелов // Науч. Вестн. Воронеж. гос. архит.-строит.

- ун-та. Сер. Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2013. – № 7. – С. 158–160.
8. Суржко, О.А. Термообработка шламов гальванических производств и использование их в производстве строительных материалов / О.А. Суржко, В.В.Пишин, К.О. Оковитая // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 7–4. – С. 176–180.
  9. Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation / M. Zhang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2018. – Т. 159. – С. 27–36.
  10. Valorization and inertization of galvanic sludge waste in clay bricks / L. Pérez-Villarejo [et al.] // Applied Clay Science. – 2015. – Т. 105. – С. 89–99.
  11. Озерянская, В.В. Использование твердых осадков при производстве товарной продукции / В.В. Озерянская, И.Н. Лоскутникова // Изв. вузов. Северо-кавказский регион. Естественные науки. – 2004. – №3. – С.82–87.
  12. Утилизация гальванических шламов / А.Н.Синюшкин [и др.]. // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2012. – № 2. – С. 58–61.
  13. Войтович, В.А. Гальваношламы: не перерабатывать, а использовать в цементных смесях / В.А. Войтович // СтройПРОФИль. – 2009. – № 1. – С. 50–51.
  14. Сычугов, С.В. Применение гальванического шлама для активации ангидритового вяжущего / С.В. Сычугов // Изв. Казан. гос. архит.-строит. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 347–351.
  15. Степанов, С.В. О возможности использования отходов гальванического производства / С.В. Степанов, И.В. Боровских, Г.Р. Хилавиева // Инновационная наука. – 2016. – № 4. – С. 159–160.
  16. Степанов, С.В. Исследование долговечности бетонов с ускорителем твердения на основе гальванического шлама / С.В. Степанов, Н.М. Морозов, В.Г. Хозин // Изв. КГАСУ. Строительные материалы и изделия. – 2013. – № 2. – С. 268–272.
  17. Селиванов, О.Г. Комплексная экологическая оценка полимерного покрытия, содержащего отходы гальванического производства / О.Г. Селиванов, В.А. Михайлов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 14–18.
  18. Использование шламов гальванических производств при изготовлении товаров народного потребления / Л.Н. Ольшанская [и др.]. // Ползун. вестн. – 2011. – № 4–2. – С. 203–206.
  19. Cheprasova, V.I. Spent zinc-plating electrolytes as secondary raw material for production of pigments / V.I. Cheprasova, O.S. Zalyhina // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2017. – Vol. 90, Issue 3. – P. 380–388.
  20. Колесников, А.Г. Использование переработанных гальванических шламов как одна из рециклинговых технологий / А.Г. Колесников, А.А. Белкин // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2019. – № 1. – С. 54–62.
  21. Курочкин, И.Н. Применение отходов гальванического производства для повышения огнестойкости полимерных защитных покрытий / И.Н. Курочкин, М.Е. Ильина // Междунар. науч.-исслед. журн. – 2019. – №. 9(87). – С. 36–38.
  22. Разработка технологии переработки отходов гальванического производства на экспериментальной установке модульного типа / О.Г. Селиванов [и др.]. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7. – С. 568–572.
  23. Garole, D.J. Recovery of Metal Value from Electroplating Sludge / D.J. Garole, V.J. Garole, D.S. Dalal // Research Journal of Chemical Sciences. – 2012. – Vol. 2(3). – P. 61–63.
  24. Makovskaya, O. Leaching of non-ferrous metals from galvanic sludges / O. Makovskaya, K. Kostromin // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 946. – P. 591–595.
  25. Electrochemical copper recovery from galvanic sludge / P.T. Huyen [et al.] // Hydrometallurgy. – 2016. – №. 164. – P. 295–303.
  26. One-step synthesis of polymetallic nanoparticles in air invironment / V.I. Romanovskiy [et al.] // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. – 2018. – Vol. 61. – № 9–10. – P. 43–48.
  27. Modified activated carbon for deironing of underground water / D. Propolsky [et al.] // Environmental Research. – 2020. – Т. 182. – P. 108996.
  28. Romanovski V. New approach for inert filtering media modification by using precipitates of deironing filters for underground water treatment / V. Romanovski // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27. – P. 31706–31714.
  29. 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.
  30. Железосодержащие фотокатализаторы из осадков очистки промывных вод фильтров обезжелезивания / В.И. Романовский [и др.]. // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2019. – № 4. – С. 18–22.
  31. Романовский, В.И. Сравнительный анализ методов очистки сточных вод от красителей / В.И. Романовский, В.В. Лихавицкий, М.В. Пилипенко // Вода magazine. – 2016. – № 12 (112). – С. 54–58.

32. Горелая, О.Н. Сорбент для очистки нефтесодержащих сточных вод на основе отходов станций обезжелезивания / О.Н. Горелая, В.И. Романовский // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 10, – С. 48–54.
33. Горелая, О.Н. Магнитный сорбент из отходов водоподготовки для очистки нефтесодержащих сточных вод / О.Н. Горелая, В.И. Романовский // Вестник БрГТУ. – 2020. – №2. – С. 61–64.
34. Xanthopoulou, G. An overview of some environmental applications of self-propagating high-temperature synthesis / G. Xanthopoulou, G. Vekinis // Advances in environmental research. – 2001. – Т. 5. – №. 2. – С. 117–128.

Поступила 09.12.2020

#### **ANALYSIS OF THE PERSPECTIVES OF USE OF ELECTROPLATING INDUSTRY WASTE**

**T. MONAK, L. KULBITSKAIA, V. ROMANOVSKI**

*The article outlines the aspects of using waste from electroplating industries. The elaborated directions of the recycling of waste from electroplating industries were considered. Authors, on the basis of the possibility of using modern synthesis methods, proposed environmental directions for the use of the considered waste. The proposed synthesis method is distinguished by the rapidity of synthesis, low energy consumption, environmental friendliness, low requirements for waste, the possibility of joint processing of wastes of different composition. Prospects of using the obtained materials as magnetic sorbents and magnetic photocatalysts for purifying wastewater from organic pollutants were noted.*

**Keywords:** *electroplating production; galvanic sludge; sorbent; catalyst*

УДК 69.059

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ИСТОРИЧЕСКОГО ЗДАНИЯ В ГОРОДЕ ВИТЕБСКЕ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РЕКОНСТРУКЦИИ**

*канд. техн. наук, доц. Р.М. ПЛАТОНОВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*А.Т. ЗЕЛЕНКОВ  
(ООО «Фирма САЛЮС», Новополоцк)*

*Рассмотрено объемно-планировочное и конструктивное решение исторического здания, расположенного по ул. Крылова, д. 4 в г. Витебске. На основании технического обследования здания, полученного после визуального и инструментального обследования строительных конструкций, выполненных поверочных расчетов и анализа полученных результатов сделаны выводы о техническом состоянии конструкций и даны соответствующие рекомендации, необходимые при условии дальнейшей реконструкции. В частности, предложена схема конструктивного усиления каменных фундаментов; даны рекомендации по ремонту поврежденных участков наружных стен (фасадов) и внутренних стен в местах расположения каналов дымоходов ранее существующей системы отопления; междуэтажные перекрытия рекомендовано для повышения пространственной жесткости здания и его долговечности устроить из монолитного железобетона вместо ранее существующих деревянных балочных перекрытий.*

**Ключевые слова:** историческое здание, техническое обследование, строительные конструкции, перекрытие, фундамент, стены, рекомендации, реконструкция.

**Введение.** Бывшее административное здание по ул. Крылова, д. 4 в г. Витебске было выкуплено на аукционе частным лицом с целью его дальнейшей реконструкции под первоначальные функции – одноквартирный жилой дом. Здание является историко-культурной ценностью 3 категории. В Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь внесено 5,5 тыс. объектов, из которых 5352 – материальные недвижимые историко-культурные ценности, 89 – материальные движимые историко-культурные ценности и 111 нематериальных историко-культурных ценностей. Историко-культурные ценности – это наиболее отличительные материальные объекты и нематериальные проявления человеческого творчества, которые имеют выдающиеся духовные, эстетические и документальные достоинства и взяты под охрану государства в установленном законом порядке [1]. Таким образом, историко-культурной ценностью (памятником) признаются объекты, обладающие совокупностью двух признаков: культурной значимостью и юридическим признанием в таком качестве. В зависимости от формы воплощения их содержания культурные ценности подразделяют на:

- материальные историко-культурные ценности (памятники градостроительства, архитектуры, искусства, археологии, истории, документальные и заповедные места);
- нематериальные историко-культурные ценности в материальной или нематериальной форме.

К нематериальным культурным ценностям относятся обычаи и обряды, традиции, фольклор (устное народное творчество), белорусский язык (устный и письменный), другие языки, традиции и названия, традиционные формы обращения к людям, содержание геральдических объектов, собственных географических названий (топонимов) и изделий народных художественных ремесел, а также иные нематериальные проявления творчества человека [2; 3].

**Основная часть.** Обследуемое здание изначально было одноэтажным жилым домом, принадлежавшим местному портному Шнеру, потом он стал двухэтажным, а в 1915 году появился и третий этаж. Улица тогда называлась Успенской. В настоящее время эта улица называется в честь большевика, комиссара Семёна Крылова. Он прославился тем, что захватил власть в Витебске после Октябрьской революции и организовал оборону города от кайзеровских войск. После смерти портного домом владела его жена, Шейн Шнер. В разные годы в здании успели пожить известные в Витебске люди: музыкант Самуил Жив, построивший третий этаж; общественный деятель и организатор первого в Витебске шахматного кружка Илья Аренбург; семья художника Мстислава Добужинского. В 1926 году здесь жил известный краевед Николай Касперович, по этому поводу на фасаде установлена мемориальная доска. В военные годы улица чудом уцелела [4]. Долгое время здание выполняло административно-хозяйственные функции.

Весной 2020 г. было проведено обследование технического состояния несущих строительных конструкций неразрушающими методами контроля этого здания с целью дальнейшей реконструкции под одноквартирный жилой дом [5–7].

**Краткая техническая характеристика здания.** Обследуемый объект – трехэтажное, кирпичное, прямоугольное в плане здание. Общие размеры в плане 23,8 м × 14,1 м. Под частью здания, в осях 1–3 /

Б–В и в осях 4–5 / Б–В, располагаются подвалы. В осях 3–4, в уровне 1-го этажа, в здании имеется сквозной проход. Фасады здания, план подвала и планы этажей здания представлены на рисунках 1–3.

За отметку  $\pm 0,000$  принята отметка чистого пола 1-го этажа.

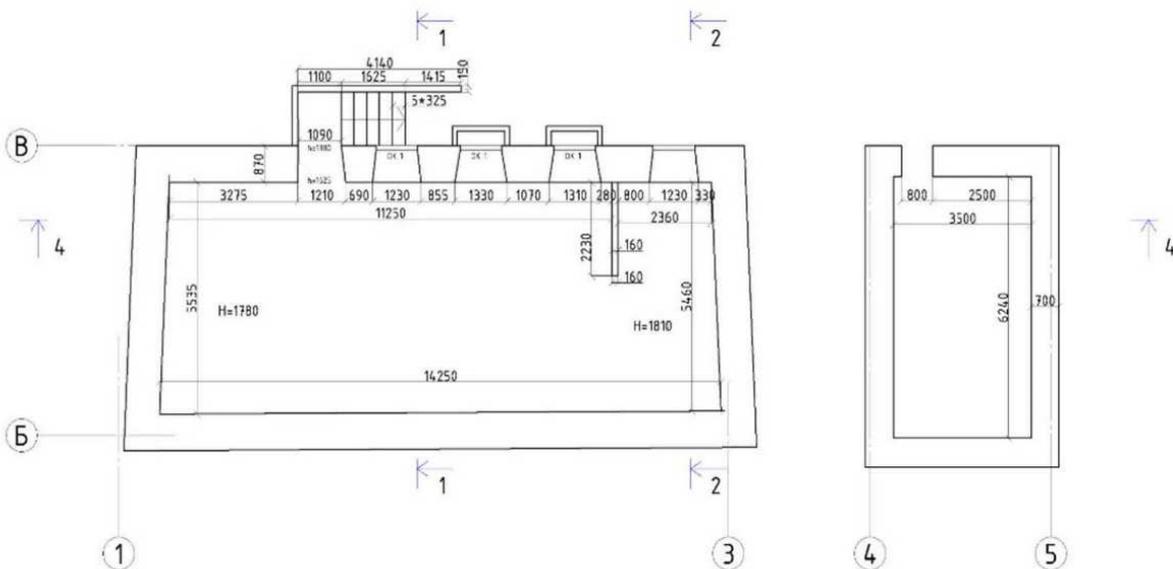
Высота помещений: подвал: в осях 1–3 / Б–В – 1,8 м; в осях 4–5 / Б–В – 2,0 м; 1-й этаж – 3,0 м; 2-й этаж – 3,5 м; 3-й этаж – 3,5 м.

Конструктивная схема здания – с продольными и поперечными наружными и внутренними несущими стенами.

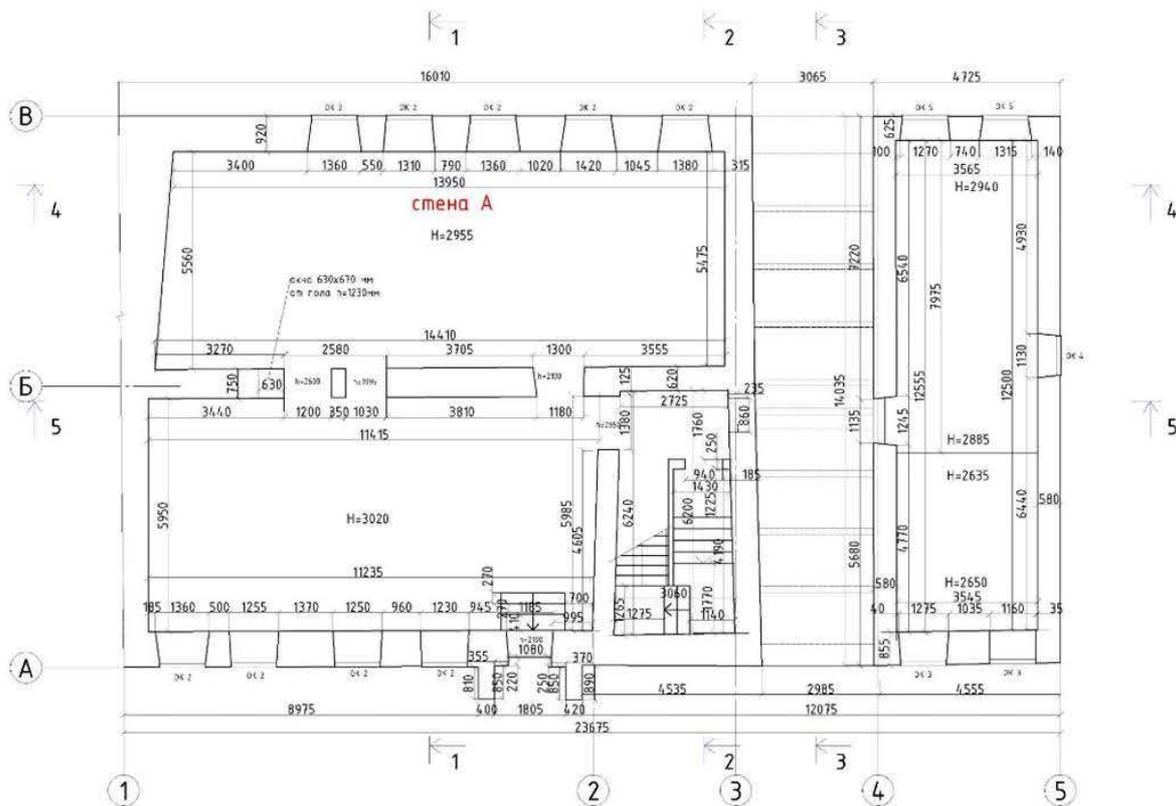
Фундаменты – ленточные, бутовые, в верхней части кирпичные, с кирпичным цоколем. Стены подвала кирпичные с бутовыми включениями. Для естественного освещения подвальных помещений устроены оконные проемы с приямками. Входы в подвалы располагаются в наружной стене по оси В (со стороны дворового фасада). В связи с наложением покрытий элементов благоустройства улицы Крылова полы 1-го этажа здания со стороны главного фасада располагаются на  $200 \pm 3$  мм ниже планировочной отметки улицы.



Рисунок 1. – Фасады здания

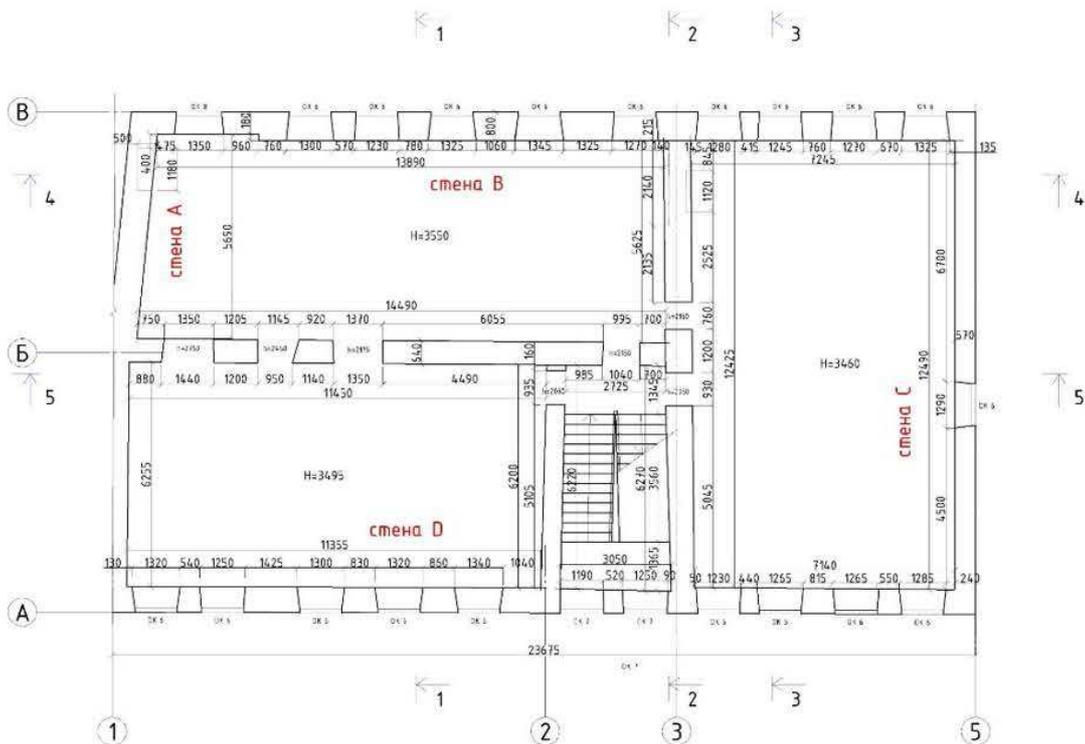


a

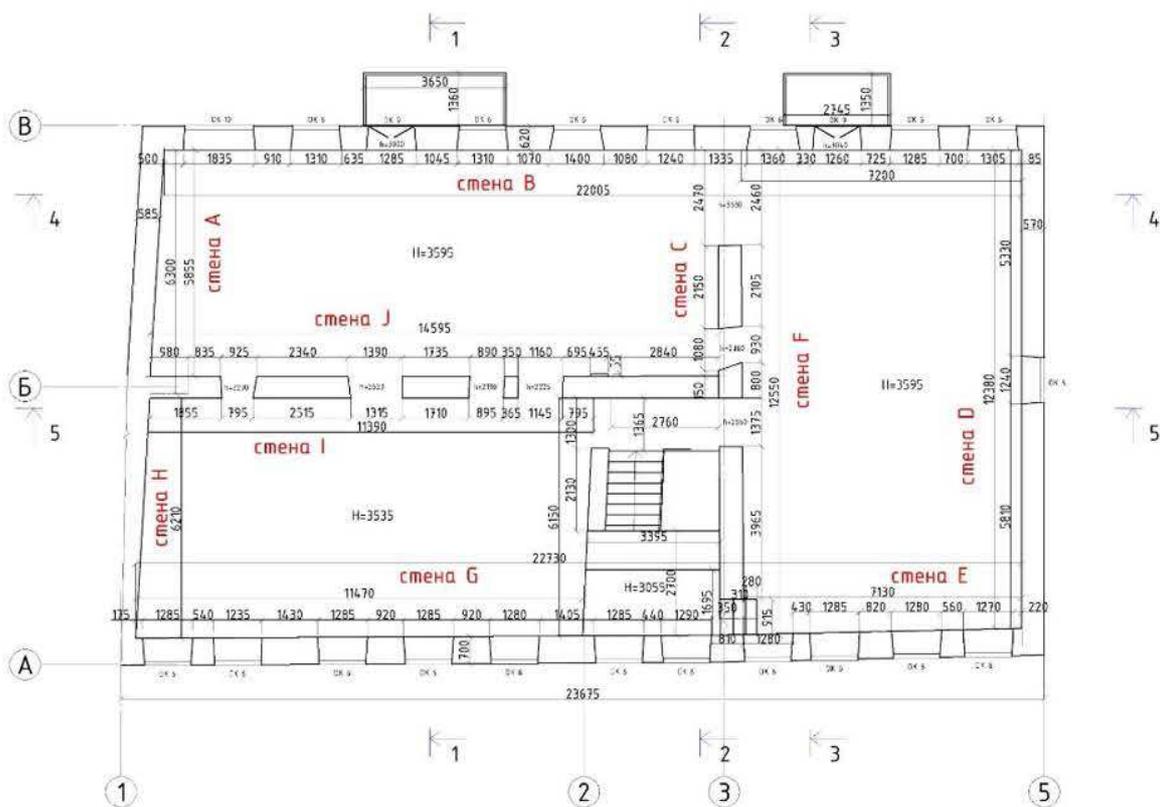


b

Рисунок 2. – Планы подвала (а) и 1-го этажа (б)



a



б

Рисунок 3. – Планы 2-го этажа (а) и 3-го этажа (б)

Наружные стены здания выполнены из керамического полнотелого кирпича. За исключением торцевой стены по оси 5, выполнена наружная штукатурка всех стен. Толщина стен: подвал – 700÷910 мм; 1-й этаж – 580÷910 мм; 2-й этаж – 580÷730 мм; 3-й этаж – 580÷730 мм. Внутренние несущие стены кирпичные, толщиной 580÷750 мм с последующей штукатуркой с двух сторон. Штукатурный слой всех внутренних поверхностей стен демонтирован. Перегородки на момент обследования демонтированы. В здании в уровне 3-го этажа в осях 1–2 и 3–5 по оси В устроены два балкона. Плиты балконов выполнены монолитными, железобетонными по стальным консольным балкам (рельс IVa ОСТ 118, 1927 г.). Толщина балконных плит переменная 180÷220 мм. Полы из керамической плитки на растворе. По периметру балконов устроено металлическое ограждение. Перекрытие над подвалом:

- в осях 1–2 / Б–В – из мелкогабаритных железобетонных ребристых плит с размерами в плане 1000 × 700 мм по стальным балкам из швеллеров № 16, расположенных с шагом 750 мм;
- в осях 2–3 / Б–В – монолитное железобетонное толщиной 120 мм по стальным балкам (рельс Р43), расположенных с шагом 800 мм;
- в осях 4–5 / Б–В – деревянное балочное.

Перекрытие над проходом сводчатое кирпичное по стальным балкам (рельс Ша ОСТ 118, 1927 г.) высотой 128 мм, расположенным с шагом 1400 мм. Междуетажные перекрытия – деревянные, балочные. Балки сечением 190 × 240 (h) располагаются с шагом 1000–1100 мм. Деревянный настил толщиной 100 мм устроен по черепным брускам 50 × 50 мм. По настилу устроена глиняная обмазка и засыпка из шлака толщиной 100 мм. Полы выполнены из дощатого настила толщиной 50 мм по деревянным лагам. Потолки – штукатурка по драни. Чердачное перекрытие – деревянное балочное. На момент обследования чердачное перекрытие демонтировано.

Лестница: марши из сборных железобетонных ступеней по стальным косоурам (рельс Р24); площадки – кирпичные сводчатые по стальным балкам (рельс Р24). Перекрытие над лестничной клеткой сводчатое кирпичное по стальным балкам (двутавр № 15 Краматорского металлургического общества и рельс John Brown SHEFFIELD ATLAS STEEL 8/74 SEC 177), расположенным с шагом 800 мм.

Крыша здания – двухскатная с деревянной стропильной системой и холодным чердаком. Стропильные ноги наслонного типа с опиранием на мауэрлат сечением 170 × 160 (h) мм и продольную коньковую балку сечением 170 × 160 (h) мм. Стропильные ноги сечением 150 × 180 (h) мм располагаются с шагом 2000 мм. Обрешетка из доски 100 × 30 мм с шагом 200–250 мм. Кровля из кровельной листовой стали. Оконные блоки – деревянные переплеты с двойным раздельным остеклением. Дверные блоки деревянные. Полы деревянные, дощатые по деревянным балкам, цементные с покрытием из керамической плитки.

**Техническое обследование состояния строительных конструкций здания.** При обследовании выполнялся осмотр элементов здания с фотофиксацией дефектов и повреждений. В результате обследования установлено следующее:

**Фундаменты** находятся в не вполне удовлетворительном состоянии, о чем свидетельствует наличие осадочных трещин в стенах здания. По техническому состоянию фундаменты характеризуются III-й категорией [5–7]. Цоколь имеет местные повреждения отделочного штукатурного слоя. По оси В здания разрушена отмостка. Пряжки оконных проемов подвала захлаплены мусором, происходит их разрушение и замокание стен подвала. Входной навес в подвал (в осях 1–2 по оси В) имеет многочисленные повреждения: образование сквозных трещин в стенах, разрушение покрытия из волнистых асбоцементных листов по деревянной обрешетке, разрушение ступеней лестницы спуска в подвал. Фундамент под несущей стеной здания по оси Б ленточный кирпичный с бутовыми включениями, в основании бутовая кладка (рисунок 4).

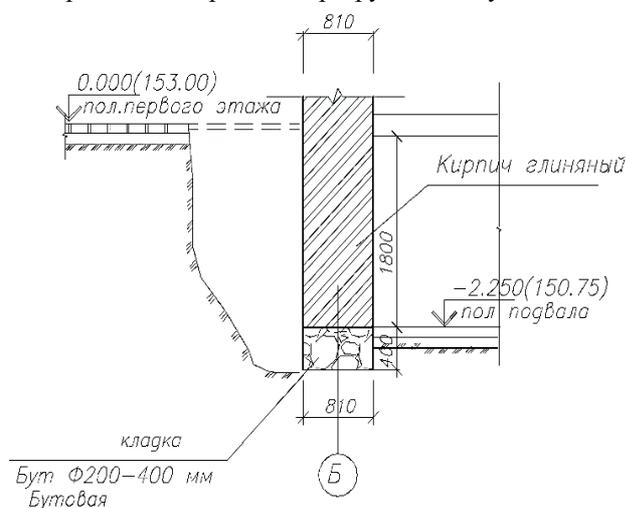


Рисунок 4. – Конструкция фундамента

При изучении конструкции фундаментов в шурфах установлено:

- глубина заложения фундамента по отношению к планировочной отметке земли со стороны оси В здания (дворовая часть) составляет  $d \approx 2,0$  м;
- признаков неравномерных осадок фундамента не обнаружено;
- наружные грани фундамента повреждений не имеют.

**Наружные стены:**

- стена по оси А находится в удовлетворительном состоянии – II категория. Исключение составляют местные участки имеющие повреждения отделочного штукатурного слоя (рисунок 5);



**Рисунок 5. – Местные участки, имеющие повреждения отделочного штукатурного слоя наружной стены по оси А**

– торцевые стены по осям 1 и 5, в целом, находятся в удовлетворительном состоянии - II категория. Однако кирпичная кладка торцевых стен ослаблена наличием в них каналов дымоходов системы отопления, которые находятся в неработоспособном состоянии, наблюдается образование трещин, выпадение кирпича внутренней версты;

– стена по оси В находится в не вполне удовлетворительном состоянии – III категория.

Имеются следующие дефекты и повреждения:

– образование наклонных и вертикальных трещин с шириной раскрытия до 5 мм. Образование трещин объясняется осадочными процессами фундаментов и основания (расположение здания на склоне), а также отсутствием горизонтальных связей между стенами здания (диски деревянных перекрытий не обеспечивают пространственную жесткость здания).

– разрушение отделочного штукатурного слоя участков карниза и стен в местах замкания с кровли;

– разрушение отделочного штукатурного слоя и кирпичной кладки наружной стены в местах отсутствия подоконных сливов;

– образование трещин, разрушение кирпичной кладки в подоконной части оконных проемов.

Кроме того имеются дефекты и повреждения в кирпичных перемычках над оконными проемами наружных стен в виде образования трещин в кирпичных клинчатых перемычках и использования деревянных перемычек (рисунок 6).



*a*

*б*

***a* – кирпичные клинчатые; *б* – деревянные**  
**Рисунок 6. – Перемычки**

*Внутренние стены:*

– стены лестничной клетки в осях 2–3 / А–Б в целом находятся в удовлетворительном состоянии и характеризуются II-й категорией. Исключение составляет участок стены 3-го этажа по оси 2 над дверным проемом – требуется перекладка поврежденного участка;

– стена по оси 3 в осях Б–В имеет повреждения в виде образования трещин, выпадение кирпича из кладки в местах расположения дымоходов. Стена на этом участке характеризуется III-й категорией – требуется выполнение ремонтных мероприятий;

- стена по оси 4 в осях Б–В в уровне 1-го этажа в целом находится в удовлетворительном состоянии и характеризуется II-й категорией;
- стена по оси Б в осях 1–3 имеет многочисленные повреждения в виде образования трещин, выпадение кирпича из кладки в местах расположения дымоходов и ослаблена большим количеством дверных проемов. Стена на этом участке находится в неработоспособном (неудовлетворительном) состоянии – IV категория. Требуется полная перекладка стены (рисунок 7).



**Рисунок 7. – Стена по оси Б в осях 1–3**

*Балконы* по оси В в осях 1–2 и 3–4 в уровне 3-го этажа имеют повреждения в виде отслоения штукатурного слоя, разрушения покрытий полов, поверхностной коррозии стальных балок и элементов ограждения. Монолитные железобетонные плиты балконов находятся в удовлетворительном состоянии и характеризуются II-й категорией (рисунок 8).

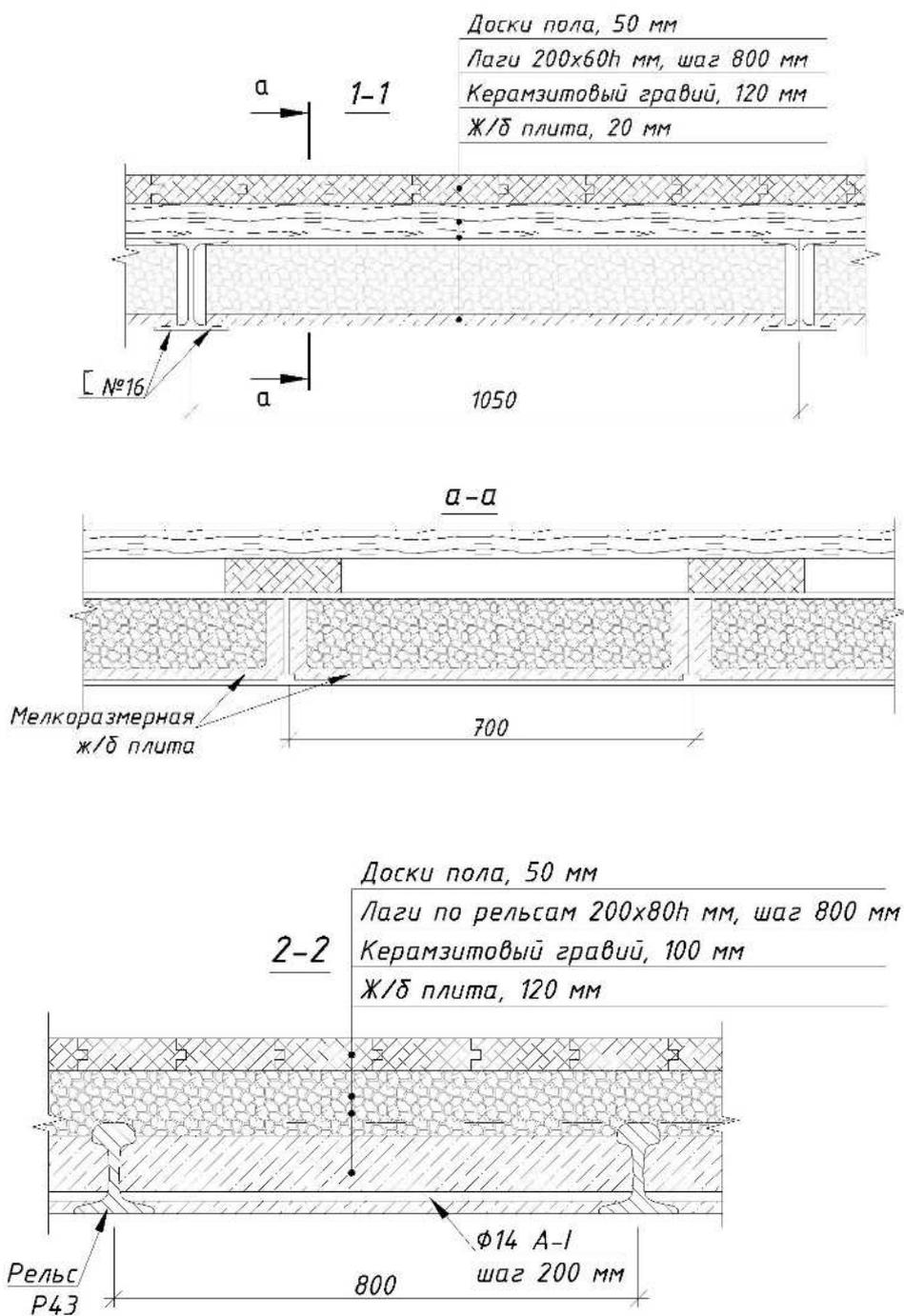


**Рисунок 8. – Балконы здания**

*Перекрытия над подвалом:*

- перекрытие в осях 1–2 / Б–В (из мелкогабаритных железобетонных ребристых плит по стальным балкам) находится в удовлетворительном состоянии – II категория (рисунок 9, а);
- перекрытие в осях 2–3 / Б–В (монолитное железобетонное по стальным балкам) находится в не вполне удовлетворительном состоянии – III категория. Требуется очистка от ржавчины и окраска стальных балок (рисунок 9, б);
- перекрытие в осях 4–5 / Б–В (деревянное, балочное) потеряло свои эксплуатационные качества и характеризуется IV-й категорией. Требуется замена перекрытия.

*Перекрытие над проходом* в осях 3–4 сводчатое кирпичное по стальным балкам в целом находится в удовлетворительном состоянии и характеризуется II-й категорией. Исключением является участок у оси В (два крайних шага). В результате осадочных процессов основания и фундамента в кирпичных сводах образовались трещины.



а – в осях 1–2 / Б–В; б – в осях 2–3 / Б–В

Рисунок 9. – Конструктивные решения перекрытий

*Междуэтажные перекрытия* – деревянные балочные, находятся в неудовлетворительном состоянии (зыбкость, прогибы, поражение балок на опорных участках гнилью, поражение досок настила и пола гнилью, разрушение штукатурки потолков). По техническому состоянию перекрытие на этих участках характеризуется IV-й категорией. Требуется их полная замена.

*Чердачное перекрытие* – деревянное балочное перекрытие находится в неудовлетворительном состоянии (в результате поражения гнилью опорных участков балок произошло разрушение перекрытия на отдельных участках, на остальных участках перекрытие демонтировано). По техническому состоянию чердачное перекрытие характеризуется V-й категорией. Требуется полная замена.



Рисунок 10. – Техническое состояние междуэтажных перекрытий

*Лестница.* Стальные балки лестничных площадок, косоуры, кирпичные сводчатые площадки находятся в удовлетворительном состоянии и характеризуются II-й категорией. Исключение составляют местные повреждения в виде сколов кромок накладных проступей лестницы, требуется их замена или ремонт.

*Стропильная система* крыши здания находится в неудовлетворительном состоянии. Устроено временное усиление конструкций. В результате длительной эксплуатации ряд элементов получили многочисленные дефекты и повреждения:

- поражение гнилью и разрушение опорных участков стропильных ног на мауэрлате;
- поражение гнилью, разрушение мауэрлата;
- поражение гнилью деревянных конструкций слухового окна и обрешетки;
- поражение гнилью стропильных ног;
- поражение гнилью обрешетки.

Стропильная система крыши по техническому состоянию характеризуется IV категорией. Требуется полная замена.

*Кровельное покрытие* имеет разрушение фальцевых соединений и торцевых примыканий к стенам, поражение кровельной стали ржавчиной, многочисленные протечки. Система наружного водоотвода имеет многочисленные повреждения. Требуется замена.



Рисунок 11. – Поражение гнилью обрешетки (а) и мауэрлата (б)

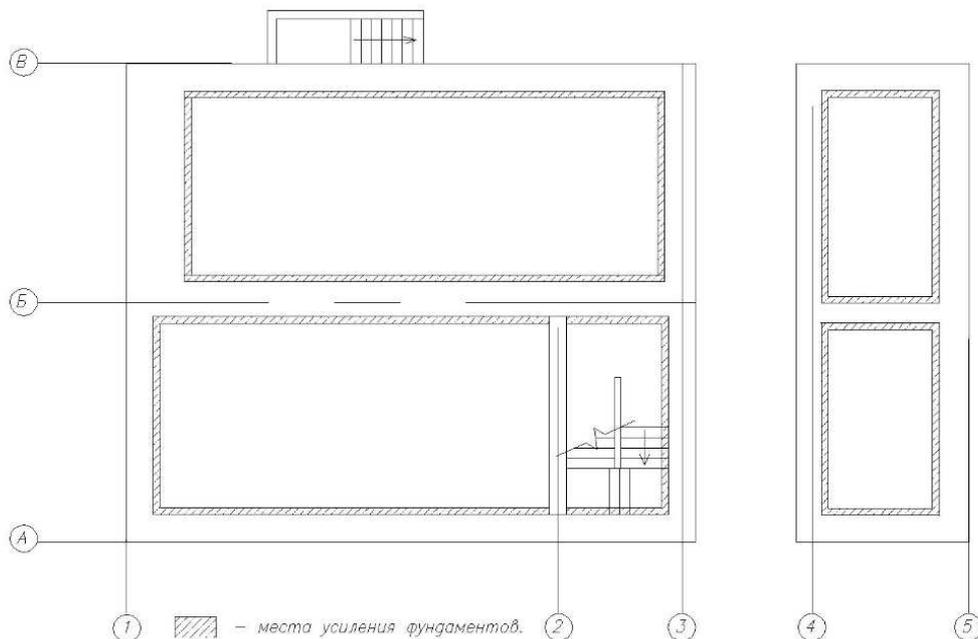
Кроме того в неудовлетворительном состоянии в пределах чердачного пространства находятся дымоходы ранее существующей системы печного отопления здания.

*Заполнения оконных и дверных проемов* полностью потеряли свои эксплуатационные качества и подлежат полной замене. Подоконные сливы поражены ржавчиной, частично разрушены.

*Полы* здания в результате физического износа потеряли свои эксплуатационные качества и подлежат полной замене.

*Инженерные сети и коммуникации* (водопровод, канализация, система отопления, электросети) потеряли свои эксплуатационные качества и подлежат полной замене.

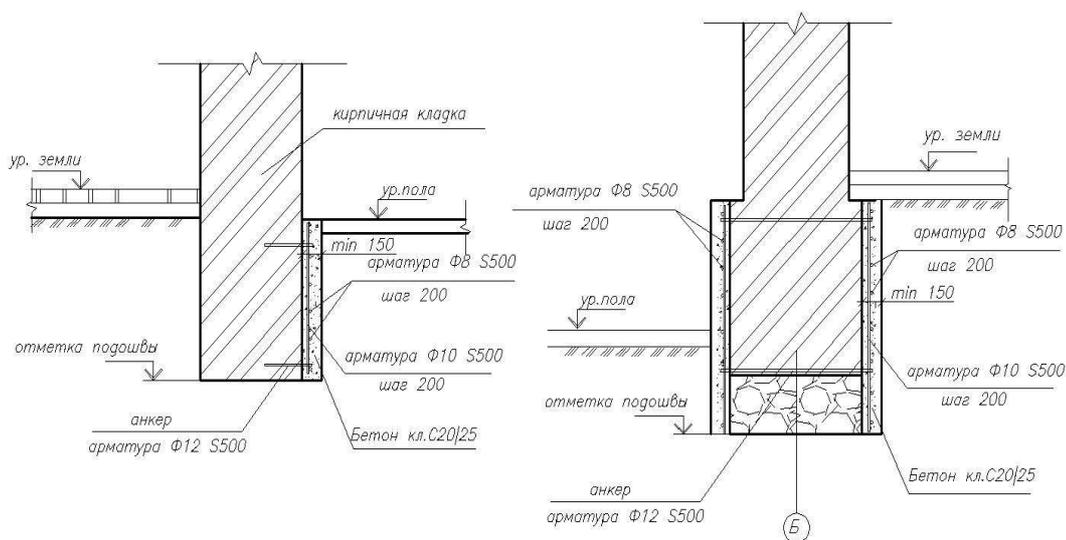
**Рекомендации по ремонту и усилению конструкций здания. Фундаменты.** На основании результатов обследования и выполненных расчетов на предполагаемые проектные нагрузки, а также для предотвращения разрушения фундаментов необходимо выполнить их усиление путем устройства армированной набетонки. Схема расположения мест усиления фундаментов и стен подвала показана на рисунке 12. Конструктивные решения усиления фундаментов показаны на рисунке 13.



**Рисунок 12. – Схема усиления фундаментов**

Рекомендуемое закрепление кирпичной кладки фундаментов устройством железобетонной набетонки.

Рекомендуемое закрепление кирпичной и бутовой кладки фундаментов устройством железобетонной обкладки.



1. Производство работ по усилению фундаментов выполнять по технологическим картам разработанным и утвержденным на данный вид работ.
2. Отрыв грунта около фундамента выполнять захватками не более 2 метров, чередуя их через 2 метра (через захватку).

**Рисунок 13. – Конструктивные решения усиления фундаментов**

*Стены.* Наружные стены здания за исключением стены по оси Б, в целом, находятся в удовлетворительном состоянии – II категория. Исключение составляют местные участки стен здания имеющие повреждения наружного отделочного слоя, которые подлежат ремонту. Кроме того, необходимо выполнить ремонт кирпичной кладки торцевых стен по осям 1 и 5 в местах расположения каналов дымоходов. Наружная стена по оси В имеет ряд дефектов и повреждений и находится, в не вполне удовлетворительном состоянии – III категория. Внутренние несущие стены:

– стены лестничной клетки в осях 2–3 / А–Б в целом находятся в удовлетворительном состоянии и характеризуются II-й категорией. Исключение составляет участок стены 3-го этажа по оси 2 над дверным проемом – требуется перекладка поврежденного участка;

– стена по оси 3 в осях Б–В имеет повреждения в виде образования трещин, выпадение кирпича из кладки в местах расположения дымоходов. Стена на этом участке характеризуется III-й категорией – требуется выполнение ремонтных мероприятий;

– стена по оси 4 в осях Б–В в уровне 1-го этажа, в целом, находится в удовлетворительном состоянии и характеризуется II-й категорией;

– стена по оси Б в осях 1–3 имеет многочисленные повреждения в виде образования трещин, выпадение кирпича из кладки в местах расположения дымоходов и ослаблена большим количеством дверных проемов. Стена на этом участке находится в неработоспособном (неудовлетворительном) состоянии – IV категория. Требуется полная перекладка стены.

Ремонт поврежденных участков наружных стен (фасадов) необходимо выполнить путем очистки наружного отделочного слоя до кирпичной кладки и последующего его восстановления полимерцементными ремонтными составами. В местах образования трещин выполнить их разделку, зачеканку (инъектирование) и восстановление штукатурного слоя. Ремонт наружных и внутренних стен в местах расположения каналов дымоходов ранее существующей системы отопления (с внутренней стороны) выполнить в следующей последовательности: разобрать поврежденную кирпичную кладку каналов дымоходов (наружную версту); восстановить кирпичную кладку стен с одновременным заполнением каналов дымоходов мелкозернистым бетоном С16/20.

Шахты дымоудаления ранее существующей системы печного отопления, в пределах чердачного пространства, подлежат разборке.

Ремонт участка внутренней стены 3-го этажа по оси 2 (над выходом с лестничной площадки) рекомендуется выполнить в следующем образом: 1) разобрать участок поврежденной кладки; 2) подвести железобетонную или стальную перемычку над дверным проемом; 3) восстановить кирпичную кладку поврежденного участка.

Ремонт подоконных участков наружных стен, имеющих разрушения выполнить путем разборки кирпичной кладки, не имеющей сцепления кирпича с раствором, и перекладки поврежденных участков.

Ремонт кирпичных клинчатых перемычек:

– при незначительных трещинах – установка металлических клиньев и зачеканка трещин цементным раствором;

– при значительных повреждениях – разборка с устройством новых кирпичных перемычек или подведение новых стальных или железобетонных перемычек. Деревянные перемычки подлежат замене на кирпичные клинчатые, железобетонные или стальные.

После выполнения всех ремонтных мероприятий по стенам и устройства дисков монолитных железобетонных перекрытий (над подвалом, междуэтажных, чердачного) для повышения пространственной жесткости здания и повышения прочностных характеристик стен штукатурку всех внутренних поверхностей стен выполнить по стальной сетке. При этом порядок выполнения ремонтных работ следующий:

1) выполнить очистку поверхностей стен от старой штукатурки и разрушенного наружного слоя кирпичной кладки;

2) закрепить стальную штукатурную сетку из проволоки Ø 2 мм с ячейкой 50 × 50 мм на ремонтируемые поверхности при помощи дюбелей Ø 4–5 мм, длиной 80–100 мм и стальных шайб Ø 20–30 мм;

3) восстановить отделочный штукатурный слой из ремонтных полимерцементных составов (например, РСС М150 F100 Пк2 СТБ 1307-2012 или ФАСИ РМ).

*Перекрытия.* Перекрытие над подвалом:

– перекрытие в осях 1–2 / Б–В (из мелкогазобетонных ребристых плит по стальным балкам) находится в удовлетворительном состоянии – II категория;

– перекрытие в осях 2–3 / Б–В (монолитное железобетонное по стальным балкам) находится в не вполне удовлетворительном состоянии – III категория.

Требуется выполнить очистку от коррозии и окраску защитными покрытиями стальных балок перекрытия; устроить защитную штукатурку бетонных и стальных поверхностей перекрытия ремонтными полимерцементными составами; перекрытие в осях 4–5 / Б–В (деревянное балочное) потеряло свои эксплуатационные качества и характеризуется IV-й категорией. Требуется полная замена перекрытия.

Перекрытие над проходом в осях 3–4 сводчатое кирпичное по стальным балкам, в целом, находится в удовлетворительном состоянии и характеризуется II-й категорией. Исключением является участок у оси В (два крайних шага) в которых образовались трещины осадочного характера. Требуется разделать трещины, выполнить их заделку полимерцементными ремонтными составами и восстановить штукатурный слой.

Междуэтажные деревянные перекрытия находятся в неудовлетворительном состоянии (зыбкость, прогибы, поражение досок пола гнилью, поражение гнилью опорных участков деревянных несущих балок) – IV категория. Требуется их полная замена на монолитные железобетонные, что позволит значительно увеличить пространственную жесткость здания и его долговечность.

Чердачное перекрытие находится в неудовлетворительном состоянии (V категория). Требуется его полная замена на монолитное железобетонное.

Для повышения пространственной жесткости здания и его долговечности рекомендуется устроить вместо ранее существующих деревянных балочных перекрытий монолитные железобетонные перекрытия. Более технологичным при устройстве перекрытий может быть вариант с использованием несъемной опалубки из профилированного настила. Для обеспечения совместной работы стен здания с дисками перекрытий следует предусмотреть точечную анкеровку монолитных перекрытий к стенам путем установки сквозных анкеров. Анкеры установить в уровне перекрытий из арматуры S500 Ø 12–14 мм с шагом 1000–1200 мм по всему периметру здания. Затяжку анкеров производить при помощи гаек через опорные пластины 100 × 100 мм толщиной 10 мм. Опорные пластины устанавливаются в гнездах и после обжатия гайками опорные узлы заделываются раствором.

*Балконные плиты.* В уровне 3-го этажа по оси В в осях 1–2 и 3–4 находятся в удовлетворительном состоянии – II категория. Требуется ремонт балконов с очисткой и восстановлением штукатурного слоя плит, разборкой существующих и устройством новых покрытий пола, зачисткой и окраской элементов ограждения, установкой поручней ограждений.

*Лестница.* В основном находится в удовлетворительном состоянии и характеризуется II-й категорией. Необходимо выполнить ремонт ступеней, очистку и окраску металлических ограждений, установку поручней ограждений.

*Деревянная стропильная система и кровля.* В результате длительной эксплуатации деревянная стропильная система получила многочисленные дефекты и повреждения и находится в неудовлетворительном состоянии – IV категория. Требуется капитальный ремонт с полной заменой элементов стропильной системы.

Кровля из листовой стали имеет многочисленные протечки, разрушение фальцевых соединений и примыканий. Требуется капитальный ремонт с полной заменой кровли.

Кроме того, для дальнейшей нормальной эксплуатации здания требуется:

- полная замена инженерных сетей и коммуникаций (водопровод, канализация, отопление, электросети);
- полная замена заполнений оконных и дверных проемов;
- капитальный ремонт входов в здание и подвал;
- восстановление отмостки по всему периметру здания с соблюдением уклонов и организацией удаления талых и ливневых вод от здания при помощи лотков.

**Заключение.** В результате проведенного технического обследования строительных конструкций здания, выполненных поверочных расчетов перекрытий, фундаментов и балочных плит, определения прочности бетона монолитного железобетонного перекрытия, определения прочности материалов для кладки стен и анализа полученных результатов сделаны выводы о техническом состоянии конструкций, даны соответствующие рекомендации, необходимые для его дальнейшей реконструкции.

В частности, предложена схема конструктивного усиления каменных фундаментов, даны рекомендации по ремонту поврежденных участков наружных (фасадов) и внутренних стен в местах расположения каналов дымоходов ранее существующей системы отопления. Междуэтажные перекрытия рекомендовано для повышения пространственной жесткости здания и его долговечности устроить из монолитного железобетона вместо ранее существующих деревянных балочных перекрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко, К.Г. Памятник как социальный феномен : автореф. дис. ... канд. филос. наук : 09.00.11 / К.Г. Кравченко ; Волгогр. гос. ун-т. – Волгоград, 2008. — 22 с.
2. Мартыненко, И.Э. Правовая охрана историко-культурного наследия в государствах Таможенного союза в рамках Евразийского экономического сообщества / И.Э. Мартыненко. – М. : ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014 – 287 с.
3. Мартыненко, И.Э. Международная и национальные правовые системы охраны историко-культурного наследия государств-участников СНГ : учеб. пособие / И.Э. Мартыненко. – М. : ИКД «Зерцало-М», 2012. – 943 с.

4. «Будет как 100 лет назад»: трехэтажное здание РОВД в Витебске переделают в особняк для одной семьи [Электронный ресурс] // TUT.BY: Новости Витебска и Витебской области. – Режим доступа: <https://realty.tut.by/news/building/610452.html>. – Дата доступа: 12.10.2018.
5. Бакатович, А.А. Реставрация с реконструкцией домика Петра I в городе Полоцке на основе применения неразрушающих методов контроля при техническом обследовании здания / А.А. Бакатович, Н.В. Давыденко, А.М. Иваненко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 16. – С. 121–130.
6. Rehabilitation of historical masonry buildings in Belorussia: The House of Peter the Great in Polotsk and Liubcha castle case studies / A. Bakatovich [et al.] // Non-Destructive Techniques for the Assessment and Preservation of Historic Structures / L. Gonçaves [et al.] ; edit. by L. Gonçaves, H. Rodrigues, F. Gaspar. – CRC Press Taylor & Francis Group, 2017. – P. 173–194.
7. Платонова, Р.М. Архитектурно-конструктивное решение усадебного дома А.А. Римского-Корсакова в деревне Бездедовичи Полоцкого района / Р.М. Платонова, В.Г. Лукьяненко, А.Т. Зеленков // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 16. – С. 10–14.
8. Здания и сооружения. техническое состояние и обслуживание строительных конструкций и инженерных систем и оценка их пригодности к эксплуатации. Основные требования : ТКП 45-1.04-208-2010(02250) ; Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск, 2011. – 23 с.

Поступила 20.12.2020

#### ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDING STRUCTURES OF A HISTORIC BUILDING IN THE CITY OF VITEBSK FOR FURTHER RECONSTRUCTION

**R. PLATONOVA, A. ZELENKOV**

*The volume-planning and constructive solution of the historical building located on Krylova Street, 4 in Vitebsk is considered. Based on the technical survey of the building obtained after visual and instrumental inspection of building structures, performed verification calculations and analysis of the results obtained, conclusions are drawn about the technical condition of the structures and appropriate recommendations are given for its further reconstruction. In particular, the scheme of structural reinforcement of stone foundations is proposed; recommendations are given for repair of damaged sections of external walls (facades) and internal walls in the locations of channels of chimneys of the previously existing heating system; it is recommended to arrange inter-floor floors to increase the spatial rigidity of the building and its durability from monolithic reinforced concrete instead of previously existing wooden beam ceilings.*

**Keywords:** *historical building, technical survey, building structures, floor, foundation, walls, recommendations, reconstruction.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕОДЕЗИЯ

<i>Бондаренко В.А.</i> Система государственной регистрации недвижимого имущества Республики Беларусь и ее соответствие международным стандартам .....	2
<i>Долгий П.С.</i> ГИС-проект «Геодинамика Беларуси» .....	8
<i>Парадня П.Ф., Мысливец М.С.</i> Разработка и использование симуляторов геодезических приборов .....	16

### ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Конькова В.М.</i> Оценка изменения содержания углерода в мертвой биомассе лесов .....	20
<i>Мелех Д.В.</i> Разработка модели расчета выбросов парниковых газов в категории «Производственные отрасли и строительство» сектора «Энергетика» .....	25

### СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Азаров С.М., Азарова Т.А., Дробыш А.А., Евтухова Т.Е., Балыдко Д.Н., Петюшик Е.Е., Леоник Д.Л.</i> Исследование керамических пористых материалов с селективными слоями из алюмооксидных микросфер .....	37
<i>Волочко А.Т., Подболотов К.Б., Хорт Н.А., Манак П.И.</i> Влияние комплексных видов отошителей и цветонесущего сырья на свойства изделий строительной керамики .....	42
<i>Волочко А.Т., Азаркова Е.А., Хорт Н.А., Манак П.И.</i> Исследование влияния высококалорийных и низкокалорийных выгорающих добавок на характеристики поризованной керамики .....	47
<i>Горелая О.Н., Будейко Н.Л., Романовский В.И.</i> Магнитный сорбент из отходов водоподготовки для удаления нефтепродуктов из водных сред .....	52
<i>Гребенчук П.С., Мытько Д.Ю.</i> Исследование движения газового потока в циклоне с рециркуляционным контуром .....	58
<i>Давыдовская В.В., Ефимчик И.А., Данченко Е.В.</i> Применение современных интегрированных пакетов для решения прикладных задач в строительном процессе .....	63
<i>Задоянный А.В., Евдокименко Ю.Н.</i> Углубленный эксергетический анализ основных психрометрических процессов в системах кондиционирования воздуха .....	71
<i>Комаров М.А., Короб Н.Г., Романовский В.И.</i> Синтез дигидрата сульфата кальция из техногенного сырья .....	76
<i>Мазурак О.Т., Мазурак А.В., Журавская Н.Е., Марущак У.Д.</i> Особенности влияния нанодобавок на свойства быстротвердеющих бетонов .....	83
<i>Мищенко А.С., Акулич В.А.</i> Использование модели коррекции ошибкой (ЕСМ) для прогнозирования экономического роста в строительной отрасли .....	88
<i>Моняк Т.М., Кульбицкая Л.В., Романовский В.И.</i> Анализ перспектив использования отходов гальванических производств .....	96
<i>Платонова Р.М., Зеленков А.Т.</i> Оценка технического состояния строительных конструкций исторического здания в Витебске для дальнейшей реконструкции .....	103