

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

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

№ 2(37), 2024

---

---

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, экологической безопасности строительства и городского хозяйства, строительства и архитектуры.

---

---

ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСИТЭТА  
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, экалагічнай бяспекі будаўніцтва і гарадской гаспадаркі, будаўніцтва і архітэктуры.

---

---

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

The F series of the scientific and theoretical journal publishes peer-reviewed articles containing new scientific results in the field of geodesy, geoecology, environmental safety of construction and urban economy, construction and architecture.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Электронная версия номера размещена на сайте: <https://journals.psu.by/constructions>

Адрес редакции:  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 41, e-mail: [vestnik@psu.by](mailto:vestnik@psu.by)

Отв. за выпуск: А.М. Няшковский.  
Редактор А.А. Прадидова.

Подписано к печати 28.06.2024. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 13,46. Тираж 50 экз. Заказ 227.

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 69.057

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-2-8

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ РАЗВИТИЯ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БАЗЫ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ДОМОСТРОЕНИЯ

**В.Ю. ГУРИНОВИЧ<sup>1)</sup>,**  
**д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ<sup>2)</sup>,**  
**Д.А. ПОЗДНЯКОВ<sup>3)</sup>**

*(<sup>1), <sup>2)</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск,</sup>*

*<sup>3)</sup> Республиканское унитарное предприятие «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С.С.», Минск)*

*<sup>1)</sup> ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8773-6149>, [gurinovich@bntu.by](mailto:gurinovich@bntu.by),*

*<sup>2)</sup> ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4026-820X>, [sleonovich@bntu.by](mailto:sleonovich@bntu.by),*

*<sup>3)</sup> ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1247-5655>, [pozddzm@mail.ru](mailto:pozddzm@mail.ru)*

*В статье предложен подход повышения технологического уровня производства на основе систематизации основных задач и решений технического перевооружения действующих предприятий индустриального домостроения. Принцип реализации предлагаемого системного подхода представлен в виде блок-схемы, которая демонстрирует практическую значимость учета взаимосвязи строительных и производственных процессов для проведения технического перевооружения без остановки основного производства и сокращения продолжительности строительно-монтажных работ. Приведены решения для повышения производственной мощности предприятий в условиях действующих производств для линий циркуляции паллет и компенсации возрастающего спроса на бетонную смесь при росте производительности линий. Для технологических линий циркуляции паллет обоснована эффективность организации процессов, превышающих директивный ритм на постах, не связанных с основным потоком и с индивидуальным ритмом работы. Показана функциональность размещения в пролете локального растворобетонного узла блочно-модульной компоновки для повышения производительности и ритмичности работы формовочных постов.*

**Ключевые слова:** *жилищное строительство, индустриальное строительство, предприятия индустриального домостроения, производство сборных железобетонных конструкций, сборные железобетонные конструкции, организация производства, номенклатура изделий, производственная мощность предприятий, производственная программа строительства, техническое перевооружение производства.*

**Введение.** Технологический уровень предприятий индустриального домостроения зависит от своевременного обновления активной части основных фондов и внедрения прогрессивных технологий. Недостаточный уровень проработки технико-экономических решений, завышенные показатели проектных мощностей без учета и анализа базы вспомогательных производственных участков, внедрение новых технологий с современным уровнем автоматизации и роботизации без разработки организационно-технологических решений управления ими определены в качестве основных причин срыва сроков и роста финансирования проектов реконструкции и технического перевооружения производств, недоосвоения проектных мощностей предприятий [1–7].

Эффективность проведения технического перевооружения как основного метода перехода индустриального домостроения на современный высокотехнологичный и качественный уровень подтверждается результатами исследований, представленными в [8–10]. Тем не менее, большое разнообразие организационно-технологических решений технического перевооружения действующих предприятий требует детального изучения и систематизации опыта разработки, применения инновационных решений организации и управления производством на этапе строительно-монтажных работ и ввода в эксплуатацию.

На основании вышесказанного сформулированы следующие основные задачи технического перевооружения производств<sup>1</sup> [8; 10–12]:

- внедрение прогрессивных, высокотехнологичных производственных линий и инновационных подходов организации производства на основе гибкой технологии для обеспечения строительства домов современных серий с широкой номенклатурой изделий и минимизации затрат при модернизации серий домов;
- увеличение производственных мощностей предприятий;
- доведение освоения производственных мощностей предприятий до 100% путем ликвидации «узких мест»;
- снижение энергоемкости, материалоемкости производства и внедрение ресурсосберегающих технологий для сокращения производственных затрат и повышения экономической эффективности индустриального домостроения.

<sup>1</sup> Джалилов Ф.Ф. Разработка методов формирования организационно-технологических решений по реконструкции действующих предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08. – М., 1996. – 356 л.

Обобщая сформулированные задачи, можно утверждать, что современные требования к организации производства широкой номенклатуры изделий нуждаются в совершенствовании и оптимизации известных подходов повышения технологического уровня производственных баз индустриального домостроения.

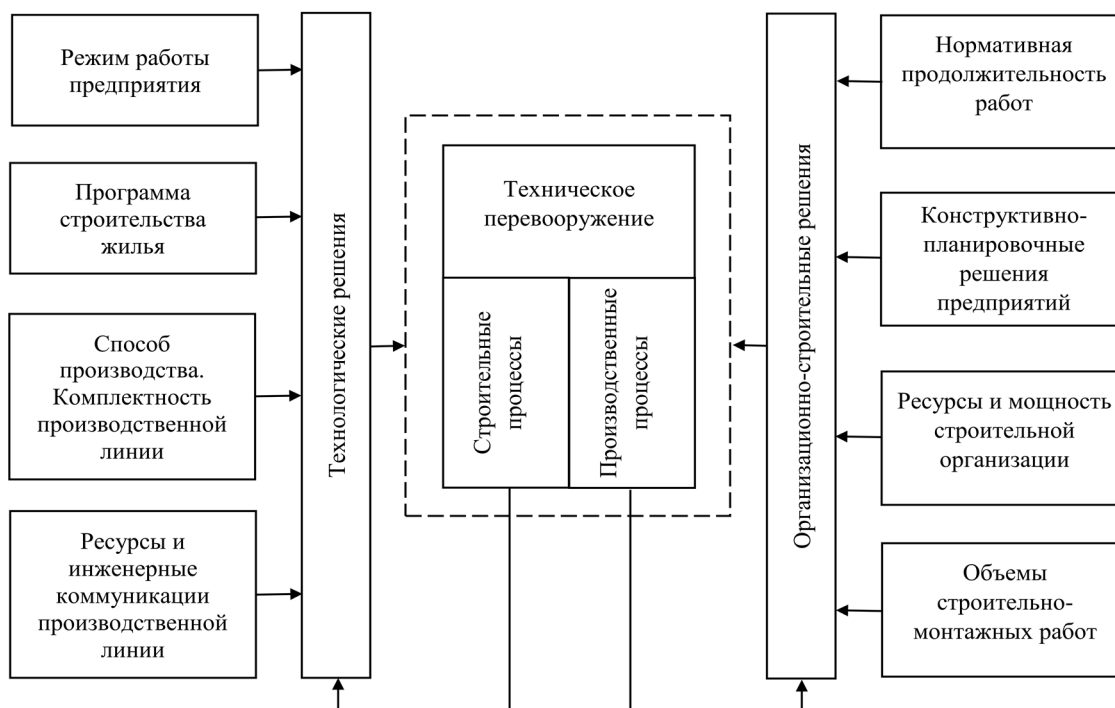
**Основные подходы повышения технологического уровня производства.** В результате анализа работ<sup>2</sup> [8] были определены первоочередные подходы для сокращения продолжительности строительно-монтажных работ, снижения затрат и издержек на их выполнение, ввода в эксплуатацию производственных линий и перехода на гибкую технологию:

- проведение технического перевооружения основного производства без остановки выпуска продукции для выполнения предприятиями обязательств по заключенным договорам;
- проведение технического перевооружения без увеличения производственных площадей с сохранением прежних конструктивных систем зданий, грузоподъемности кранового хозяйства для уменьшения трудоемкости и продолжительности строительно-монтажных работ.

Реализация первого подхода требует определения взаимосвязи и рационального баланса между строительными и производственными процессами на стадии технического перевооружения. Принцип реализации такого подхода представлен в виде блок-схемы на рисунке 1.

Актуальность данных требований обусловлена тем, что проведение строительных процессов в сжатые сроки требует концентрации трудовых ресурсов и строительной техники в цехах, что может приводить к стесненности, неравномерности выпуска продукции, простоям производства и стать причиной полной остановки производственного процесса. Это приводит к невыполнению обязательств в рамках заключенных договоров, срыву программы строительства жилья, и, как следствие, ухудшению финансового положения предприятий.

С другой стороны, обеспечение максимального выпуска продукции требует полного использования производственных площадей и ресурсов, что приводит к сужению фронта работ, неравномерности использования строительной техники и ее простоя, ограничению использования оптимальных комплектов строительных машин и поточной организации строительно-монтажных работ. Это является причиной существенных экономических потерь строительных организаций, которые в ряде случаев не компенсируются действующими поправочными коэффициентами сметных норм.



**Рисунок 1. – Принципиальная схема взаимосвязи строительных и производственных процессов при организации технического перевооружения действующих предприятий**

Таким образом, учет взаимосвязи и баланса между строительными и производственными процессами является необходимым критерием проведения работ без остановки основного производства, совмещения строительно-монтажных работ с выпуском продукции. Это реализуется на основе методов и решений технико-экономической увязки сроков производства работ, требований к последовательности работ, показателей производственной мощности, комплектности технологических линий и номенклатуры изделий.

<sup>2</sup> См. сноску 1.

**Мероприятия увеличения производственных мощностей на площадях действующих предприятий.** При техническом перевооружении действующих предприятий центральными становятся вопросы увеличения производственной мощности в условиях сложившейся инфраструктуры предприятий. Габаритные размеры пролетов при этом являются основным ограничивающим параметром проектных решений размещения современных производственных линий и оборудования на площадях действующих производств [8; 10; 13].

Увеличение производительности технологических линий для обслуживания и обеспечения бесперебойной работы производства вызывает потребность в дополнительных площадях для нормативного хранения расходных и комплектующих материалов, отделки и выдержки изделий, размещения дополнительного оборудования и бортоснастки, обеспечения требуемой дифференцированности технологического процесса для достижения проектных параметров работы линий. С учетом этого, разработка подходов организации производства и решений компоновки технологических линий, обеспечивающих рост показателей съема изделий с 1 м<sup>2</sup> площади, является важной задачей в условиях действующих производств.

Так, при увеличении числа технологических постов с 6–7 до 11–12 на конвейерных производственных линиях наружных трехслойных стеновых панелей можно сократить технологический ритм от 25–30 до 18–20 мин и при этом увеличить производительность линий [14]. Однако в условиях действующих производств реализация такого подхода требует увеличения длины пролета цеха.

Известны решения увеличения производственных мощностей и повышения степени их освоения за счет расширения производственных площадей и установки дополнительного оборудования, дублирующего уже имеющееся [8]. Однако реализация такого подхода для действующих предприятий индустриального домостроения со сложившейся инфраструктурой в современных условиях весьма затруднительна по следующим причинам:

- ограниченные возможности привязки новых производственных зданий к существующей инфраструктуре производственной базы предприятия;
- большие капитальные вложения на возведение новых производственных площадей, увеличение сроков технического перевооружения при ограниченных финансах предприятий;
- ограниченные возможности организации грузовых потоков материалов и готовой продукции в стесненных условиях действующих предприятий;
- невозможность расширения санитарно-защитной зоны предприятий за счет увеличения площадей основных производств при размещении предприятий в городской черте.

Вследствие этого приоритетным направлением увеличения мощности предприятий является разработка принципиально новых подходов к компоновочным решениям производств в условиях сложившейся производственной инфраструктуры, внедрение высокопроизводительного технологического оборудования и прогрессивных форм организации производства.

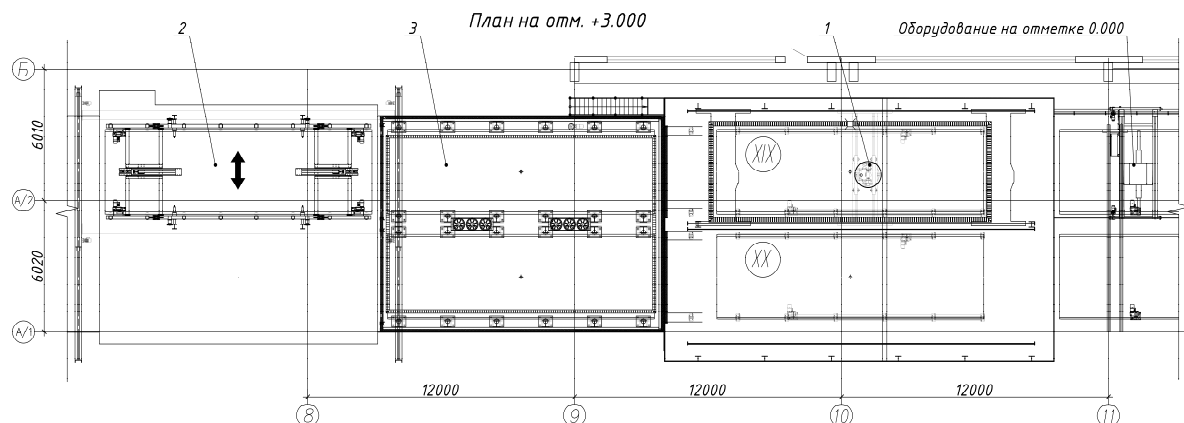
Обеспечение прироста производственной мощности предприятий достигается внедрением гибкой технологии производства за счет высвобождения производственных участков, задействованных для хранения и переналадки бортоснастки. Это позволяет сократить ритм работы линий за счет большей дифференцированности производственного процесса.

Для непрерывности и ритмичности работы линий циркуляции паллет должны быть предусмотрены резервные участки для наиболее трудоемких операций за счет распараллеливания потоков или организации технологических постов, не связанных с основным производственным потоком. Для решения этих задач в [2; 3] предложено устройство буферных зон или накопителей паллет. Однако накопители требуют дополнительных производственных площадей, запасов материалов или полуфабрикатов. Такие организационные решения практически не реализуемы на действующих производствах отечественных предприятий ввиду ограниченной производственной площади унифицированных пролетов и приводят к увеличению капитальных затрат.

Предложен и внедрен подход создания независимого потока на отдельном ярусе для операций с наибольшей трудоемкостью и продолжительностью выше директивного ритма. Подтверждена эффективность организации постов для операций, превышающих директивный ритм на этажерках или обособленных постах, не связанных с основным потоком и с индивидуальным ритмом работы. Данный подход реализован при технологическом проектировании действующего производства (рисунок 2).

Компоновка линии предусматривает выделение в отдельный поток доводки поверхности изделия заглаживающей машиной. Решение продиктовано превышением продолжительности для данного процесса директивного ритма вследствие повышения требований к качеству поверхности изделий. Также перед механической доводкой поверхности требуется предварительная выдержка изделий на постах линии. Таким образом, организация доводки поверхности изделия затирочной машиной в общем потоке требует дополнительных постов, количество которых регламентируется директивным ритмом работы линии, комплектации линии двумя или более заглаживающими машинами для соответствия производства работ директивному ритму.

Организация работы поста доводки поверхности изделий на отдельном ярусе обеспечивается увязкой потока с камерами тепловлажностной обработки. Паллета с отформованным изделием подается в камеру тепловлажностной обработки, где штабелером перемещается в определенную ячейку. После схватывания цемента штабелер извлекает паллету с изделием из ячейки и подает ее на пост доводки изделий заглаживающей машиной, который расположен над технологической линией на этажерке. При этом продолжительность данного технологического периода не регламентирована директивным ритмом работы линии, выполняется до заданного качества поверхности изделия, а режим работы данного передела назначается исходя из производственной программы.



1 – заглаживающая машина поверхности отформованных изделий; 2 – штабелер камеры тепловлажностной обработки; 3 – секция вертикальной камеры тепловлажностной обработки

Рисунок 2. – Схема организации доводки поверхности изделий заглаживающей машиной на этажерке

Увеличение количества формовок достигается внедрением современного формовочного и вибрационного оборудования. Рост потребности в бетонных смесях нивелируется бетоносмесителями большего объема с комплектом дозаторов, переориентацией работы бетоносмесительного цеха только на выдачу бетонных смесей в цех. Бетонная смесь подается оперативно и адресно к формовочным постам или бетоноукладчикам в специальных кубелях, скорость перемещения которых на прямолинейных участках может достигать 150 м/мин. Но наиболее эффективным решением увеличения производительности формовочных постов является вариант локального размещения раствобетонных узлов (далее – РБУ) непосредственно в пролете цеха. При таком решении подача сырьевых компонентов бетонной смеси осуществляется от действующего бетоносмесительного цеха либо организацией оперативных индивидуальных складов при РБУ.

Предложена схема организации приготовления бетонных смесей в пролете формовочного цеха с применением РБУ блочно-модульной компоновки. Схема организации производства приготовления и выдачи бетонных смесей непосредственно в бункер бетоноукладчика представлена на рисунке 3.

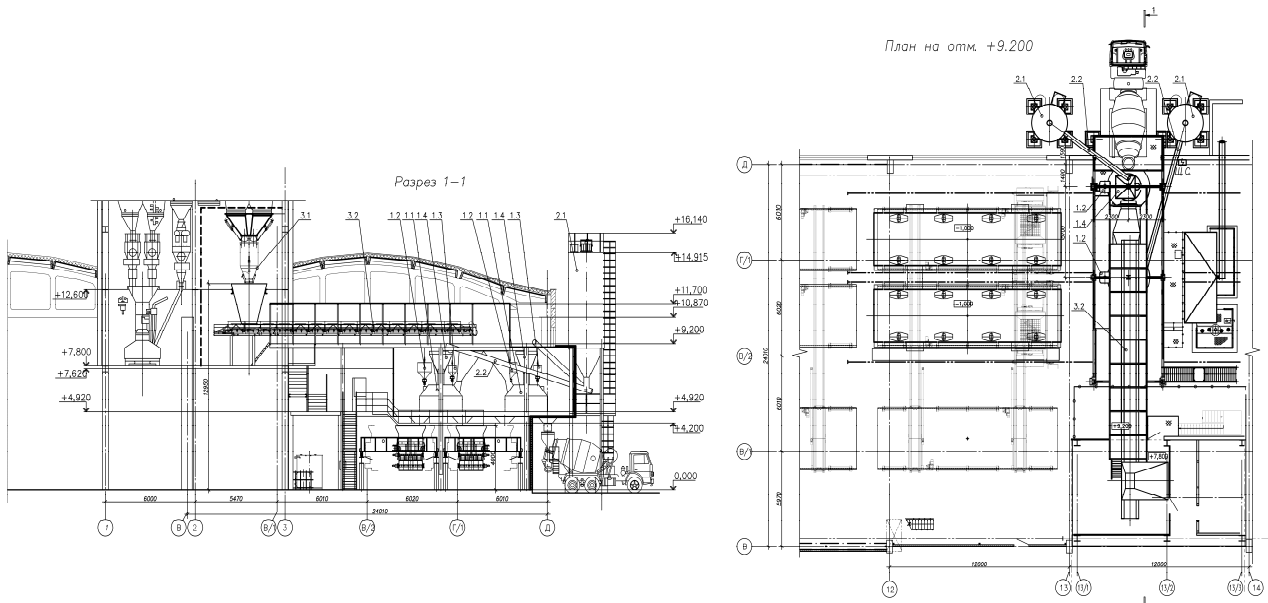
Реализация данного решения на практике достигается размещением бетоносмесительного модуля РБУ в торце пролета и увязкой подачи сырьевых компонентов из одной секции бетоносмесительного цеха предприятия. При этом работа данной секции в дальнейшем ориентирована сугубо на обслуживание и обеспечение функционирования локального РБУ. Технологическая схема организации работы локальных РБУ представлена на рисунке 4.

Бетоносмесительный модуль комплектуется двумя бетоносмесителями и дозаторами вяжущего, воды и химических добавок. Тракт подачи заполнителей от емкостей весового дозатора действующего бетоносмесительного цеха организуется ленточным конвейером-дозатором. Тем самым реализуется двухстадийная система дозирования, которая позволяет повысить точность дозирования и качество бетонных смесей.

Подача вяжущего в расходные силосы хранения осуществляется по цементопроводу. Для этого в магистральный цементопровод от склада цемента в бетоносмесительный цех делается врезка отдельной ветви. В расходных силосах организуется нормативный запас цемента. Далее цемент шнековыми питателями подается в емкость весового дозатора и выгружается в бетоносмеситель. Возможно размещение модуля хранения цемента непосредственно в пролете. В отличие от представленной компоновочной схемы это дополнительно требует демонтажа отдельных элементов покрытия.

Вода и химические добавки в дозаторы бетоносмесительного модуля подаются по трубопроводам с участка хранения и приготовления химических добавок, который размещается рядом с РБУ.

Эффективность такого варианта компоновки подтверждается результатами анализа работы локального РБУ в пролете цеха действующего производства. Выгрузка бетонной смеси осуществляется непосредственно в бетоноукладчик, что исключает из грузовых потоков адресную подачу бетонной смеси к формовочным постам и сокращает время подачи бетонной смеси, обеспечивает ритмичность работы производственной линии, упрощает требования к организационным решениям работы производственной линии.



1.1 – бетоносмеситель; 1.2 – дозатор химических добавок; 1.3 – дозатор воды; 1.4 – дозатор цемента; 2.1 – силос цемента; 2.2 – шнековый питатель; 3.1 – дозатор инертных материалов; 3.2 – ленточный конвейер-дозатор

Рисунок 3. – Схема организации приготовления и выгрузки бетонных смесей в бункер бетоноукладчика

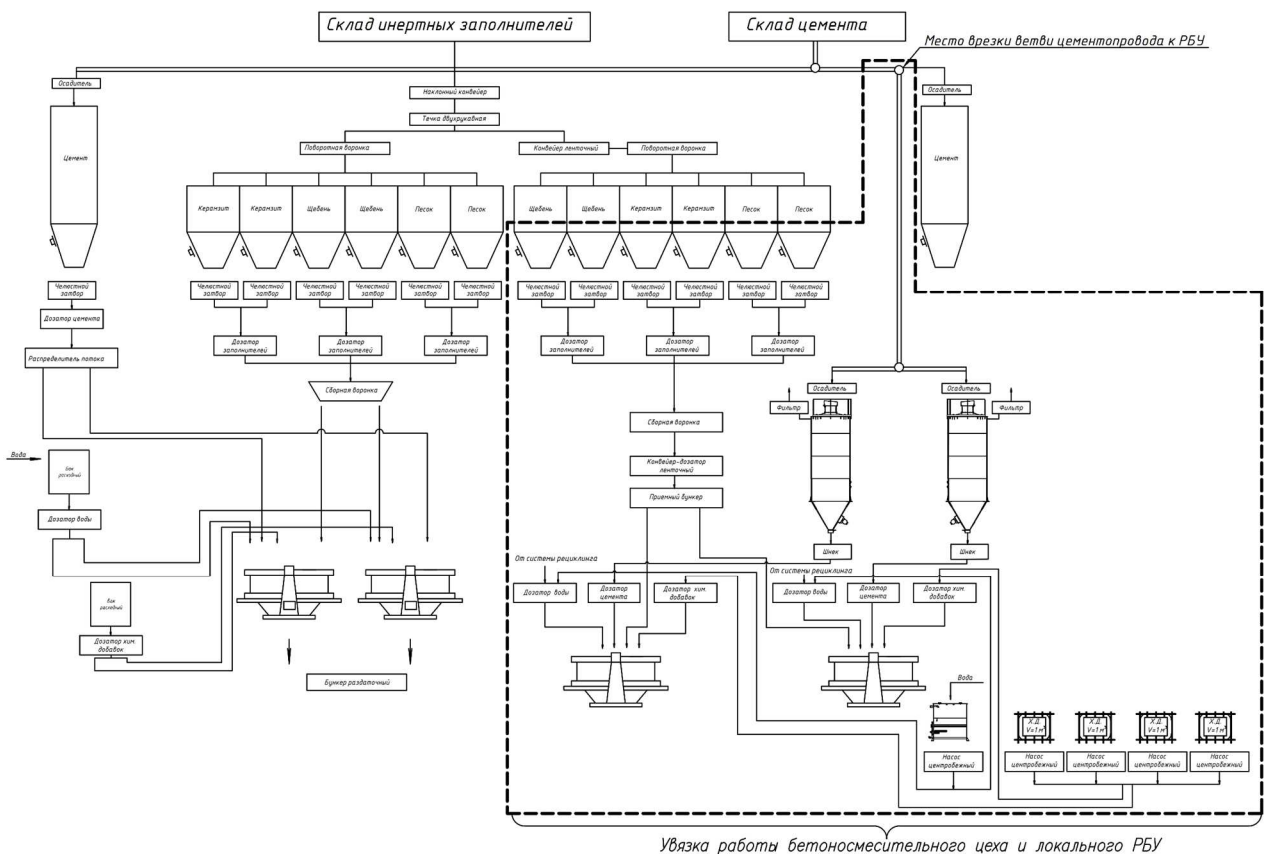


Рисунок 4. – Технологическая схема организации работы секции действующего бетоносмесительного цеха и локального РБУ

**Заключение.** На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Основываясь на сформулированных основных задачах и подходах повышения технологического уровня производства разработана блок-схема, отражающая практическую значимость учета взаимосвязи строительных и производственных процессов для сокращения продолжительности строительного-монтажных работ и проведения технического перевооружения без остановки основного производства.

2. В качестве основного подхода обеспечения роста производственной мощности определено внедрение на предприятиях индустриального домостроения гибкой технологии производства на базе высокопроизводительного технологического оборудования и прогрессивных форм организации производства. Основным ограничивающим фактором проектных решений достижения плановых показателей производственной мощности с учетом сложившейся производственной инфраструктуры предприятий являются габаритные размеры цехов.

3. Предложены два решения для повышения мощности предприятий на действующих производственных площадях. Первое направлено на повышение производительности линий циркуляции паллет, а второе – на компенсацию возрастающего спроса на бетонную смесь при росте производительности линий. Обоснована для линий циркуляции паллет эффективность организации процессов, превышающих директивный ритм на постах, не связанных с основным потоком и с индивидуальным ритмом работы. Практическая реализация размещения в пролете локального РБУ блочно-модульной компоновки обосновала функциональность данного подхода для повышения производительности и ритмичности работы формовочных постов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуринович В.Ю., Леонович С.Н., Поздняков Д.А. Производственный потенциал базы индустриального домостроения Республики Беларусь // Вестн. БрГТУ. – 2023. – № 1(130). – С. 3–6. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-130-1-3-6.
2. Li X., Li Z., Wu G. Lean precast production system based on the CONWIP method // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2018. – Vol. 22. – P. 2167–2177. DOI: 10.1007/s12205-017-2009-4.
3. Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete Event Simulation / Z. Yuan, Y. Qiao, Y. Guo et al. // *Advances in Civil Engineering*. – 2020. – Vol. 2020(2). DOI: 10.1155/2020/8814914.
4. Wang Z., Hu H., Zhou W. RFID enabled knowledge-based precast construction supply chain, computer-aided civil and infrastructure, Engineering // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. – 2017. – Vol. 32, № 6. – P. 499–514. DOI: 10.1111/mice.12254.
5. Optimization of Flow Shop Scheduling in Precast Concrete Component Production via Mixed-Integer Linear Programming / Z. Liu, Zh. Liu, M. Liu et al. // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 2021(1). DOI: 10.1155/2021/6637248.
6. Liu Zh., Zhang Y., Li M. Integrated scheduling of ready-mixed concrete production and delivery // *Automation in Construction*. – 2014. – Vol. 48. – P. 31–43. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.08.004.
7. Algorithms for in-situ production layout of composite precast concrete members / W.-K. Hong Hong, G. Lee, S. Lee et al. // *Automation in Construction*. – 2014. – Vol. 41. – P. 50–59. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.02.005.
8. Граник Ю.Г., Полтавцев С.И. Реконструкция и техническое перевооружение предприятий полносборного домостроения. – М.: Стройиздат, 1989. – 271 с.
9. Швейко Н.В. Экономическое обоснование реконструкции и технического перевооружения действующих предприятий. – М.: Стройиздат, 1989. – 64 с.
10. Гусев Б.В. Автоматизированные технологические линии по производству сборного железобетона. – Ижевск: КИТ, 2015. – 70 с.
11. Леонович С.Н., Гуринович В.Ю. Технологическое проектирование реконструкции действующих заводов КПД: проблемы и решения // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. / редкол.: В.Ф. Зверев, С.М. Коледа. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 379–395.
12. Іщенко О.С., Доненко В.І., Марченко М.П. Особливості формування вибору організаційно-технологічних рішень реконструкції діючих промислових підприємств // Вісн. Придніпр. держ. акад. будівництва та архітектури. – 2019. – № 5. – С. 257–258. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.221019.38.520.
13. Khalili A., Chua D.K. Integrated prefabrication configuration and component grouping for resource optimization of precast production // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2014. – Vol. 140, № 2. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000798.
14. Стефанов Б.В., Антоненко Г.Я. Организация технологических процессов на заводах сборного железобетона. – Киев: Будівельник, 1965. – 82 с.

## REFERENCES

1. Gurinovich, V.Yu., Leonovich, S.N. & Pozdnyakov, D.A. (2023). Proizvodstvennyi potentsial bazy industrial'nogo domostroeniya Respubliki Belarus' [Production Potential of the Prefabricated Construction Base in the Republic of Belarus]. *Vestn. BrGTU [Vestnik of Brest State Technical University]*, 1(130), 3–6. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-130-1-3-6. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Li, X., Li, Z. & Wu, G. (2018). Lean precast production system based on the CONWIP method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (22), 2167–2177. DOI: 10.1007/s12205-017-2009-4.
3. Yuan, Z., Qiao, Y., Guo, Y., Wang, Y., Chen, C. & Wang, W. (2020). Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete Event Simulation. *Advances in Civil Engineering*, 2020(2). DOI: 10.1155/2020/8814914.
4. Wang, Z., Hu, H. & Zhou, W. (2017). RFID enabled knowledge-based precast construction supply chain, computer-aided civil and infrastructure, Engineering. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (32), 499–514. DOI: 10.1111/mice.12254.
5. Liu, Z., Liu, Zh., Liu, M. & Wang, J. (2021). Optimization of Flow Shop Scheduling in Precast Concrete Component Production via Mixed-Integer Linear Programming. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1). DOI: 10.1155/2021/6637248.
6. Liu, Zh., Zhang, Y. & Li, M. (2014). Integrated scheduling of ready-mixed concrete production and delivery. *Automation in Construction*, (48), 31–43. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.08.004.
7. Hong, W.-K., Lee, G., Lee, S. & Kim, S. (2014). Algorithms for in-situ production layout of composite precast concrete members. *Automation in Construction*, (41), 50–59. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.02.005.
8. Granik, Yu.G. & Poltavtsev, S.I. (1989). *Rekonstruktsiya i tekhnicheskoe perevooruzhenie predpriyatii polosbornogo domostroeniya*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
9. Shveiko, N.V. (1989). *Ekonomicheskoe obosnovanie rekonstruktsii i tekhnicheskogo perevooruzheniya deistvuyushchikh predpriyatii*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).

10. Gusev, B.V. (2015). *Avtomatizirovannye tekhnologicheskie linii po proizvodstvu sbornogo zhelezobetona*. Izhevsk: KIT. (In Russ.).
11. Leonovich, S.N. & Gurinovich, V.Yu. (2019). Tekhnologicheskoe proektirovanie rekonstruktsii deistvuyushchikh zavodov KPD: problemy i resheniya. In V.F. Zverev (Eds.) & S.M. Koleda (Eds.) *Problemy sovremennogo stroitel'stva: materialy Mezhdunar. nauch-tekhn. konf.*, Minsk, 28 maya 2019 g. (379–395). Minsk: BNTU. (In Russ.).
12. Ishchenko, A.S., Donenko, V.I. & Marchenko, M.P. (2019). Osoblivosti formuvannya viboru organizatsiino-tekhnologichnikh rishen' rekonstruktsii diyuchikh promislovikh pidpriemstv [Peculiarities of the formation of the selection for reconstruction of operating industrial enterprises]. *Visn. Pridnpr. derzh. akad. budivnitstva ta arkhitekturi [Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture]*, (5), 257–258. DOI: 10.308.38/J.BPSACEA.2312.221019.38.520. (In Ukrainian, abstr. in Russ. and Engl.).
13. Khalili, A. & Chua, D.K. (2014). Integrated prefabrication configuration and component grouping for resource optimization of precast production. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(2). DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000798.
14. Stefanov, B.V. & Antonenko, G.Ya. (1965). *Organizatsiya tekhnologicheskikh protsessov na zavodakh sbornogo zhelezobetona*. Kiev: Budivel'nik. (In Russ.).

Поступила 25.04.2024

## ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE PRODUCTION BASE OF INDUSTRIAL HOUSING CONSTRUCTION

V. GURINOVICH<sup>1)</sup>, S. LEONOVICH<sup>2)</sup>, D. POZDNYAKOV<sup>3)</sup>

<sup>1), 2)</sup> *Belarusian National Technical University, Minsk,*

<sup>3)</sup> *RUE «Institute of Housing – NIPTIS named after S. Ataev», Minsk)*

*The article proposes an approach to improve the technological level of production on the basis of systematization of the main tasks and solutions of technical re-equipment of precast construction plants. The principle of realization of the proposed system approach is presented in the form of a flowchart. The proposed algorithm demonstrates the practical importance of taking into account the interrelation of construction and production processes for technical re-equipment without stopping the main production and reducing the duration of construction and installation works. Solutions for increasing the production capacity of lines pallet circulation and compensating for the increasing demand for concrete mix while increasing the productivity of the lines are presented. For technological lines circulation of pallet the efficiency of the organization of processes exceeding the directive schedule at the posts not connected with the main flow and with the individual schedule of work is substantiated. The functionality of local mortar-concrete unit of block-modular layout in the span is shown to increase productivity and rhythmicity of work of molding stations.*

**Keywords:** *civil construction, prefabricated construction, precast construction plants, precast production, precast reinforced concrete structures, production layout, range of products, production capacity of plants, construction production programme, technical re-equipment of production facilities.*



УДК 624.012.45:693.5

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23

## НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ<sup>2)</sup>,  
канд. техн. наук А.М. ХАТКЕВИЧ<sup>3)</sup>, канд. техн. наук А.И. ГИЛЬ<sup>4)</sup>, канд. техн. наук Э. ЧАПАРАНГАНДА<sup>5)</sup>  
(<sup>1), 3), 4)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
<sup>2)</sup> ООО «СофтКлуб», Минск, <sup>5)</sup> Ботсванский международный университет науки и технологий)  
<sup>1)</sup> d.lazovski@psu.by, <sup>2)</sup> d.gluhov@psu.by, <sup>3)</sup> a.khatkevich@psu.by, <sup>4)</sup> a.hil@psu.by, <sup>5)</sup> katsvikisire@gmail.com*

*Сталежелезобетонные конструкции на современном этапе развития строительной отрасли находят широкое применение в промышленных зданиях с большими нагрузками на перекрытия, гражданских высотных зданиях и различных инженерных сооружениях. В статье представлены результаты применения нелинейного метода расчета для вычисления параметров напряженно-деформированного состояния (нормальных напряжений и относительных деформаций на любой стадии работы под нагрузкой, прочности и деформативности) изгибаемых сталежелезобетонных элементов при условии совместной работы жестких стальных профилей и железобетона.*

*При расчете параметров напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных элементов учтены стадии их работы при изготовлении (вынужденные усадочные деформации монолитного бетона при его твердении) и эксплуатации (ползучесть бетона при длительном действии нагрузки). Предложен критерий вычисления изгибающего момента, соответствующего прочности сталежелезобетонного элемента, не требующий нормирования предельной сжимаемости бетона, позволяющий учитывать высокую степень перераспределения усилий в поперечном сечении сталежелезобетонного элемента с жесткой арматурой. Преимущества нелинейного метода расчета продемонстрированы на примерах сталежелезобетонных балок перекрытий из ТКП 45-5.03-16-2005 «Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования».*

**Ключевые слова:** *изгибаемый сталежелезобетонный элемент, нелинейный метод расчета, физическая нелинейность, диаграммы деформирования материалов, гибкая арматура, жесткая арматура, монолитный бетон, гипотеза плоских сечений, напряженно-деформированное состояние, стадии работы под нагрузкой, вынужденные деформации усадки бетона, ползучесть бетона.*

**Введение.** Сталежелезобетонные конструкции применяются в современном строительстве высотных каркасных зданий с тяжело нагруженными (200000 кН и более) колоннами, при возведении сильно нагруженных (20–100 кПа) балок и плит перекрытий промышленных зданий и сооружений<sup>1</sup> [1–5]. Это связано с тем, что при использовании обычного железобетона для изготовления тяжело нагруженных элементов с учетом стесненных размеров поперечного сечения требуется повышать процент армирования до 20% и более. При этом обеспечить такую высокую степень армирования не всегда возможно как ввиду ограниченного сортамента гибкой арматуры (максимальный диаметр 40 мм), так и по условию обеспечения совместной работы арматуры с бетоном. Поэтому с конструктивной точки зрения в качестве армирующих элементов эффективно использовать (с обеспечением совместной работы с бетоном) прокатные или сварные стальные профили, имеющие большие размеры поперечного сечения.

Широкая номенклатура прокатных и сварных стальных профилей позволяет применять наиболее эффективные сечения в каждом конкретном случае. Для коротких сжатых элементов определяющей является площадь поперечного сечения профиля, а для изгибаемых и длинных (гибких) сжатых элементов – его развитость (момент инерции) в плоскости изгиба или направлении возможной потери устойчивости.

Кроме того, жесткая арматура в виде прокатных или сварных профилей уже в процессе строительства до обетонирования может быть использована в качестве несущих элементов или опалубки.

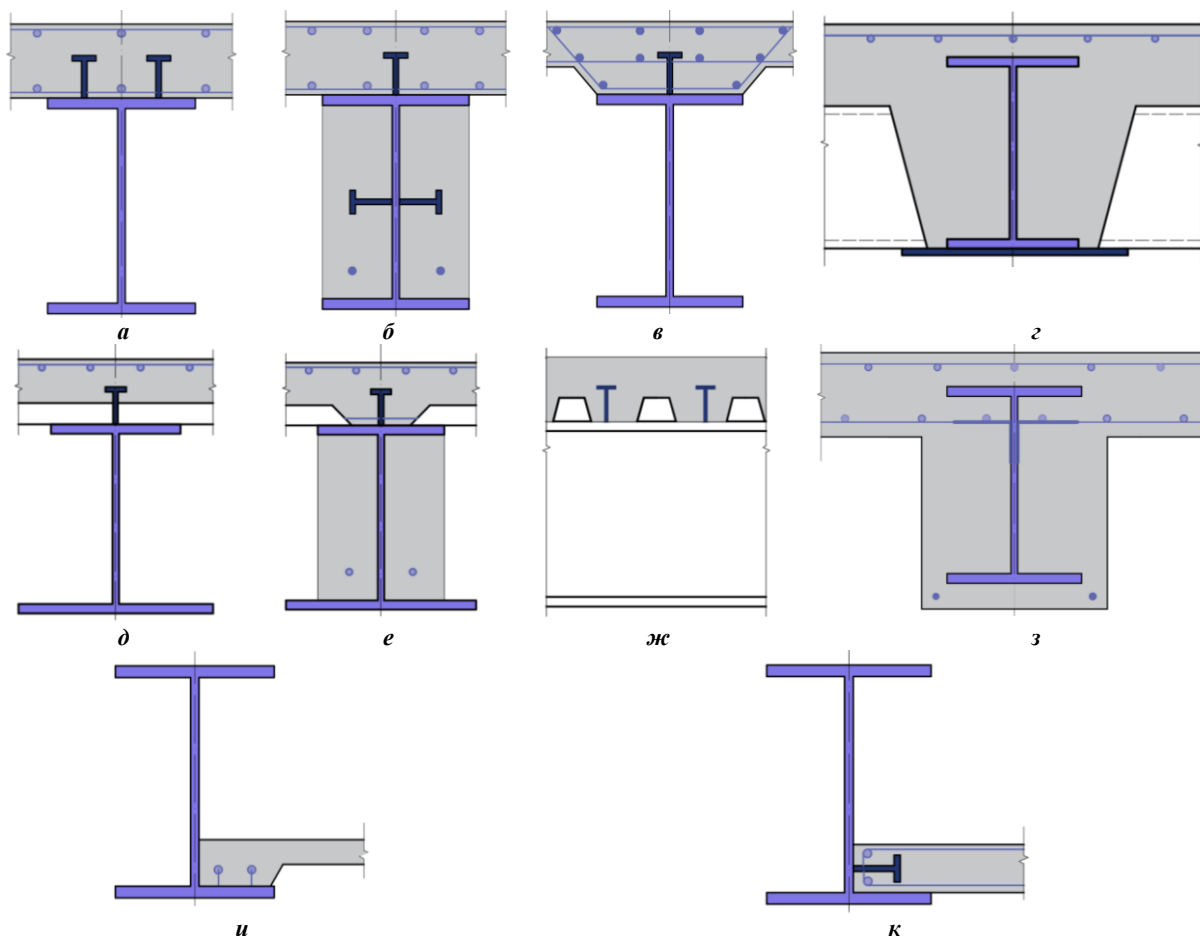
Сталежелезобетонные конструкции при полном или частичном охвате поперечного сечения жесткой арматуры бетоном объединяют в себе положительные качества составляющих материалов: стали – высокие физико-механические характеристики, железобетона – защитные свойства бетона против высоких температур и коррозии не только гибкой арматуры, но и жесткой арматуры в виде прокатных или сварных стальных профилей. Общий вид возможных эффективных поперечных сечений изгибаемых сталежелезобетонных элементов показан на рисунке 1<sup>2</sup>.

Обеспечение совместной работы жесткой арматуры с железобетоном выполняется с применением соединительных элементов между жесткой арматурой и бетоном, что позволяет исключить их взаимный сдвиг под нагрузкой вплоть до предельной стадии по прочности сталежелезобетонных элементов. Для этого используются,

<sup>1</sup> ТКП 45-5.03-16-2005 (02250) Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования // М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 71 с.

<sup>2</sup> Семенов В.А. Сталежелезобетонные конструкции. Область применения и основные положения СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования». Преимущества сталежелезобетонных конструкций по сравнению с традиционными решениями. Моделирование сталежелезобетонных конструкций с помощью современного инженерного ПО для проектировщиков: презентация [Электронный ресурс] // Ассоциация развития стального строительства (АРСС). – М.: Техсофт. – 73 с. URL: [https://steel-fabrication.ru/mediatsentr/5\\_Владимир%20Семенов\\_Tехсофт.pdf](https://steel-fabrication.ru/mediatsentr/5_Владимир%20Семенов_Tехсофт.pdf).

как правило, жесткие уголкового анкерные упоры или гибкие стад-болты в виде калиброванных стальных стержней, приваренных одним концом к профилю<sup>3,4,5,6,7</sup> [4; 6].



**а** – стальная двутавровая балка с опиранием плоской железобетонной плиты на верхний пояс; **б** – то же, с обетонированием балки; **в** – стальная двутавровая балка с опиранием ребристой железобетонной плиты на верхний пояс; **г** – стальная двутавровая балка с опиранием ребристой железобетонной плиты на нижний пояс; **д, е, ж** – стальная двутавровая балка с опиранием железобетонной плиты по стальному профилированному настилу на верхний пояс; **з** – обетонированная стальная двутавровая балка с приваркой нижней арматуры плиты к профилю; **и, к** – стальная двутавровая балка с опиранием плоской железобетонной плиты на нижний пояс

**Рисунок 1.** – Общий вид поперечных сечений изгибаемых сталежелезобетонных элементов<sup>8</sup>

Подходы к расчету сталежелезобетонных элементов как комбинированной конструкции из стали и железобетона исторически складывались от метода расчета по допускаемым напряжениям для приведенного поперечного сечения, работающего упруго до метода расчета по предельным усилиям с пластической работой бетона (прямоугольная эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны) и ограниченно пластической работой стали. Дальнейшее развитие метода предельных усилий привело к возникновению метода предельных состояний, который используется в нормативных документах по расчету сталежелезобетонных элементов до настоящего времени<sup>9,10,11,12</sup> [7].

<sup>3</sup> СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. – М., 2017.

<sup>4</sup> См. сноску 1.

<sup>5</sup> Методические рекомендации по расчету и проектированию сталежелезобетонных перекрытий. – М.: Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2018. – 62 с.

<sup>6</sup> Методическое пособие по расчету и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жесткой арматурой. – М.: Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2018. – 49 с.

<sup>7</sup> См. сноску 2.

<sup>8</sup> См. сноску 2.

<sup>9</sup> См. сноски 3, 4.

<sup>10</sup> Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой. – М.: Стройиздат, 1978. – 57 с.

<sup>11</sup> EN 1994-1-1:2005. Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. – Ч. 1. Общие правила для зданий и сооружений. – М., 2011. – 123 с.

<sup>12</sup> Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4 EN 1994-1-1. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. – М., 2013.

С развитием вычислительной техники реальностью стало применение деформационного подхода к расчету поперечных сечений сталежелезобетонных элементов, позволяющего получать параметры их напряженно-деформированного состояния (НДС) на любой стадии деформирования, учитывать физическую нелинейность материалов, явления усадки и ползучести бетона, стадийность нагружения [8–16]. Нелинейный метод расчета позволяет проводить вычисления для сталежелезобетонных элементов любой формы поперечного сечения, с любым расположением жесткой и гибкой арматуры.

В основе деформационного подхода лежит использование диаграмм деформирования материалов и допущение о линейном распределении относительных деформаций по поперечному сечению (гипотеза плоских сечений), что справедливо для сталежелезобетонных элементов при отсутствии сдвигов между жесткой стальной арматурой и железобетоном.

Целью настоящего исследования является применение нелинейного метода расчета изгибаемых сталежелезобетонных элементов, основанного на использовании диаграмм деформирования бетона, жесткой и гибкой арматуры, учитывающего деформации усадки бетона при твердении, деформации ползучести бетона при длительном внешнем воздействии, стадийность нагружения стальной и железобетонной частей поперечного сечения элементов.

**Допущения нелинейного метода расчета.** Поперечное сечение изгибаемого сталежелезобетонного элемента рассматривается как совокупность элементарных площадок, в пределах которых относительные деформации считаются равномерно распределенными. Отсутствуют сдвиги по контакту стальных профилей и бетона (железобетона). Распределение относительных деформаций по поперечному сечению сталежелезобетонного элемента подчиняется гипотезе плоских сечений в постановке В.И. Мурашева – Я.М. Немировского [17–19] для средних продольных относительных деформаций растянутой и сжатой зоны, включающей поперечные сечения с трещинами нормального отрыва и между трещинами.

В качестве аппроксимации диаграммы деформирования бетона призменной прочностью при сжатии  $f_c$  с начальным модулем упругости  $E_{cm}$ , устанавливающей зависимость между напряжениями при сжатии (растяжении)  $\sigma_c$  ( $\sigma_{ct}$ ) и средними относительными деформациями  $\varepsilon_c$  ( $\varepsilon_{ct}$ ), принимается нелинейная диаграмма состояния бетона с ниспадающей ветвью (ЕКБ-ФИП)<sup>13</sup> [20; 21] без ограничения ее длины по деформациям с целью получения полного перераспределения усилий между составляющими поперечного сечения сталежелезобетонного элемента (рисунок 2, а):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{k_c \eta_c - \eta_c^2}{1 + (k_c - 2) \eta_c}; \quad k_c = \frac{1,1 E_{cm} |\varepsilon_{ct1}|}{f_c}; \quad \eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{ct1}}; \quad \varepsilon_{ct1} = f_c \left( 0,12 + \frac{18,8}{f_c} \right) \cdot 10^{-4} \\ \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = \frac{k_{ct} \eta_{ct} - \eta_{ct}^2}{1 + (k_{ct} - 2) \eta_{ct}}; \quad k_{ct} = \frac{E_{ct} \varepsilon_{ct1}}{f_{ct}}; \quad \eta_{ct} = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}}; \quad \varepsilon_{ct1} = \frac{2 \cdot f_{ct}}{E_{ct}} \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $f_{ct} = 0,232 f_c^{2/3}$  – прочность бетона при растяжении.

В формуле (1) начальный модуль упругости бетона при растяжении  $E_{ct}$ , относительные деформации  $\varepsilon_{ct1}$  в пиковой точке диаграммы деформирования и предельная растяжимость бетона  $\varepsilon_{ctu}$  согласно<sup>14,15</sup> [21; 22] определяются

$$E_{ct} = \frac{10^7 \cdot f_{ct}}{750 + 81,55 \cdot f_{ct}}; \quad \varepsilon_{ctu} = \frac{K \cdot \varepsilon_{ct1}}{2}; \quad K = 6,4 + 0,1223 f_c. \quad (2)$$

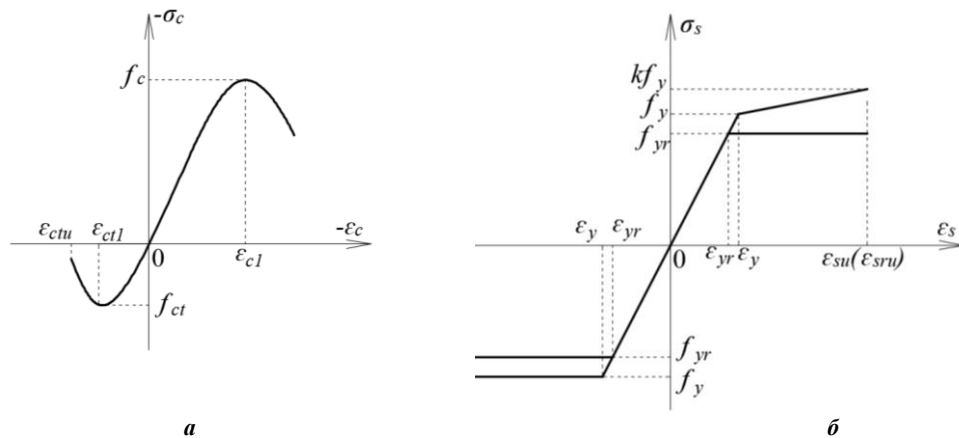
Идеализированная диаграмма деформирования гибкой стержневой и жесткой арматуры сопротивлением при сжатии и растяжении  $f_y$  ( $f_{yr}$ ) с начальным модулем упругости  $E_s$  ( $E_{sr}$ ), устанавливающая зависимость между напряжениями  $\sigma_s$  и относительными деформациями  $\varepsilon_s$ , принимается билинейной с ограничением относительных деформаций удлинения при растяжении и без ограничения при сжатии (рисунок 2, б).

При этом расчетная диаграмма деформирования для стержневой арматуры класса S500 при растяжении принимается согласно [24–26] с наклонным участком, определяемым показателем  $k = \sigma_s / f_y$ , зависящим от класса деформативности (пластичности) арматуры, а для стержневой арматуры из мягкой стали и жесткой арматуры – с горизонтальным участком (диаграмма Прандтля). Предельное значение относительной деформации растянутой гибкой и жесткой арматуры принимается  $\varepsilon_{su} = \varepsilon_{srn} = 0,025$ .

<sup>13</sup> CEBS-FIB Model Code for Concrete Structures 2010. URL: <https://www.wiley.com/en-us/fib+Model+Code+for+Concrete+Structures+2010-p-9783433604083>.

<sup>14</sup> СП 5.03.01-2020 Бетонные и железобетонные конструкции // РУП «Стройтехнорм» М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – 236 с.

<sup>15</sup> См. сноску 1.



*a* – диаграмма деформирования бетона; *б* – диаграмма деформирования гибкой и жесткой арматуры

Рисунок 2. – Диаграммы деформирования материалов сталежелезобетонных элементов

**Учет предварительного нагружения жесткой арматуры.** В процессе монтажа изгибаемые стальные прокатные или сварные профили жесткой арматуры испытывают воздействия не только собственного веса, но и веса опирающихся на них элементов, монолитного бетона, гибкой арматуры, монтажных нагрузок. Это вызывает появление начального НДС, параметры которого определяются на первой стадии расчета изгибаемого сталежелезобетонного элемента<sup>16</sup> [27].

Система уравнений равновесия и совместности деформаций для первой стадии расчета параметров НДС изгибаемого сталежелезобетонного элемента имеет вид:

$$\begin{cases} \int \sigma(\varepsilon(y)_I)(y - y_0)b_i dy - M_{y,I} = 0 \\ \int \sigma(\varepsilon(y)_I)b_i dy = 0 \\ \varepsilon(y)_I = 1/r_y(y - y_0) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\sigma(y)_I$ ,  $\varepsilon(y)_I$  – нормальные напряжения, относительные деформации на первой стадии расчета в элементарной площадке ( $b_i \cdot dy$ ) жесткой арматуры с координатой  $y$  от выбранной оси по высоте поперечного сечения;  $y_0$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести поперечного сечения жесткой арматуры;  $1/r_y$  – кривизна продольной оси сталежелезобетонного элемента в плоскости оси  $y$ .

Вычисление начальных параметров НДС в элементарных площадках жесткой арматуры сталежелезобетонного элемента выполняется итерационно при заданном усилии  $M_{y,I}$  от внешней нагрузки при монтаже. Критерием окончания процесса последовательных приближений является заданная точность решения уравнений (3) на смежных этапах.

**Учет усадки бетона при его твердении.** Для учета вынужденных усадочных деформаций при твердении монолитного бетона сталежелезобетонного элемента рассматривается поперечное сечение, состоящее из жесткой, гибкой арматуры и бетона.

При действии усадочных напряжений в жесткой и гибкой арматуре поперечного сечения появляются деформации сжатия, а в бетоне – деформации растяжения. При несимметричном поперечном сечении сталежелезобетонного элемента относительно горизонтальной оси, проходящей через его центр тяжести, на поле напряжений от усадки монолитного бетона накладывается поле вторичных напряжений от внецентренного приложения сжимающих усилий в бетоне относительно центра тяжести поперечного сечения жесткой и гибкой арматуры, что эквивалентно действию изгибающего момента.

Гипотеза плоских сечений для относительных деформаций всего поперечного сечения сталежелезобетонного элемента, состоящего из стального профиля (жесткая арматура) и железобетонной части (бетон и гибкая арматура), не выполняется, поскольку в стальном профиле уже имеются начальные относительные деформации от воздействия нагрузки в процессе монтажа. Принимаем гипотезу плоских сечений отдельно для относительных деформаций железобетонной части и для приращений относительных деформаций жесткой арматуры поперечного сечения сталежелезобетонного элемента. В этом случае относительные деформации элементарной площадки жесткой арматуры определяются как сумма относительных деформаций от нагрузок в процессе монтажа и относительных деформаций от усадки бетона. С учетом совместной работы жесткой арматуры и железобетонной части поперечного сечения разность относительных деформаций в каждой элементарной площадке жесткой арматуры будет равна относительной деформации, вычисленной на первой стадии расчета от действия изгибающего момента  $M_{y,I}$ .

<sup>16</sup> Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1988. – 120 с.

Система уравнений равновесия и совместности деформаций для расчета параметров НДС изгибаемого стале-железобетонного элемента с учетом вынужденных деформаций от усадки  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$  бетона имеет вид:

$$\begin{cases} \int \sigma(\varepsilon(y)_{II})(y - y_{0c})b_i dy - M_{y,I} = 0 \\ \int \sigma(\varepsilon(y)_{II})b_i dy = 0 \\ \varepsilon(y)_{II} = \varepsilon(y)_I + 1/r_{ycII}(y - y_{0c}) + \varepsilon_{z\varepsilon} + \varepsilon_{cs}(t, t_s) \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\sigma(y)_{II}$ ,  $\varepsilon(y)_{II}$  – нормальные напряжения, относительные деформации на второй стадии расчета в элементарной площадке ( $b_i dy$ ) бетона, жесткой или гибкой арматуры с координатой  $y$ ;

$y_{0c}$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести поперечного сечения сталежелезобетонного элемента;

$1/r_{yc}$  – кривизна продольной оси сталежелезобетонного элемента в плоскости оси  $y$ ;

$\varepsilon_{z\varepsilon}$  – относительная деформация от действия усилия усадки бетона, соответствующая его центральному приложению.

В поперечном сечении сталежелезобетонного элемента вынужденные деформации усадки бетона сдерживаются жесткой и гибкой арматурой, в результате чего в жесткой и гибкой арматуре и в бетоне возникают усилия, которые находятся в равновесии. Исходя из этого,

$$\varepsilon_{z\varepsilon} = \frac{\int \sigma_c(y)_{II} A_c}{\int E_{sr}(y) A_{sr} + \int E_s(y) A_s}, \quad (5)$$

где  $\sigma_c(y)_{II}$  – нормальные напряжения в элементарных площадках бетона с координатой  $y$  на второй стадии расчета;

$E_{sr}$  и  $E_s$  – модуль деформации стали соответственно жесткой и гибкой арматуры;

$A_{sr}$  и  $A_s$  – площадь поперечного сечения элементарной площадки соответственно жесткой и гибкой арматуры.

Решение системы уравнений (4) выполняется до равновесного состояния по усилиям относительно центра тяжести поперечного сечения сталежелезобетонного элемента. Вычисленные на второй стадии расчета параметры НДС сталежелезобетонного элемента будут являться начальными при последующем его нагружении.

**Учет кратковременного статического нагружения.** При последующем кратковременном статическом нагружении и соблюдении гипотезы плоских сечений при действии изгибающего момента ( $M_{y,I} + M_{y,III}$ ) от внешней нагрузки система уравнений равновесия и совместности деформаций на третьей стадии расчета имеет вид:

$$\begin{cases} \int \sigma(\varepsilon(y)_{III})(y - y_{0c})b_i dy - (M_{y,I} + M_{y,III}) = 0 \\ \int \sigma(\varepsilon(y)_{III})b_i dy = 0 \\ \varepsilon(y)_{III} = \varepsilon(y)_{II} + 1/r_{ycIII}(y - y_{0c}) \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\sigma(y)_{III}$ ,  $\varepsilon(y)_{III}$  – нормальные напряжения, относительные деформации на третьей стадии расчета в элементарной площадке бетона, жесткой или гибкой арматуры с координатой  $y$ ;

$1/r_{ycIII}$  – кривизна продольной оси сталежелезобетонного элемента в плоскости оси  $y$ .

При решении системы уравнений (4) или (6) достижение относительными деформациями бетона элементарной площадки при растяжении  $\varepsilon_c(y)$  предельных значений  $\varepsilon_{cm}$  свидетельствует об образовании трещины. В дальнейших расчетах осевая жесткость этой элементарной площадки принимается равной нулю.

Критерием разрушения изгибаемого сталежелезобетонного элемента принят максимальный изгибающий момент от внешних воздействий, который способен воспринять элемент. Максимальное значение изгибающего момента ( $M_{y,I} + M_{y,III}$ ), при котором процесс последовательных приближений сходится (соблюдаются условия равновесия и условие совместности деформаций (6)), соответствует прочности сталежелезобетонного элемента. Преимуществом названного критерия разрушения является отсутствие необходимости нормирования предельной сжимаемости бетона и учет высокой степени перераспределения усилий в поперечном сечении сталежелезобетонного элемента. Критерием разрушения жесткой и гибкой арматуры при растяжении принимается достижение предельных относительных деформаций при разрыве.

**Учет ползучести бетона при длительном нагружении.** Ползучесть бетона, так же, как и усадка, связана с его структурой, процессами твердения цементного камня, капиллярными явлениями. В отличие от деформации усадки, которая может происходить без силового воздействия, деформации ползучести происходят под воздействием усилий от внешней нагрузки, что связано с перераспределением давления с текучей гелевой структуры на кристаллические сростки и зерна заполнителя. При этом происходит перемещение избыточной воды в капиллярах и микропорах. Деформации ползучести бетона, так же, как и его усадки, изменяют НДС сталежелезобетонного элемента во времени. Жесткая и гибкая арматура вследствие ее сцепления с бетоном становится внутренней связью, которая препятствует развитию деформаций ползучести и является источником возникающих в них дополнительных усилий. Усадка бетона при его твердении всегда вызывает деформации укорочения, ползучесть бетона вызывает при действии растягивающих напряжений деформации удлинения, а при действии сжимающих напряжений – деформации

укорочения [15; 16; 28]. На проявление деформаций ползучести бетона кроме его состава влияет скорость нагружения [29], градиенты напряжений и деформаций [14], а также другие факторы.

Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов позволяет учесть деформации ползучести посредством применения аппроксимации диаграмм-изохрон деформирования бетона при длительном действии нагрузки. Для этого используют известные феноменологические теории ползучести, полученные на основе экспериментальных данных при простейших режимах нагружения и последующих обобщений, исходя из принятых гипотез<sup>17</sup> [22; 23; 30; 31]. Основное допущение для получения диаграммы-изохроны бетона предполагает, что полные относительные деформации бетона складываются из упругих деформаций, возникающих при кратковременном приложении нагрузки, и деформаций ползучести, развивающихся при длительном действии нагрузки.

Известные в настоящее время теории ползучести отличаются, в основном, способом перехода от деформаций ползучести при простейших режимах нагружения к деформациям ползучести при любых режимах нагружения. По виду зависимостей как между напряжениями и упругими деформациями, так и между напряжениями и деформациями ползучести различают линейную и нелинейную теории ползучести. Область линейной зависимости, как правило, ограничивается напряжениями в бетоне  $\sigma_c \leq (0,4 \dots 0,5) f_{cm}(t_0)$ .

Относительные деформации ползучести бетона  $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  с начальным модулем упругости  $E_c$  сталежелезобетонных элементов в момент времени  $t$  при постоянных напряжениях  $\sigma_c$ , приложенных в возрасте бетона  $t_0$ , определяются по формуле<sup>18</sup>:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c}, \quad (7)$$

где коэффициент ползучести бетона  $\varphi(t, t_0)$  (соотношение относительных деформаций ползучести и относительных упругих деформаций при нормальном напряжении  $\sigma_c \leq 0,4 f_{cm}(t_0)$ ) определяют по формуле:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0), \quad (8)$$

где  $\varphi_{bc}(t, t_0)$  – базовый коэффициент ползучести;

$\varphi_{dc}(t, t_0)$  – коэффициент ползучести высыхания;

$t$  – возраст бетона в рассматриваемый момент времени, сут.;

$t_0$  – модифицированный в зависимости от температуры среды и класса прочности цемента возраст бетона в момент нагружения, сут.

В случае высоких уровней сжимающих напряжений бетона ( $0,4 f_{cm}(t_0) < \sigma_c < 0,6 f_{cm}(t_0)$ ) вычисляют модифицированный коэффициент нелинейной ползучести  $\varphi_\sigma(t, t_0)$  по формуле

$$\varphi_\sigma(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \exp \left[ 1,5 \cdot \left( \frac{|\sigma_c|}{f_{cm}(t_0)} - 0,4 \right) \right]. \quad (9)$$

Эффективный модуль деформаций бетона  $E_{c,eff}(t, t_0)$  в момент времени  $t$  при действии напряжения  $\sigma_c \leq 0,4 f_{cm}(t_0)$  вычисляется по формуле

$$E_{c,eff}(t, t_0) = E_{cm} / [1 + \varphi(t, t_0)]. \quad (10)$$

Полученные по (10) значения эффективного модуля деформаций бетона при разных уровнях нормальных напряжений в момент времени  $t$  можно аппроксимировать кривой, которая будет являться диаграммой-изохроной в заданный момент времени. Кроме того, диаграмму-изохрону можно получить, суммируя относительные деформации ползучести бетона, вычисленные по формуле (7), с упругими относительными деформациями бетона при разных уровнях напряжения в момент времени  $t$ . Полученные таким образом диаграммы деформирования бетона при длительном действии внешней нагрузки применяют в расчете НДС изгибаемого сталежелезобетонного элемента в системе уравнений (6).

**Применение нелинейного метода расчета.** Предлагаемый нелинейный метод расчета поперечного сечения рассмотрим применительно к расчету сталежелезобетонных балок (примеры расчета приложений А–В ТКП 45-5.03-16-2005) при действии статических кратковременной и длительной нагрузок.

*Сталежелезобетонная балка № 1* междуэтажного перекрытия пролетом 12 м, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой, состоит из жесткого стального сварного двутаврового профиля из стали С255 ( $E_{st} = 2,06 \cdot 10^5$  МПа; верхний пояс и стенка –  $f_{yr} = 240$  МПа; нижний пояс –  $f_{yr} = 230$  МПа). Настил перекрытия принят из сборных железобетонных ребристых плит из бетона класса С<sub>30/37</sub> ( $E_{cm} = 37\,000 \cdot 0,9 = 33\,300$  МПа,  $f_c = 20$  МПа). Бетон замоноличивания класса С<sub>20/25</sub> ( $E_{cm} = 32\,000$  МПа,  $f_c = 11,11$  МПа). Для расчета влияния усадки бетона замоноличивания на параметры НДС сталежелезобетонной балки принимаем относительные усадочные деформации  $\varepsilon_{cs}(t, t_s) = 0,00025$ .

<sup>17</sup> См. сноски 14, 15.

<sup>18</sup> См. сноску 15.

Максимальный изгибающий момент от нагрузок на первой стадии работы конструкции (стадия возведения):  $M_{Sd,I}=667,8$  кН·м; его нормативное значение  $M_{Sn,I}=610,2$  кН·м. Максимальный изгибающий момент от суммарных нагрузок после замоноличивания бетоном:  $M_{Sd,II}=5149,8$  кН·м;  $M_{Sn,II}=4482$  кН·м.

Для расчета влияния ползучести бетона сборных плит перекрытий и бетона замоноличивания в примере принимается соотношение: 40% – длительно действующая нагрузка ( $M_{St}=1793$  кН·м), 60% – кратковременная ( $M_{Ss}=2689$  кН·м). При этом эффективные модули упругости приняты равными  $E_{c,eff}=10\,667$  МПа для бетона замоноличивания и  $E_{c,eff}=11\,100$  МПа для бетона сборных железобетонных плит.

Поперечное сечение рассматриваемой сталежелезобетонной балки с размерами приведено на рисунке 3.

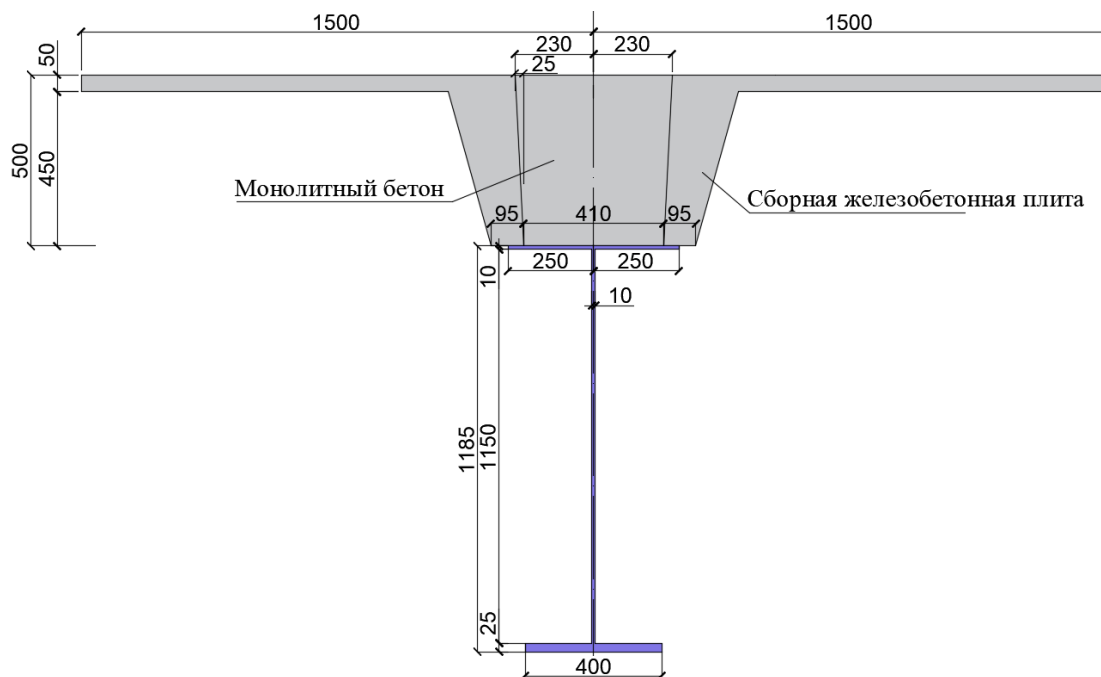


Рисунок 3. – Поперечное сечение сталежелезобетонной балки № 1

Результаты расчета балки в виде стального сварного двутавра на первой стадии ее работы по предлагаемой методике приведены на рисунке 4.

Деформации усадки бетона замоноличивания при совместной работе со стальным профилем и бетоном сборных плит оказывают на них влияние. В стальном профиле увеличиваются нормальные напряжения: сжимающие – в верхней полке на 7,15 МПа, растягивающие – в нижней полке на 24,82 МПа. В бетоне сборных плит появляются сжимающие нормальные напряжения 3,43 МПа, в то время как бетон замоноличивания испытывает растягивающие напряжения 1,924 МПа при относительных деформациях  $1,47 \cdot 10^{-4}$ , которые не превышают предельного значения (трещины нормального отрыва вследствие усадки в бетоне замоноличивания не образуются). В результате действия вынужденных деформаций усадки бетона замоноличивания увеличилась кривизна сталежелезобетонной балки на  $(1/r)_{ad}=2,692 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ .

Результаты расчета сталежелезобетонной балки № 1 при действии вынужденных деформаций усадки бетона замоноличивания при его твердении  $\varepsilon_{cs}(t, t_s) = 0,00025$  приведены на рисунке 5.

Расчет сталежелезобетонной балки на третьей стадии при действии изгибающего момента от нормативного значения кратковременной нагрузки  $M_{Sn,II}=4482$  кН·м с учетом воздействия усадки бетона замоноличивания производится для проверки соответствия требованиям второй группы предельных состояний. Результаты расчета показывают: кривизна сталежелезобетонной балки составляет  $(1/r)_c=2,692 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ , что при равномерно распределенной нагрузке соответствует прогибу в середине пролета  $a=18,3$  мм, что меньше предельного  $a_{lim}=12000/250=48$  мм. Все бетонные элементы испытывают сжатие, трещины нормального отрыва не образуются ( $M_{Sn,II}=4390$  кН·м <  $M_{cr}=5689,5$  кН·м).

Вычисление параметров НДС сталежелезобетонной балки в предельном состоянии по прочности показывает, что разрушение балки начинается с растянутой зоны стального профиля с последующим переходом нормальных напряжений бетона сборных плит и бетона замоноличивания на нисходящую ветвь своих диаграмм деформирования.

Расчетный предельный изгибающий момент, соответствующий прочности нормального сечения сталежелезобетонной балки № 1, равен  $M_u=6517$  кН·м при прогибе  $a=86$  мм. В предельной стадии в бетоне замоноличивания и сборных плитах в растянутой зоне появляются трещины нормального отрыва.

Результаты расчета сталежелезобетонной балки в предельном состоянии приведены на рисунке 6.

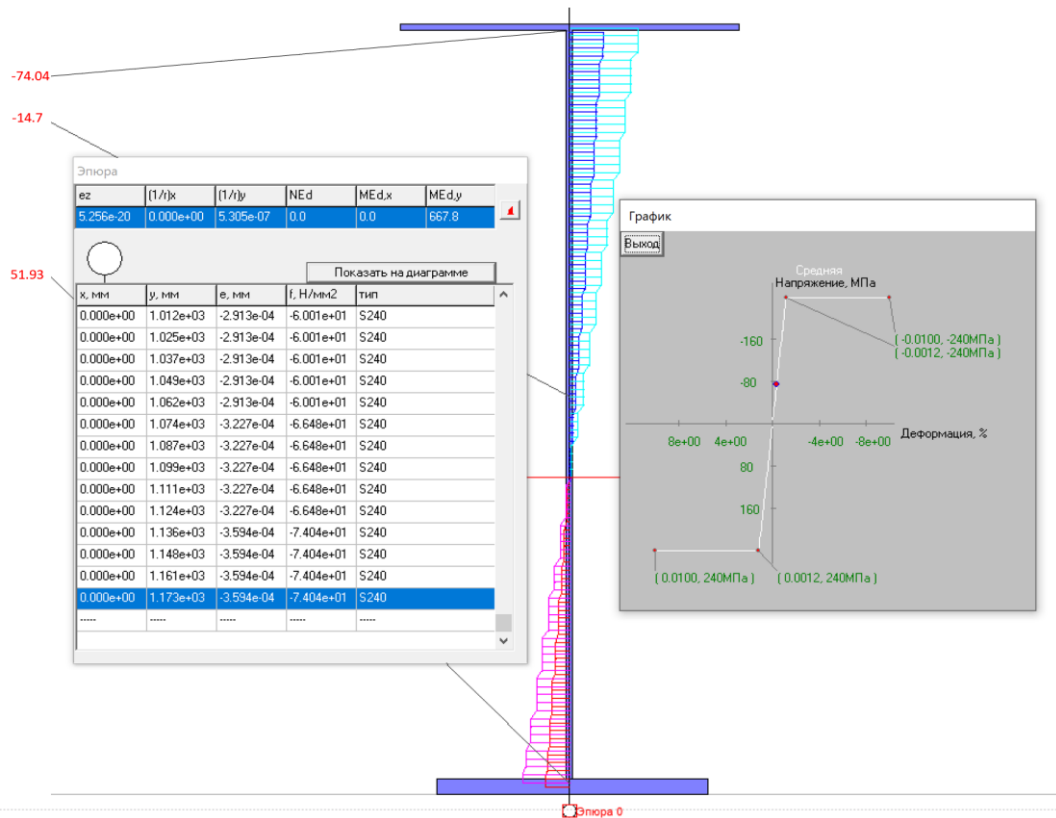


Рисунок 4. – Результаты расчета балки в виде стального сварного двутавра на первой стадии работы сталежелезобетонной балки № 1 при  $M_{Sd,T}=667,8$  кН·м (цифры слева от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

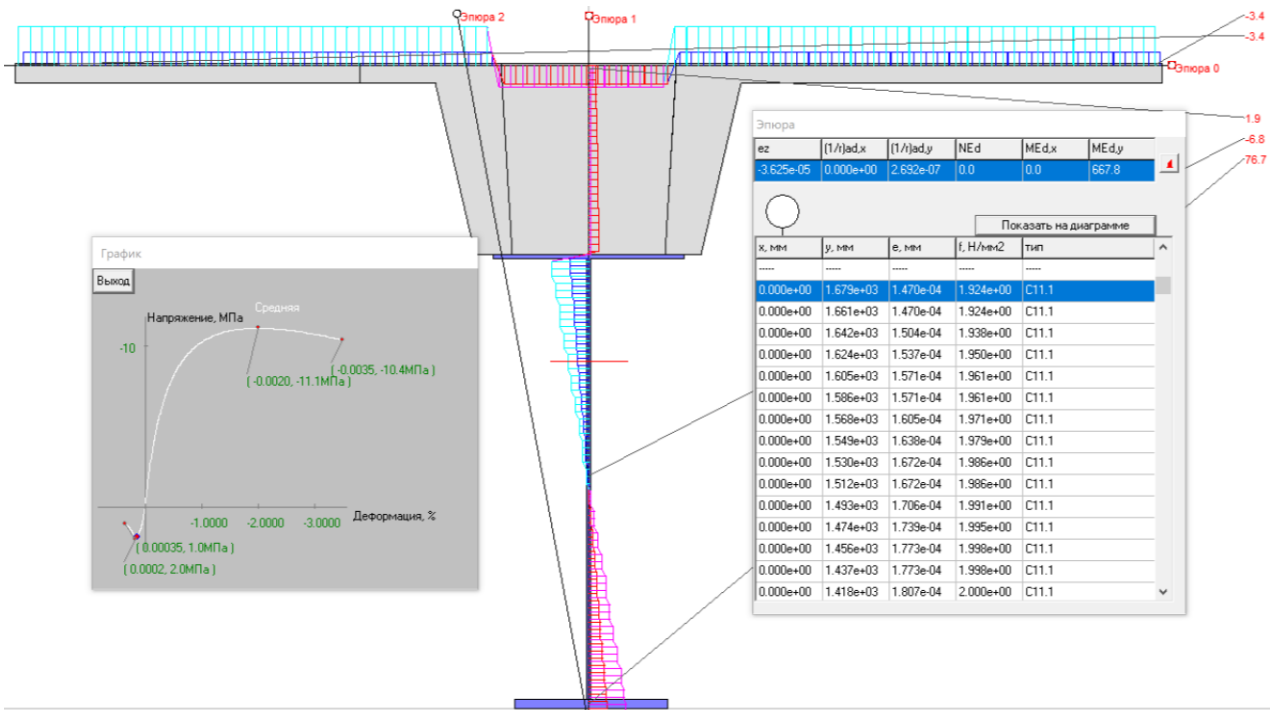


Рисунок 5. – Результаты расчета распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной балки № 1 при действии изгибающего момента  $M_{Sd,T}=667,8$  кН·м и вынужденных деформаций усадки бетона замоноличивания (цифры справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)



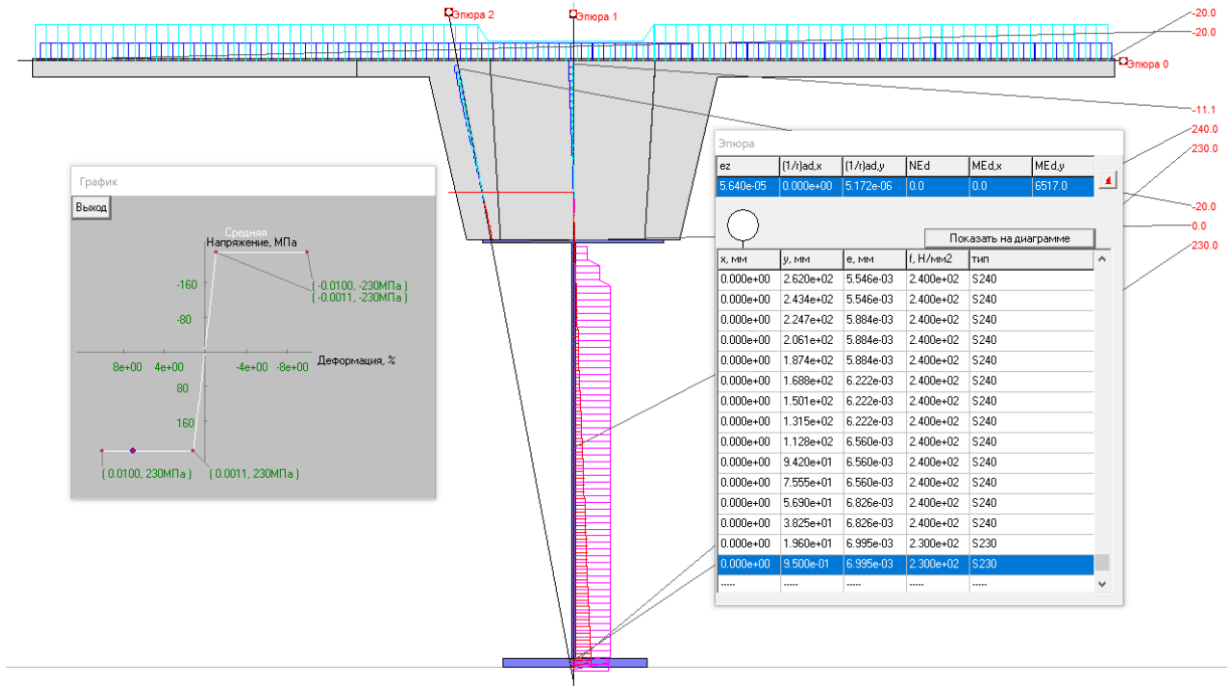


Рисунок 6. – Результаты расчета распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной балки № 1 при действии предельного изгибающего момента  $M_u=6517$  кН·м (цифры справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

Учет деформаций ползучести бетона сборных плит и бетона замоноличивания изменяет параметры напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонной балки. Так, при воздействии изгибающего момента  $M_{Sl}+M_{Ss}=1793+2689=4482$  кНм увеличивается прогиб балки на 7,5 мм (25,8–18,3), изменяются в сторону увеличения напряжения в стальном профиле, перераспределяются усилия между сборным бетоном и бетоном замоноличивания. Расчетный предельный изгибающий момент сталежелезобетонной балки № 1 с учетом воздействия усадки бетона замоноличивания и ползучести бетонов равен  $M_u=6356$  кН·м при прогибе  $a=98,7$  мм. Результаты расчета сталежелезобетонной балки № 1 с учетом деформаций ползучести бетона при действии изгибающего момента  $M_{Sl}+M_{Ss}=4482$  кНм приведены на рисунке 7.

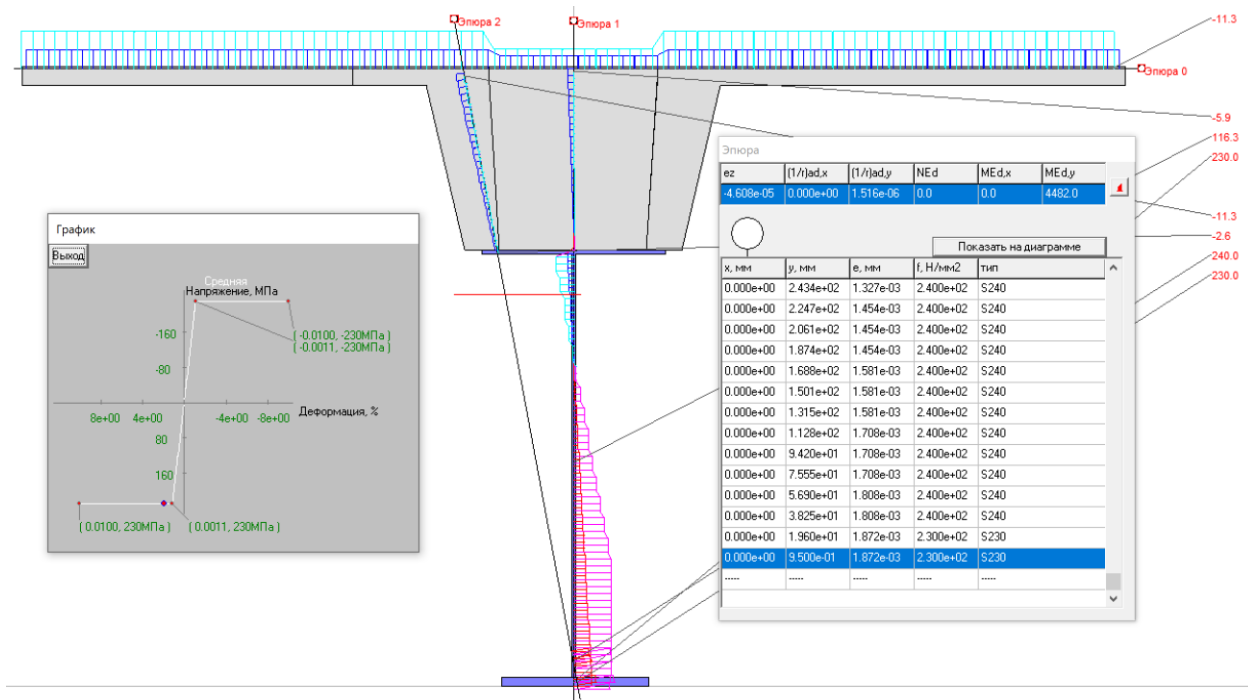


Рисунок 7. – Результаты расчета распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной балки № 1 при действии изгибающего момента  $M_{Sl}+M_{Ss}=4482$  кНм (цифры справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

Сталежелезобетонная балка № 2 с меньшей строительной высотой междуэтажного перекрытия пролетом 12 м, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой, состоит из жесткого стального сварного двутаврового профиля с продольным ребром и верхней бетонной части (рисунок 8). Профиль и продольное ребро выполнены из стали С255 за исключением нижнего пояса, для которого использована сталь С345 ( $E_{sr}=2,06 \cdot 10^5$  МПа; верхний пояс, стенка и продольное ребро –  $f_{yr}=240$  МПа; нижний пояс –  $f_{yr}=300$  МПа). Физико-механические характеристики бетона сборных железобетонных ребристых и бетона замоноличивания аналогичны сталежелезобетонной балке № 1. Максимальный изгибающий момент от нагрузок на первой стадии работы конструкции (стадия возведения)  $M_{Sd,I}=738,7$  кН·м; его нормативное значение принимаем в том же соотношении, что и для балки № 1:  $M_{Sn,I}=675$  кН·м. Максимальный изгибающий момент от суммарных нагрузок после замоноличивания бетоном  $M_{Sd,II}=2218,5$  кН·м; аналогично  $M_{Sn,II}=2030$  кН·м.

Для расчета влияния ползучести бетона сборных плит перекрытий и бетона замоноличивания принимаем всю нагрузку длительно действующей ( $M_{Sl}=2030$  кН·м). Эффективные модули упругости для бетона замоноличивания и сборных железобетонных плит  $E_{c,eff}$  – аналогично балке № 1.

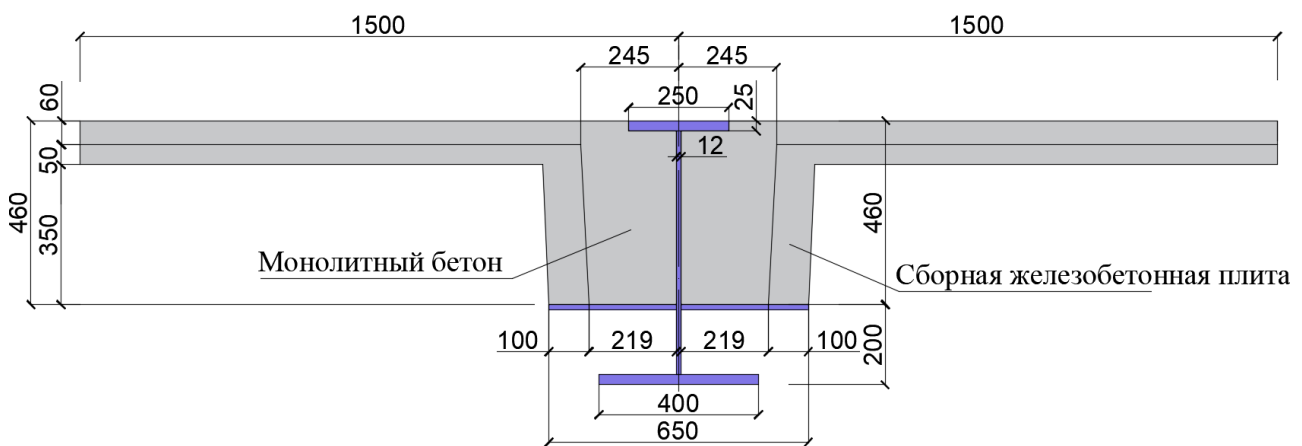


Рисунок 8. – Поперечное сечение сталежелезобетонной балки № 2

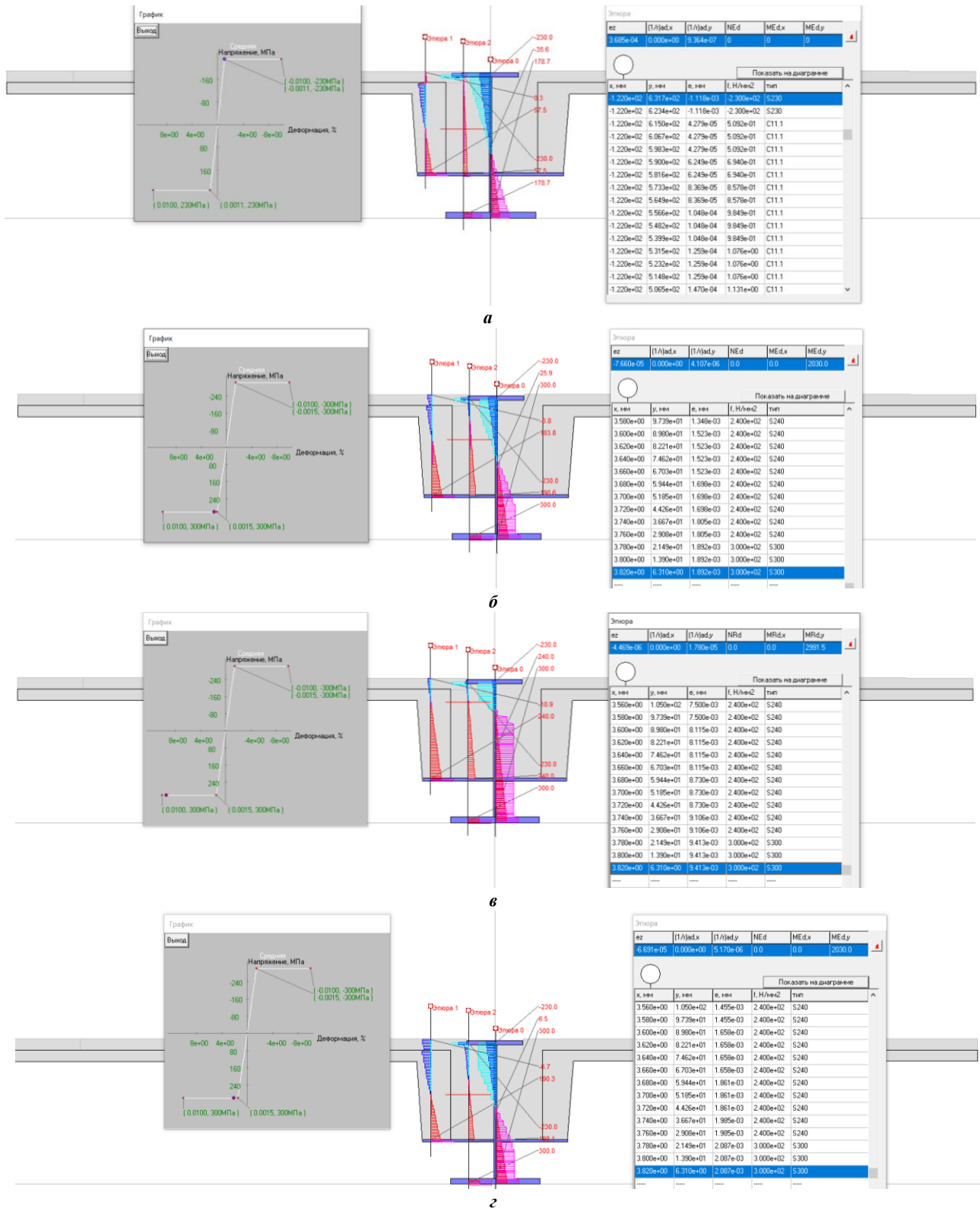
Аналогичные нелинейные расчеты по предлагаемой методике выполнены для сталежелезобетонной балки № 2 с пониженной строительной высотой междуэтажного перекрытия. Результаты расчетов приведены далее на рисунке 9.

В сталежелезобетонной балке № 2 доля бетона замоноличивания в общей площади поперечного сечения балки больше и центр его тяжести по отношению к стальному профилю расположен с меньшим эксцентриситетом, что вызывает более равномерные дополнительные деформации сжатия от усадки бетона замоноличивания. При этом из-за уменьшения изгибной жесткости стального профиля (высота поперечного сечения 660 мм по сравнению с профилем балки № 1 высотой 1185 мм) при прочих сопоставимых размерах поперечного сечения и характеристиках стали вынужденные деформации усадки бетона замоноличивания оказывают более существенное влияние на деформации балки при изгибе (прогиб балки увеличился на  $61,9 - 33,9 = 28$  мм по сравнению с балкой № 1, у которой увеличение прогиба составило  $12 - 7,96 = 4,04$  мм). Напряжения в стальном профиле увеличиваются: сжимающие – в верхнем поясе на  $230 - 184,2 = 45,8$  МПа (на 7,15 МПа – в балке № 1), растягивающие – в нижней полке на  $178,3 - 105,3 = 73$  МПа (на 24,82 МПа – в балке № 1).

Расчет сталежелезобетонной балки на третьей стадии расчета при действии изгибающего момента от нормативного значения кратковременной нагрузки  $M_{Sn,II}=2030$  кН·м с учетом вынужденных деформаций усадки бетона замоноличивания показывает, что при равномерно распределенной нагрузке прогиб балки в середине пролета  $a=95,5$  мм, что больше предельного  $a_{lim}=12000/250=48$  мм. Все бетонные элементы испытывают изгиб (имеется сжатая и растянутая зоны), образуются трещины нормального отрыва ( $M_{Sn,II}=2030$  кН·м  $>$   $M_{cr}=1289$  кН·м).

Расчетный предельный изгибающий момент, соответствующий прочности нормального сечения сталежелезобетонной балки № 2, равен  $M_u=2988,7$  кН·м при прогибе  $a=179,4$  мм.

Деформации ползучести бетона сборных плит и бетона замоноличивания, аналогично балке № 1, влияют на параметры НДС балки № 2. При воздействии изгибающего момента  $M_{Sl}+M_{Ss}=2030$  кН·м в результате учета деформаций ползучести увеличивается прогиб балки на  $111,4 - 95,5 = 15,9$  мм, увеличиваются также нормальные напряжения в стальном профиле, перераспределяются усилия между сборным бетоном и бетоном замоноличивания.



**а** –  $M_{Sd,I}=738,7$  кН·м; **б** –  $M_{Sd,II}=2030$  кН·м; **в** –  $M_u=2988,7$  кН·м; **г** –  $M_{SI}+M_{Ss}=2030$  кН·м с учетом деформаций ползучести бетона

Рисунок 9. – Результаты расчета распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной балки № 2 при действии деформаций усадки бетона замоноличивания  $\epsilon_{cs}(t, t_s) = 0,00025$  и изгибающего момента (цифры справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

Результаты проведенных нелинейных расчетов сталежелезобетонных балок по предлагаемой методике и методике ТКП 45-5.03-16-2005 представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок

Стадия расчета	Параметр НДС	Балка № 1		Балка № 2	
		ТКП 45-5.03-16	Предлагаемая методика	ТКП45-5.03-16	Предлагаемая методика
I стадия $M_{SdI}$	$(1/r)(m^{-1})/a$ (мм)	-	$5,305 \cdot 10^{-7}/7,96$	-	$22,6 \cdot 10^{-7}/33,9$
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в верхнем поясе	-76,7/0,000372	-74,04/0,000359	-	-184,2/0,000894
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в нижнем поясе	53,7/0,000261	51,93/0,000252	-	105,3/0,000511
II стадия (усадка бетона) $M_{SdI}$	$(1/r)(m^{-1})/a$ (мм)	-	$7,997 \cdot 10^{-7}/12$	-	$41,3 \cdot 10^{-7}/61,9$
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в верхнем поясе	-	-81,19/0,000394	-	-230/0,001119
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в нижнем поясе	-	76,75/0,000373	-	178,3/0,000867
	$\sigma_c$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в сборном бетоне	-	-3,43/0,000103	-	-5,73/0,000185
	$\sigma_c$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в монолитном бетоне	-	1,92/0,000147	-	2,66/0,000208
III стадия (кратковр. нагрузка) $M_{SdII}$	$(1/r)(m^{-1})/a$ (мм)	-	$12,18 \cdot 10^{-7}/18,3$	-	$63,69 \cdot 10^{-7}/95,5$
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в верхнем поясе	-	-70,85/0,000344	-	-230/0,00148
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в нижнем поясе	-	218,2/0,001059	-	300/0,001892
	$\sigma_c$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в сборном бетоне	-	-9,11/0,000333	-	-11,3/0,000452
	$\sigma_c$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в монолитном бетоне	-	-6,62/0,000333	-	-6,84/0,000353
III стадия (кратковр. нагрузка, предельная)	$(1/r)(m^{-1})/a$ (мм)	-	$57,3 \cdot 10^{-7}/83$	-	$119,6 \cdot 10^{-7}/179,4$
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в верхнем поясе	65/-	86,79/0,000421	218,4/-	-230/0,00297
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в нижнем поясе	251/-	230/0,007	265,4/-	300/0,00995
	$\sigma_c$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в сборном бетоне	-7,1/0,0006	-19,95/0,000184	-5,886/0,0004	-14,12/0,000653
	$\sigma_c$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в монолитном бетоне	-7,1/0,0006	-11,09/0,000184	-5,886/0,0004	-10,4/0,00108
IV стадия (ползучесть бетона) ( $M_{SII}+M_{Ss}$ )	$(1/r)(m^{-1})/a$ (мм)	-	$17,24 \cdot 10^{-7}/25,8$	-	$74,32 \cdot 10^{-7}/111,4$
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в верхнем поясе	-89,1/-	-123,7/0,000601	-	-230/0,00184
	$\sigma_s$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в нижнем поясе	256,4/-	230/0,00187	-	300/0,00209
	$\sigma_c$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в сборном бетоне	-6,72/-	-11,33/0,000854	-	-10,33/0,00077
	$\sigma_c$ (МПа) / $\varepsilon_s$ в монолитном бетоне	-6,72/-	-5,88/0,000604	-	-6,7/0,000715

**Заключение.** На примере изгибаемых сталежелезобетонных элементов продемонстрирована применимость предлагаемого нелинейного метода расчета для вычисления параметров их НДС. Преимуществом данного метода является ясный физический смысл деформирования сталежелезобетонных элементов на различных стадиях работы под нагрузкой по сравнению с линейным расчетом по приведенному поперечному сечению.

Предлагаемая методика расчета основана на использовании диаграмм деформирования материалов и допущении о линейном распределении средних относительных деформаций жесткой арматуры, сборного и монолитного железобетона по поперечному сечению и позволяет учесть стадийность работы под нагрузкой изгибаемых сталежелезобетонных элементов, вынужденные усадочные деформации при твердении монолитного бетона, деформации ползучести бетона сборных элементов и монолитного бетона. Учет при вычислении параметров НДС усадки и ползучести бетона, увеличивающих деформативность изгибаемых сталежелезобетонных элементов, позволяет повысить надежность проектных решений.

Критерий вычисления изгибающего момента, соответствующего прочности изгибаемого элемента, не требующий нормирования предельной сжимаемости бетона, позволяет учитывать высокую степень перераспределения усилий в поперечном сечении сталежелезобетонного элемента с жесткой арматурой из мягкой стали при использовании диаграммы деформирования бетона без введения ограничений на протяженность нисходящей ветви.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тамразян А.Г., Лолейт А.Ф. История развития теории железобетона: биографический очерк. – М.: МГСУ, 2018. – 184 с.
2. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 205–208.
3. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и стр.-во. – 2018. – № 2. – С. 27–34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004.
4. Виноградова Н.А., Швец Г.А. Исследования сталежелезобетонных изгибаемых конструкций (обзор) // Вестн. инженер. школы ДВФУ. – 2020. – № 1(42). – С. 115–127.
5. Расчет сталежелезобетонной колонны высотного дома на косое внецентренное сжатие / М.А. Десяткин, Д.В. Конин, А.С. Мартиросян и др. // Жилищное стр.-во. – 2015. – № 5. – С. 92–95.
6. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на угловых анкерных упорах // Вестн. МГСУ. – 2021. – № 2. – С. 144–152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152.
7. Васильев А.П. Железобетон с жесткой арматурой / Нар. ком. по строительству. Техн. упр. Центр. науч.-исслед. инст. промышленных сооружений – ЦНИПС. – М.; Л.: Гос. изд. строит. лит., 1941. – 123 с.
8. Мухамедиев Т.А., Старчикова О.И. Расчет прочности сталежелезобетонных колонн с использованием деформационной модели // Бетон и железобетон. – 2006. – № 4(541). – С. 18–20.
9. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Изв. Казан. гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2013. – № 4(26). – С. 113.
10. Кудинов О.В. Новый подход к оценке прочности сталежелезобетонных перекрытий // Бетон и железобетон. – 2010. – № 2(563). – С. 14–16.
11. Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Современное состояние нелинейных расчетов железобетонных конструкций // Сейсмостойкое стр.-во. Безопасность сооружений. – 2017. – № 3. – С. 50–53.
12. Gholamhoseini A., Gilbert R.I., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking // ACI Structural Journal. – 2018. – Vol. 115(2). – P. 439–449. DOI: 10.14359/51701133.
13. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций: сб. науч. тр. НИИЖБ Госстроя СССР / Под ред. С.М. Крылова и Т.А. Мухамедиева. – М.: НИИЖБ, 1986. – С. 7–25.
14. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М.: Стройиздат, 1982. – 287 с.
15. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д.Н. Лазовский, В.В. Тур, Д.О. Глухов и др. // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2021. – № 2(125). – С. 7–12. DOI: 10.36773/1818-1212-2021-125-2.
16. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 1998. – 240 с.
17. Мурашев В.Н., Сигалов Э.Е., Байков В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс. – М.: Гос. изд-во лит. по стр.-ву, архитектуре и строит. материалам, 1962. – 659 с.
18. Немировский Я.М. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружении // Бетон и железобетон. – 1955. – № 5. – С. 172–176.
19. Немировский Я.М. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещиной и пересмотр на этой основе теории расчета деформаций и раскрытия трещин // Прочность и жесткость железобетонных конструкций. – М.: [б.и.], 1968. – С. 47–54.
20. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
21. Мухамедиев Т.А., Нугужина Г.С. Учет деформаций ползучести на основе диаграмм-изохрон в расчетах стержневых железобетонных элементов // Инженерные проблемы современного железобетона. – Иваново: ИИСИ, 1995. – С. 247–252.
22. Мухамедиев Т.А., Сапожников М.А. Расчет стержневых элементов и систем из них с учетом режимов кратковременных нагружений // Новые экспериментальные исследования и методы расчета железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1989. – С. 119–128.
23. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
24. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций. – Брест, 2003. – 252 с.
25. Bortolotti L. First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension // ACI Materials Journal. – 1991. – Vol. 88, № 1. – P. 70–73.
26. Kolleger J. Comparison of Fixed and Rotating Crack Models in the Analysis of Panels, Plates and Shells Subjected to Shear // Concrete Shear in Earthquake: Houston International Workshop, Texas, USA, 13–16 January 1991. – P. 216–225.
27. Замалиев Ф.С. Учет начальных напряжений и деформаций при оценке несущей способности сталежелезобетонных конструкций на эксплуатационные нагрузки // Изв. КГАСУ. – 2017. – № 1(39). – С. 91–101.
28. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Диаграммы деформирования бетона, их трансформации в зависимости от различных факторов и использование в расчетах конструкций // Предельные состояния бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений: материалы конференций и совещаний по гидротехнике. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
29. Чайка В.П. Характеристики диаграмм неоднородного сжатия бетона // Бетон и железобетон. – 1994. – № 1. – С. 18–23.
30. Прокопович И.Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояние сооружений. – М.: Стройиздат, 1963. – 260 с.
31. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А. Прикладная теория ползучести. – М.: Стройиздат, 1980. – 240 с.

## REFERENCES

1. Tamrazyan, A.G. & Loleit, A.F. (2018). *Istoriya razvitiya teorii zhelezobetona: biograficheskii ocherk*. Moscow: MGSU. (In Russ.).
2. Babalich, V.S. & Androssov, E.N. (2017). Stalezhelezobetonnye konstruktсии i perspektiva ikh primeneniya v stroitel'noi praktike Rossii [Steel-reinforced concrete structures and the prospects for their application in Russian construction practice]. *Uspeshki sovremennoi nauki [Advances in modern science]*, 4(4), 205–208. (In Russ., abstr. in Engl.).

3. Kibireva, Yu.A. & Astaf'eva, N.S. (2018). Primenenie konstruktсии iz stalezhelezobetona [The use of steel-concrete structures]. *Ekologiya i stroitel'stvo [Ekologiya i stroitel'stvo]*, (2), 27–34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Vinogradova, N.A. & Shvets, G.A. (2020). Issledovaniya stalezhelezobetonnykh izgibaemykh konstruktсии (obzor) [Research of steel-reinforced concrete bendable structures (review)]. *Vestn. inzhener. shkoly DVFU [Bulletin of the FEFU engineering school]*, 1(42), 115–127. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Desyatkin, M.A., Konin, D.V., Martirosyan, A.S. & Travush, V.I. (2015). Raschet stalezhelezobetonnoi kolonny vysotnogo doma na kosoe vnentsentrennoe szhatie [Calculation of a steel-reinforced concrete column of a high-rise building for oblique eccentric compression]. *Zhilishchnoe str-vo [Housing construction]*, (5), 92–95. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Tonkikh, G.P. & Chesnokov, D.A. (2021). Eksperimental'noe issledovanie sdvigovogo soedineniya monolitnykh stalezhelezobetonnykh perekrytii na ugolkovykh ankernykh uporakh [An experimental study of a shear connection of steel-reinforced concrete slabs with angle shear studs]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, (2), 144–152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Vasil'ev, A.P. (1941). *Zhelezobeton s zhestkoi armaturoi*. Moscow; Leningrad: Gos. izd. stroit. lit. (In Russ.).
8. Mukhamediev, T.A. & Starchikova, O.I. (2006). Raschet prochnosti stalezhelezobetonnykh kolonn s ispol'zovaniem deformatsionnoi modeli. *Beton i zhelezobeton*, 4(541), 18–20. (In Russ.).
9. Karpenko, N.I., Sokolov, B.S. & Radaikin, O.V. (2013). K raschetu prochnosti, zhestkosti i treshchinostoikosti vnentsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov s primeneniem nelineinoy deformatsionnoi modeli [Calculation of strength, stiffness and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using a non-linear deformation model]. *Izv. Kazan. gos. arkhitektur.-stroit. un-ta [News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]*, 4(26), 113–120.
10. Kudinov, O.V. (2010). Novyi podkhod k otsenke prochnosti stalezhelezobetonnykh perekrytii. *Beton i zhelezobeton*, 2(563), 14–16. (In Russ.).
11. Arleninov, P.D. & Krylov, S.B. (2017). Sovremennoe sostoyanie nelineinykh raschetov zhelezobetonnykh konstruktсии [The current state of nonlinear calculations of reinforced concrete structures]. *Seismostoikoe str-vo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety]*, (3), 50–53. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Gholamhoseini, A., Gilbert, R.I. & Bradford, M. (2018). Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking. *ACI Structural Journal*, 115(2), 439–449. DOI: 10.14359/51701133.
13. Karpenko, N.I., Mukhamediev, T.A. & Petrov, A.N. (1986). Iskhodnye i transformirovannye diagrammy deformirovaniya betona i armatury. In S.M. Krylov (Eds.) & T.A. Mukhamediev (Eds.) *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktсии*: sb. nauch. tr. NIIZhB Gosstroya SSSR (7–25). Moscow: NIIZhB. (In Russ.).
14. Bondarenko, V.M. & Bondarenko, S.V. (1982). *Inzhenernye metody nelineinoy teorii zhelezobetona*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
15. Lazovskii, D.N., Tur, V.V., Glukhov, D.O. & Lazovskii, E.D. (2021). Uchet polzuchesti i usadki betona po SP 5.03.01-2020 pri raschete zhelezobetonnykh konstruktсии na osnove deformatsionnoi raschetnoi modeli [Creep and Shrinking of Concrete Accounting According to SP 5.03.01-2020 When Analysis of Reinforced Concrete Structures Based on Deformational Analytical Model]. *Vestn. Brest. gos. tekhn. un-t [Vestnik of Brest State Technical University]*, 2(125), 7–12. DOI: 10.36773/1818-1212-2021-125-2. (In Russ., abstr. in Engl.).
16. Lazovskii, D.N. (1998). *Usilenie zhelezobetonnykh konstruktсии ekspluatiruemykh stroitel'nykh sooruzhenii*. Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ.).
17. Murashev, V.N., Sigalov, E.E. & Baikov, V.N. (1962). *Zhelezobetonnye konstruktсии. Obshchii kurs*. Moscow: Gos. izd-vo lit. po str-vu, arkhitekture i stroit. materialam. (In Russ.).
18. Nemirovskii, Ya.M. (1955). Zhestkost' izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri kratkovremennom i dlitel'nom zagruzheniyakh. *Beton i zhelezobeton*, (5), 172–176. (In Russ.).
19. Nemirovskii, Ya.M. (1968). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov s uchetom raboty rastyanutogo betona nad treshchinoy i peresmotr na etoi osnove teorii rascheta deformatsii i raskrytiya treshchin. In *Prochnost' i zhestkost' zhelezobetonnykh konstruktсии* (47–54). Moscow: [b.i.]. (In Russ.).
20. Berg, O.Ya. (1962). *Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona*. Moscow: Gosstroizdat. (In Russ.).
21. Mukhamediev, T.A. & Nuguzhinova, G.S. (1995). Uchet deformatsii polzuchesti na osnove diagramm-izokhron v raschetakh sterzhnevyykh zhelezobetonnykh elementov. In *Inzhenernye problemy sovremennoy zhelezobetona* (247–252). Ivanovo: IISI. (In Russ.).
22. Mukhamediev, T.A. & Sapozhnikov, M.A. (1989). Raschet sterzhnevyykh elementov i sistem iz nikh s uchetom rezhimov kratkovremennykh nagruzhenii. In *Novye eksperimental'nye issledovaniya i metody rascheta zhelezobetonnykh konstruktсии* (119–128). Moscow: NIIZhB. (In Russ.).
23. Berg, O.Ya., Shcherbakov, E.N. & Pisanko, G.N. (1971). *Vysokoprochnyi beton*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
24. Tur, V.V. & Rak, N.A. (2003). *Prochnost' i deformatsii betona v raschetakh konstruktсии*. Brest: BG TU. (In Russ.).
25. Bortolotti, L. (1991). First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension. *ACI Materials Journal*, 88(1), 70–73.
26. Kolleger, J. (1991). Comparison of Fixed and Rotating Crack Models in the Analysis of Panels, Plates and Shells Subjected to Shear. In *Concrete Shear in Earthquake*: Houston International Workshop, Texas, USA, 13–16 January 1991 (216–225).
27. Zamaliev, F.S. (2017). Uchet nachal'nykh napryazhenii i deformatsii pri otsenke nesushchei sposobnosti stalezhelezobetonnykh konstruktсии na ekspluatatsionnye nagruzki. *Izv. KGASU*, 1(39), 91–101. (In Russ.).
28. Karpenko, N.I., Mukhamediev, T.A. & Petrov, A.N. (1987). Diagrammy deformirovaniya betona, ikh transformatsii v zavisimosti ot razlichnykh faktorov i ispol'zovanie v raschetakh konstruktсии. In *Predel'nye sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktсии energeticheskikh sooruzhenii*: materialy konferentsii i soveshchaniy po gidrotekhnike. Leningrad: Energoatomizdat. (In Russ.).
29. Chaika, V.P. (1994). Kharakteristiki diagramm neodnorodnogo szhatiya betona. *Beton i zhelezobeton*, (1), 18–23. (In Russ.).
30. Prokopovich, I.E. (1963). *Vliyaniye dlitel'nykh protsessov na napryazhennoe i deformirovannoe sostoyanie sooruzhenii*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
31. Prokopovich, I.E. & Zedgenidze, V.A. (1980). *Prikladnaya teoriya polzuchesti*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).

**NONLINEAR CALCULATION OF BENT STEEL-REINFORCED CONCRETE ELEMENTS**

**D. LAZOUSKI<sup>1)</sup>, D. GLUKHOV<sup>2)</sup>, A. KHATKEVICH<sup>3)</sup>, A. HIL<sup>4)</sup>, E. CHAPARANGANDA<sup>5)</sup>**  
*(<sup>1), 3), 4)</sup> Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, <sup>2)</sup> LLC «SoftClub», Minsk,  
<sup>5)</sup> Botswana International University of Science and Technology)*

*Steel-reinforced concrete structures at the present stage of development of the construction industry are widely used in industrial buildings with heavy loads on floors, civil high-rise buildings and various engineering structures. The article presents the results of using a nonlinear calculation method to calculate the parameters of the stress-strain state (normal stresses and relative deformations at any stage of work under load, strength and deformability) of bent steel-reinforced concrete elements, provided that rigid steel profiles and reinforced concrete work together.*

*When calculating the parameters of the stress-strain state of steel-reinforced concrete elements, the stages of their work during manufacture (forced shrinkage deformations of monolithic concrete during its hardening) and operation (creep of concrete under prolonged load action) are taken into account. A criterion for calculating the bending moment corresponding to the strength of a steel-reinforced concrete element is proposed, which does not require normalization of the ultimate compressibility of concrete, allowing for a high degree of redistribution of forces in the cross section of a steel-reinforced concrete element with rigid reinforcement. The advantages of the nonlinear calculation method are demonstrated by examples of steel-reinforced concrete floor beams from TKP 45-5.03-16-2005 "Structures of steel-reinforced concrete coatings and floors. Design rules".*

**Keywords:** *bendable steel-reinforced concrete element, nonlinear calculation method, physical nonlinearity, deformation diagrams of materials, flexible reinforcement, rigid reinforcement, monolithic concrete, hypothesis of flat sections, stress-strain state, stages of work under load, forced deformation of concrete shrinkage, creep of concrete.*

УДК 691.1

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-24-30

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕРЕЗОВОЙ КОРЫ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ  
В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЕВОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

*канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ, Р.Л. ОБРОМПАЛЬСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Рассматриваются результаты исследований по получению из березовой коры структурообразующего материала для тепловой изоляции. После изучения свойств коры предложено разделять березовую кору на луб и бересту. Изучено влияние фракционированных составов коры, луба и бересты на коэффициент теплопроводности экспериментальных составов. Установлено, что наибольшим теплоизолирующим эффектом обладает береста. Независимо от способа измельчения бересты при плотности 100–150 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности составляет 0,037–0,039 Вт/(м·°С).*

**Ключевые слова:** коэффициент теплопроводности, плотность, кора березы, луб, береста.

**Введение.** Древесина в Беларуси является экономически важным возобновляемым природным ресурсом. По данным национального статистического комитета Республики Беларусь за 2023 год, площадь посадки и посева лесов составляет 30 тыс. га, из них 88,9% предназначены для лесозаготовки<sup>1</sup>. Данные статистики свидетельствуют об увеличении объема ежегодной заготовки ликвидной древесины с 20,9 млн м<sup>3</sup> в 2019 году до 25,7 млн м<sup>3</sup> в 2023 году<sup>2</sup>. Согласно государственной программе «Белорусский лес» на 2021–2025 год, запланировано увеличение ежегодной заготовки объемов древесины до 26,6 млн м<sup>3</sup> в 2025 году<sup>3</sup>. На территории страны к основным лесобразующим породам относятся: сосна – 54,8% от общей площади покрытых лесом земель, береза – 18,8%, ель – 11%, ольха черная – 8,2%. Остальные породы (дуб, осина, граб и т.п.) занимают площадь, суммарно равную – 7,2% [1]. Таким образом, расширение сферы применения лесных ресурсов в промышленном производстве и увеличение объемов лесодобычи обуславливает научный интерес к исследованиям, связанным с переработкой различных пород древесины, и в первую очередь березы.

Современный рынок строительных материалов представлен различной продукцией, выполненной с использованием березового массива, такой как: цельный брус, клееный брус, клееный профилированный брус с наружными ламелями, доски и столярные щиты. Также изготавливаются межкомнатные дверные полотна и рамы, различные перегородки и стеновые панели, паркетная доска, фанера. Несмотря на небольшую стойкость к гниению, древесина березы имеет ряд положительных свойств, являясь прочной, твердой и технологичной в работе. В ней отмечается пониженное содержание смол и дубильных веществ [2].

Побочным продуктом деревообработки является березовая кора, состоящая из бересты и луба. Одним из возможных способов использования коры березы считается химическая переработка для извлечения биологически активных веществ, таких как бетулин и суберин [3–6]. Также она используется при производстве фосфорных биокомпозитных удобрений [7; 8]. Кроме того, известен опыт получения биотоплива с использованием березовой коры<sup>4</sup> [9]. Березовый луб находит применение в качестве сырья для получения дубильных веществ и антоцианидиновых красителей [10]. В работах [11–13] рассмотрена возможность получения и практического применения углеродных сорбентов, полученных на основе березового луба.

Бересту используют при изготовлении материалов для внутренней отделки. Так, Шадринская берестяная мастерская «Честа» выпускает берестяную фанеру, изготовленную из нескольких слоев предварительно подготовленной бересты. Для повышения прочности и устойчивости к деформации готового изделия слои чередуются под углом 90° по направлению волокон. В качестве связующего вещества использован нетоксичный фенолформальдегидный клей «БФ-6, медицинский»<sup>5</sup>.

Разработано покрытие для пола с лицевым декоративным слоем из подготовленной бересты<sup>6</sup>. Финишный защитный слой выполнен из натуральных или полимерных ингредиентов, в результате чего образуется особо устойчивое к влаге и механическим нагрузкам декоративное покрытие.

<sup>1</sup> Национальный статистический комитет Республики Беларусь. URL: [https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/oficial\\_statistika/2023/infographics\\_forest-2023-1.pdf](https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/oficial_statistika/2023/infographics_forest-2023-1.pdf).

<sup>2</sup> Национальный статистический комитет Республики Беларусь. URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/38b/0zivld0r04aj7eajlmczbajh3me35tfj.pdf?ysclid=lvbw62b-8fb907354756>.

<sup>3</sup> О Государственной программе «Белорусский лес» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 янв. 2021 г., № 52 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100052>.

<sup>4</sup> Установка для получения биотоплива из березовой коры: пат. RU 2672246 C1 / В.И. Мелехов, О.Д. Мюллер, Н.Г. Пономарева, Т.В. Тюрикова, Е.В. Сазанова. – Оpubл. 13.11.2018.

<sup>5</sup> Берестяная фанера: пат RU 138174 U1 / В.Г. Махнюк, А.В. Романовский. – Оpubл. 10.03.2014.

<sup>6</sup> Декоративное покрытие для пола из натуральной бересты: пат RU 138174 U1 / С.В. Матюнин, А.С. Храмов. – Оpubл. 10.09.2012.



В Поволжском государственном технологическом университете исследована возможность получения отделочных плит из березовой коры без использования связующего. После сбора кору измельчали, сушили, сортировали по фракциям. Затем из коры формировали ковер методом горячего прессования при температуре 160 °С, после чего обрезали плиты по размеру. В результате прессования получали плиты толщиной 14 мм со значением предела прочности при статическом изгибе равным 3,02 МПа при средней плотности образцов 716 кг/м<sup>3</sup> [14].

Теплоизоляционные плиты на основе бересты получены в Воронежском государственном лесотехническом университете имени Г.Ф. Морозова. В качестве древесного наполнителя использовали измельченную бересту размерами частиц от 150 до 3000 мкм, как связующее применялся гидролизированный суберин. После измельчения и сушки сырья плиты формировались методом горячего прессования при температуре 135–145 °С и давлении от 10 до 15 МПа с последующей выдержкой в течение 24 часов при температуре воздуха 20±3 °С. В результате при плотности плит 200–210 кг/м<sup>3</sup> и прочности на разрыв 0,2–0,5 МПа коэффициент теплопроводности составил 0,041 Вт/(м·°С), а коэффициент звукопоглощения – 0,4<sup>7</sup>. Следует отметить, что для теплоизоляционных материалов в работах<sup>8</sup> [14] отсутствуют сведения о горючести плит.

**Материалы и методы испытаний.** В качестве исходного структурообразующего материала для экспериментальной тепловой изоляции использовали кору березы, полученную при переработке древесины на предприятиях Полоцкого района.

Кора березы включает в себя две четко различимые области – наружная (береста) и внутренняя (луб), существенно отличающиеся по химическому составу. На долю бересты приходится 5,4% от веса березы [15]. Береста характеризуется белым цветом, что обусловлено наличием бетулина – белого порошкообразного вещества, содержащегося в клетках. В экстрактах из бересты наряду с бетулином содержатся окисленные производные: бетулиновая кислота, бетулиновый альдегид, метиловый эфир бетулиновой кислоты. Бетулин и бетулиновая кислота представляют интерес для медицины в качестве основы для разработки новых противовирусных агентов. Луб содержит относительно меньшее количество экстрактивных веществ. Во внутренней области коры содержание целлюлозы варьируется в пределах 19,3–25,2%, лигнина 24,7–37,9%, легкогидролизуемых полисахаридов 18,1–26,9%, трудногидролизуемых полисахаридов 17,1–22,8% и золы 1,1–2,4%. Луб березы содержит 9–12% дубильных и до 6,5% сахаристых веществ [16].

При получении структурообразующего материала из коры для теплоизоляции применяли два метода переработки сырья: ручной с использованием секатора и механизированный с применением измельчителя «Эликор 1». Размер частиц на выходе зависел от диаметра отверстий установленных в измельчителе сит. После измельчения сырьевая масса подвергалась фракционированию через сита с ячейками диаметром 0,16–5 мм.

Основные физические показатели сырьевых материалов – плотность и влажность – измеряли в соответствии с ГОСТ 17177.

Коэффициент теплопроводности экспериментальных составов определяли по стандарту EN 12667 на образцах размером 250×250×30 мм. В каждой серии испытывали 5 образцов. Показатель измеряли для коры, луба и бересты различных фракций в насыпном и уплотненном состоянии без вяжущего компонента. Необходимый объем фракционированного сырья засыпали и равномерно распределяли в измерительной камере прибора «ИТП – МГ4» между теплой плитой (40 °С) и холодной плитой (10 °С) для определения коэффициента теплопроводности.

**Результаты лабораторных исследований. Определение плотности и коэффициента теплопроводности березовой коры.** Для определения коэффициента теплопроводности березовую кору нарезали с помощью секатора на частицы в виде пластинок с размером ребра 10–20 мм и 5–10 мм. Толщина частиц составляла 2–5 мм. Фракции 1,25–2,5 мм и 2,5–5 мм получали на измельчителе. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Влияние фракции средней плотности на коэффициент теплопроводности березовой коры

Состав	Фракции	Средняя плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности смеси, Вт/(м·°С)
1	10–20 мм	200	0,08
2		225	0,086
3		250	0,082
4		275	0,083
5	5–10 мм	200	0,08
6		225	0,074
7		250	0,079
8		275	0,078
9	2,5–5 мм	200	0,056
10		225	0,058
11		250	0,058
12		275	0,061
13	1,25–2,5 мм	200	0,059
14		225	0,059
15		250	0,06
16		275	0,064

<sup>7</sup> Способ получения композиционного материала из коры березы: пат RU 2739888 C1 / А.С. Черных, А.С. Сысоев. – Опубл. 29.12.2020.

<sup>8</sup> См. сноску 7.

При рассмотрении результатов отмечается, что для фракции 10–20 мм минимальный коэффициент теплопроводности составляет 0,08 Вт/(м·°C) при плотности 200 кг/м<sup>3</sup> (состав 1). При незначительном повышении плотности до 225 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности увеличивается на 7,5% (состав 2). Дальнейшее возрастание плотности на 22,2% влечет за собой несущественное снижение показателя теплопроводности до уровня 0,082–0,083 Вт/(м·°C).

Для фракции 5–10 мм наибольшее снижение коэффициента теплопроводности на 7,5% отмечается при плотности 225 кг/м<sup>3</sup> (состав 6). Последующее увеличение плотности (составы 7, 8) обеспечивает повышение коэффициента теплопроводности на 5,4–6,7%. Следует отметить, что при плотности 200 кг/м<sup>3</sup> для обеих фракций коэффициент теплопроводности имеет одинаковое значение 0,08 Вт/(м·°C). Составы 6–8 при повышении плотности до 275 кг/м<sup>3</sup> имеют более низкие на 4–16% показатели теплопроводности, по сравнению с составами 2–4.

Значительное снижение коэффициента теплопроводности наблюдается на фракциях 1,25–2,5 мм и 2,5–5 мм (составы 9–16). Наименьших показателей коэффициента теплопроводности удается достичь на фракции 2,5–5 мм при плотности 200–250 кг/м<sup>3</sup>. Относительно составов фракции 5–10 мм при плотности 200 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности снижается на 30% и равен 0,056 Вт/(м·°C) (состав 9), а при плотности 225–250 кг/м<sup>3</sup> – на 21,6–26,6% (составы 10, 11).

Уменьшение размеров частиц до 1,25–2,5 мм не ведет к снижению коэффициента теплопроводности, а наоборот, фиксируется повышение показателя для всех составов до значений 0,059–0,064 Вт/(м·°C), что связано с формированием более плотной структуры тепловой изоляции и изменениями на уровне микроструктуры частиц коры.

Достаточно высокие показатели коэффициента теплопроводности березовой коры указывают на необходимость поиска технологических решений, направленных на значительное снижение исследуемого параметра. Одним из таких технологических приемов является разделение коры на две составляющие – бересту и луб. Ниже приведены исследования по изучению возможности применения бересты и луба различных фракций в виде структурообразующего материала для тепловой изоляции.

**Определение плотности и коэффициента теплопроводности березового луба и бересты.** Для дальнейших экспериментов березовую кору разделяли на две части: верхний слой – бересту, обладающую эластичностью, и нижний слой – луб, характеризующийся жесткой структурой. Измельчение исходного сырья проводили ручным и механическим способом.

**Исследование коэффициента теплопроводности лубяного слоя коры.** Первый способ подготовки сырья заключается в измельчении березового луба с помощью секатора на кубовидные частицы с ребром 3–6 мм, коэффициент теплопроводности для полученной фракции составил 0,074 Вт/(м·°C) при средней плотности 335 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует минимальному значению коэффициента теплопроводности измельченной коры березы фракции 5–10 мм (состав 6, таблица 1).

После переработки на измельчителе (второй способ) полученная сырьевая масса подвергалась фракционированию. Для каждой фракции луба в насыпном состоянии определяли коэффициент теплопроводности (таблица 2).

Таблица 2. – Коэффициент теплопроводности для полученных фракций березового луба

№ состава	Размер фракции, мм	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
1	5–10	330	0,077
2	2,5–5	350	0,068
3	1,25–2,5	365	0,059
4	0,63–1,25	385	0,078

Максимальные значения коэффициента теплопроводности равные 0,077–0,078 Вт/(м·°C) показали составы 1 и 4 при средней плотности смеси 330 и 385 кг/м<sup>3</sup>. При уменьшении размера частиц от 10 мм до 1,25 мм наблюдается постепенное снижение показателей коэффициента теплопроводности. Для состава 2 снижение коэффициента теплопроводности составило 11,7% относительно показателя состава 1. Тенденция уменьшения коэффициента на 13,2% сохранилась и для состава 3 в сравнении с составом 2. Резкое повышение коэффициента теплопроводности на 32,2% зафиксировано на минимальной фракции 0,63–1,25 мм, что обусловлено значительным нарушением целостности микроструктуры мелких частиц при измельчении.

Далее изучали влияние процентного содержания фракций составов 2 и 3 на показатель коэффициента теплопроводности и средней плотности смеси, результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Влияние соотношения фракций луба на коэффициент теплопроводности смеси

Состав	Содержание фракции 2,5–5 мм и фракции 1,25–2,5 мм в смеси, %	Насыпная плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности смеси, Вт/(м·°C)
1	90/10	350	0,058
2	80/20	355	0,062
3	70/30	355	0,064
4	60/40	360	0,062
5	50/50	360	0,062

При замещении части фракции 2,5–5 мм на фракцию 1,25–2,5 мм коэффициент теплопроводности понижается на 5,9–17,2% относительно значения состава 2 (таблица 2). Наименьшего значения коэффициента теплопроводности удается достичь при введении 10% фракции 1,25–2,5 мм. Таким образом коэффициент теплопроводности состава 1 (таблица 3) снижается на 17,2% относительно значения состава 2 (таблица 2). Дальнейшее увеличение дозировки фракции 1,25–2,5 мм не приводит к существенному понижению коэффициента теплопроводности в сравнении с показателями состава 2 (таблица 2).

Следует отметить, что на березовом лубе удается достичь значений коэффициента теплопроводности на уровне 0,058–0,059 Вт/(м·°С), что незначительно превышает минимальный показатель на коре (состав 9, таблица 1).

*Исследование коэффициента теплопроводности бересты.* Подготовка сырья заключалась в разделении бересты вручную на фрагменты в виде полосок. По размерам полоски бересты разделяли на три фракции (таблица 4).

Таблица 4. – Размеры частиц бересты по фракциям

№ фракции	Размеры частиц		
	толщина, мм	ширина, мм	длина, мм
1	0,5–2	3–4	20–40
2	0,1–0,5	3–4	20–40
3	0,1–0,5	4–7	20–40

Для полученных фракций бересты определяли коэффициент теплопроводности при изменении плотности. Результаты исследований приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Изменение коэффициента теплопроводности бересты в зависимости от плотности и фракции частиц

Средняя плотность фракции, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)		
	Фракция 1	Фракция 2	Фракция 3
45	0,077	-	-
50	0,072	0,048	0,05
75	0,064	0,048	0,047
100	0,052	0,044	0,043
125	0,05	0,041	0,04
138	0,048	0,041	0,039
150	0,048	0,04	0,039
163	0,05	0,042	0,042
175	0,053	0,042	0,043

Максимальное значение коэффициента теплопроводности для фракции 1 составило 0,077 Вт/(м·°С) при плотности 45 кг/м<sup>3</sup>. Повышение средней плотности в 2,2 раза (100 кг/м<sup>3</sup>) приводит к понижению коэффициента теплопроводности на 32,4%, до показателя 0,052 Вт/(м·°С). Минимального значения коэффициент теплопроводности равный 0,048 Вт/(м·°С) достигает при плотности 138 кг/м<sup>3</sup>, что на 37,7% ниже максимального значения.

При изучении показателей фракции 2 установлено, что для плотности 50–75 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности соответствует 0,048 Вт/(м·°С). При увеличении средней плотности в 3 раза наблюдается снижение коэффициента теплопроводности на 20% до наименьшего значения равного 0,04 Вт/(м·°С). Дальнейшее возрастание плотности вызывает незначительное повышение коэффициента теплопроводности до 0,042 Вт/(м·°С).

Для фракции 3 при плотности 138–150 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности равен 0,039 Вт/(м·°С). Понижение плотности материала до 50 кг/м<sup>3</sup> влечет повышение коэффициента теплопроводности на 28,2%. При плотности 175 кг/м<sup>3</sup> также отмечается прирост показателя теплопроводности бересты на 10,3%.

При ручной переработке бересты наилучшие показатели коэффициента теплопроводности равные 0,039–0,04 Вт/(м·°С) демонстрируют фракции 2 и 3 при плотности 138–150 кг/м<sup>3</sup>, что на 14,6–18,8% ниже значений фракции 1.

После измельчения бересты механическим способом максимальный размер частиц соответствовал 10 мм, часть смеси подвергали фракционированию. Для полученных фракций на разных плотностях определяли коэффициент теплопроводности. В результате получены зависимости изменения коэффициента теплопроводности бересты исходя из средней плотности по фракциям (рисунок 1).

Для нефракционированной смеси наименьший коэффициент теплопроводности 0,039 Вт/(м·°С) соответствует средней плотности в пределах 100–125 кг/м<sup>3</sup>. Снижение и повышение плотности влечет повышение коэффициента теплопроводности на 10,2–30,7%.

Следует отметить, что в сравнении с нефракционированной берестой для фракции 5–10 мм значения коэффициента теплопроводности показали тенденцию в сторону увеличения на 1,9–18,6% при минимальной величине 0,044 Вт/(м·°С) для плотности 100–125 кг/м<sup>3</sup>.

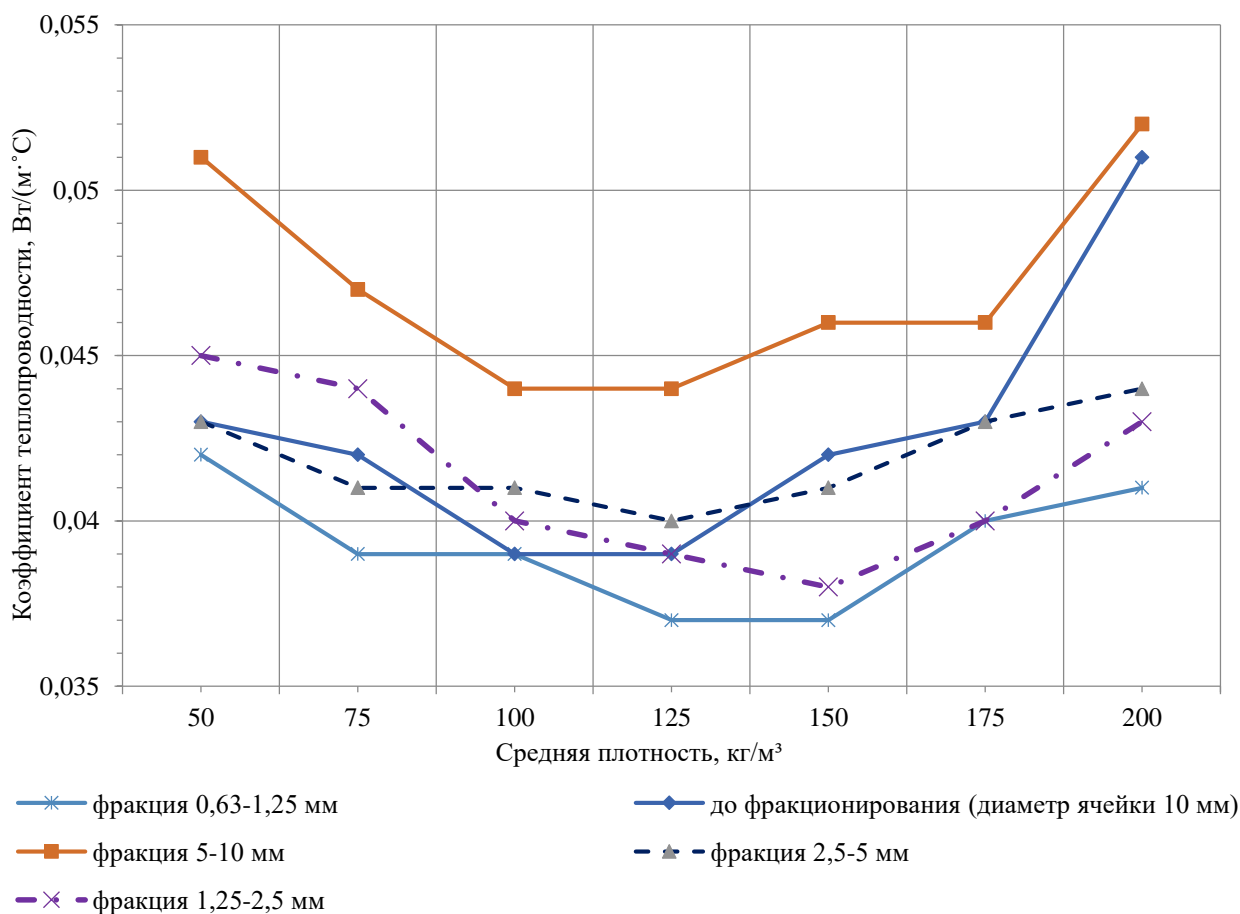


Рисунок 1. – Изменение коэффициента теплопроводности бересты в зависимости от средней плотности по фракциям

Показатели коэффициента теплопроводности фракции 2,5–5 мм практически совпадают со значениями нефракционированной бересты. Наименьшие показатели коэффициента теплопроводности 0,04–0,041 Вт/(м·°С) получены на плотностях 75–150 кг/м³.

Уменьшение размеров частиц до фракции 1,25–2,5 мм позволяет при плотности 150 кг/м³ получить коэффициент теплопроводности бересты равный 0,038 Вт/(м·°С). Для бересты плотностью в границах 100–175 кг/м³ коэффициент теплопроводности не превышает показатель 0,04 Вт/(м·°С).

При исследовании фракции 0,63–1,25 мм установлено, что в основном береста имеет показатели коэффициента теплопроводности на 2,3–19,6% ниже значений нефракционированной смеси. На плотностях 125–150 кг/м³ удастся получить минимальный коэффициент теплопроводности 0,037 Вт/(м·°С). В случае снижения плотности до 50 кг/м³ коэффициент теплопроводности повышается на 13,5%. При повышении показателя до 200 кг/м³ коэффициент теплопроводности увеличивается на 10,8%.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о возможности получения высокоэффективной изоляции из механически измельченной бересты с размером частиц по ширине менее 10 мм без фракционирования и после фракционирования размерами частиц по ширине 1,25–2,5 мм и 0,63–1,25 мм, обеспечивающей коэффициент теплопроводности на уровне 0,037–0,4 Вт/(м·°С).

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Результаты исследований показывают, что применение березовой коры в качестве утеплителя не обеспечивает высоких теплоизоляционных показателей ограждающих конструкций, так как минимальные коэффициенты теплопроводности коры соответствуют 0,056–0,059 Вт/(м·°С) при плотности 200–250 кг/м³.

2. Эксперименты с лубяной частью березовой коры позволили установить, что применение фракции луба 1,25–5 мм позволяет получить составы с коэффициентом теплопроводности 0,058–0,059 Вт/(м·°С), что сопоставимо с показателями березовой коры.

3. Наибольший эффект достигается при использовании для тепловой изоляции бересты после механического измельчения через сито с размером ячеек 10 мм. Применение нефракционированной измельченной бересты, а также фракции 0,63–2,5 мм дает возможность получать при плотности смеси 100–150 кг/м³ теплоизоляционные составы с коэффициентом теплопроводности 0,037–0,039 Вт/(м·°С), что на 30,3–33,9% ниже минимального показателя коры и на 32,7–36,2% – значений березового луба.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бухтик М.И., Трухнова Д.С. Лесное хозяйство Беларуси: эффективное использование // Устойчивое развитие экономики: состояние, проблемы, перспективы: сб. тр. XVI междунар. науч.-практ. конф., Пинск, 29 апр. 2022 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь и др.; редкол.: В.И. Дунай [и др.]. – Пинск: ПолесГУ, 2022. – Ч. 1. – С. 21–25.
2. Алексеева А.А., Суханов Ю.В. К вопросу расширения использования древесины березы в строительстве // Деревянное домостроение Севера: традиции и инновации: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 14–15 фев. 2023 г. – Петрозаводск: Петрозавод. гос. ун-т, 2023. – С. 8–11.
3. Methods of betulin extraction from birch bark / O.V. Demets, A.T. Takibayeva, R.Z. Kassenov et al. // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, № 11. DOI: 10.3390/molecules27113621.
4. Выделение бетулина и суберина из коры березы, активированной в условиях «взрывного автогидролиза» / Б.Н. Кузнецов, В.А. Левданский, А.П. Еськин и др. // *Химия растительного сырья*. – 1998. – № 1. – С. 5–9.
5. Левданский В.А., Кузнецов Б.Н., Полежаева Н.И. Влияние активации коры березы перегретым паром на выход и состав экстрактов, содержащих бетулин и дубильные вещества // *Химия раст. сырья*. – 2005. – № 2. – С. 15–20.
6. Судакова И.Г., Кузнецов Б.Н., Гарынцева Н.В. Изучение процесса выделения субериновых веществ из бересты березовой коры // *Химия растит. сырья*. – 2008. – № 1. – С. 41–44.
7. Синтез и свойства биокomпозитных удобрений на основе мочевины и коры березы / С.А. Кузнецова, Б.Н. Кузнецов, Е.С. Скурыдина и др. // *Журнал Сиб. федер. ун-та. Химия*. – 2013. – Т. 6, № 4. – С. 380–393.
8. Получение и свойства фосфорных биокomпозитных удобрений на основе коры березы / Е.В. Веприкова, С.А. Кузнецова, Н.В. Чесноков и др. // *Журнал Сиб. федер. ун-та. Химия*. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 413–421.
9. Энергетический потенциал биотоплива из коры лиственных пород древесины / В.И. Мелехов, О.Д. Мюллер, Н.Г. Пономарева и др. // *Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Материалы. Конструкции. Технологии*. – 2019. – № 3. – С. 28–37. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.28.
10. Получение дубильных веществ, красителей и энтеросорбентов из луба березовой коры / С.А. Кузнецова, В.А. Левданский, Б.Н. Кузнецов и др. // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2005. – Т. 13, № 3. – С. 401–409.
11. Свойства энтеросорбентов, полученных из автогидролизованной коры березы / Е.В. Веприкова, С.А. Кузнецова, Н.В. Чесноков и др. // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2012. – Т. 20, № 6. – С. 673–678.
12. Albumine, bilirubine and activated carbon: new edges of an old triangle / V.V. Sarnatskaya, W.E. Lindup, P. Walther et al. // *Artif Cells Blood Substit Immobil Biotechnol.* – 2002. – № 30(2). – P. 113–126. DOI: 10.1081/bio-120003192.
13. Изучение сорбции маркера белковой природы – желатина на пористой подложке из луба березы / Е.В. Веприкова, М.Л. Щипко, С.А. Кузнецова и др. // *Катализ в промышленности*. – 2011. – № 2. – С. 72–76.
14. Семенова Е.Г., Микрюкова Е.В. Изготовление плитных материалов из березовой коры // Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам: сб. науч. тр. по результатам работы V Междунар. молодеж. науч.-практ. конф., Вологда-Молочное, 23 апр. 2020 г. – Т. 3, Ч. 1. – Вологда-Молочное: Вологод. гос. молочнохоз. акад. им. Н.В. Верещагина, 2020. – С. 252–255.
15. Ведерников Д.Н., Шабанова Н.Ю., Рошин В.И. Изменение химического состава корки и луба березы повислой *Betula pendula* Roth. (Betulaceae) по высоте дерева // *Химия раст. сырья*. – 2010. – № 2. – С. 43–48.
16. Белякова А.Ю., Погребняк А.В., Погребняк Л.В. Физико-химические и биологические свойства компонентов внешней коры березы // *Соврем. проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2-2. – С. 492.

## REFERENCES

1. Bukhtik, M.I. & Trukhnova, D.S. (2022). Lesnoe khozyaistvo Belarusi: effektivnoe ispol'zovanie. In V.I. Dunai (Eds.) *Ustoichivoe razvitiie ekonomiki: sostoyanie, problemy, perspektivy*: sb. tr. XVI mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Pinsk, 29 apr. 2022 g. (v 2 ch., Ch. 1) (21–25). Pinsk: PolesGU, 2022. (In Russ.).
2. Alekseeva, A.A. & Sukhanov, Yu.V. (2023). K voprosu rasshireniya ispol'zovaniya drevesiny berezy v stroitel'stve. In *Derevyannoe domostroenie Severa: traditsii i innovatsii*: sb. st. po materialam Vseros. nauch.-prakt. konf., Petrozavodsk, 14–15 fev. 2023 g. (8–11). Petrozavodsk: Petrozavod. gos. un-t.
3. Demets, O.V., Takibayeva, A.T., Kassenov, R.Z. & Aliyeva, M.R. (2022). Methods of betulin extraction from birch bark. *Molecules*, 27(11). DOI: 10.3390/molecules27113621.
4. Kuznetsov, B.N., Levdanskii, V.A., Es'kin, A.P. & Polezhaeva, N.I. (1998). Vydelenie betulina i suberina iz kory berezy, aktivirovannoi v usloviyakh «vzryvnogo avtgidroliza». *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, (1), 5–9. (In Russ.).
5. Levdanskii, V.A., Kuznetsov, B.N. & Polezhaeva, N.I. (2005). Vliyanie aktivatsii kory berezy peregretym parom na vykhod i sostav ekstraktov, soderzhashchikh betulin i dubil'nye veshchestva. *Khimiya rast. syr'ya*, (2), 15–20. (In Russ.).
6. Sudakova, I.G., Kuznetsov, B.N. & Garyntseva, N.V. (2008). Izuchenie protsesssa vydeleniya suberinovykh veshchestv iz beresty berezovoi kory. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, (1), 41–44. (In Russ.).
7. Kuznetsova, S.A., Kuznetsov, B.N., Skurydina, E.S., Maksimov, N.G., Kalacheva, G.S., Ul'yanova, O.A. & Skvortsova, G.P. (2013). Sintez i svoistva biokompozitnykh udobrenii na osnove mocheviny i kory berezy [Synthesis and Properties of Biocomposite Fertilizers on the Basis of Urea and Birch Bark]. *Zhurnal Sib. feder. un-ta. Khimiya [Journal of Siberian Federal University. Chemistry]*, 6(4), 380–393. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Veprikova, E.V., Kuznetsova, S.A., Chesnokov, N.V. & Kuznetsov, B.N. (2015). Poluchenie i svoistva fosfornykh biokompozitnykh udobrenii na osnove kory berezy [Preparation and Properties of Phosphorus Biocomposite Fertilizers Based on the Birch Bark]. *Zhurnal Sib. feder. un-ta. Khimiya [Journal of Siberian Federal University. Chemistry]*, 8(4), 413–421. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Melekhov, V.I., Myuller, O.D., Ponomareva, N.G., Tyurikova, T.V. & Sazanova, E.V. (2019). Energeticheskii potentsial biotopliva iz kory listvennykh porod drevesiny [Energy Potential of Biofuels Produced from the Bark of Hardwood Timber]. *Vestn. Povolzh. gos. tekhnol. un-ta. Ser. Materialy. Konstruktii. Tekhnologii [Vestnik of Volga State University of Technology. Series Materials. Constructions. Technologies]*, (3), 28–37. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.28. (In Russ., abstr. in Engl.).

10. Kuznetsova, S.A., Levanskii, V.A., Kuznetsov, B.N. & Shchipko, M.L. (2005). Poluchenie dubil'nykh veshchestv, krasitelei i enterosorbentov iz luba berezovoi kory. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*, 13(3), 401–409. (In Russ.).
11. Veprikova, E.V., Kuznetsova, S.A., Chesnokov, N.V. & Kuznetsov, B.N. (2012). Svoistva enterosorbentov, poluchennykh iz avto-gidrolizovannoi kory berezy. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*, 20(6), 673–678. (In Russ.).
12. Sarnatskaya, V.V., Lindup, W.E., Maslenny, V.N., Yushko, L.A., Sidorenko, A.S., Nikolaev, A.V. & Nikolaev, V.G. (2002). Albumine, bilirubine and activated carbon: new edges of an old triangle. *Artif Cells Blood Substit Immobil Biotechnol*, 30(2), 113–126. DOI: 10.1081/bio-120003192.
13. Veprikova, E.V., Shchipko, M.L., Kuznetsova, S.A. & Kuznetsov, B.N. (2011). Izuchenie sorbtsii markera belkovoii prirody – zhelatina na poristoi podlozhke iz luba breezy. *Kataliz v promyshlennosti*, (2), 72–76. (In Russ.).
14. Semenova, E.G. & Mikryukova, E.V. (2020). Izgotovlenie plitnykh materialov iz berezovoi kory. In *Molodye issledovateli agro-promyshlennogo i lesnogo kompleksov – regionam: sb. nauch. tr. po rezul'tatam raboty V Mezhdunar. molodezh. nauch.-prakt. konf., Vologda-Molochnoe, 23 apr. 2020 g. (T. 3, Ch. 1) (252–255)*. Vologda-Molochnoe: Vologod. gos. molochnokhoz. akad. im. N.V. Vereshchagina. (In Russ.).
15. Vedernikov, D.N., Shabanova, N.Yu. & Roshchin, V.I. (2010). Izmenenie khimicheskogo sostava korki i luba berezy povisloi *Betula pendula* Roth. (Betulaceae) po vysote dereva. *Khimiya rast. syr'ya*, (2), 43–48. (In Russ.).
16. Belyakova, A.Yu., Pogrebnyak, A.V. & Pogrebnyak, L.V. (2015). Fiziko-khimicheskie i biologicheskie svoistva komponentov vneshnei kory breezy. *Sovrem. problemy nauki i obrazovaniya*, (2-2), 492. (In Russ.).

Поступила 28.05.2024

#### EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF BIRCH BARK BY PHYSICAL INDICATORS AS A RAW MATERIAL SOURCE FOR THE PRODUCTION OF THERMAL INSULATION

A. BAKATOVICH, R. OBROMPALSKY  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The results of research on the production of structure-forming material for thermal insulation from birch bark are considered. After studying the properties of the bark, it was proposed to divide birch bark into bast and birch bark. The influence of fractionated compositions of bark, bast and birch bark on the thermal conductivity coefficient of experimental compositions was studied. It has been established that birch bark has the greatest heat-insulating effect. Regardless of the method of grinding birch bark at a density of 100–150 kg/m<sup>3</sup>, the thermal conductivity coefficient is 0,037–0,039 W/(m·°C).*

**Keywords:** thermal conductivity coefficient, density, birch cork, bass, birch bark.

УДК 69:621.039:614.8

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-31-35

**ФОРМИРОВАНИЕ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ ЕГИПЕТ****С.Г. КОЖАРСКИЙ<sup>1)</sup>, О.В. КАПУСТИНА<sup>2)</sup>, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА<sup>3)</sup>****<sup>1)</sup> Управление охраны труда, промышленной, пожарной безопасности и охраны окружающей среды****Филиала АО «НИКИМТ-Атомстрой», Египет,****<sup>2)</sup> Управление охраны труда, промышленной безопасности и лицензирования****АО «НИКИМТ-Атомстрой», Москва,****<sup>3)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

*В настоящей статье выполнен анализ состояния культуры безопасности при строительстве атомной электростанции в Арабской Республике Египет. По результатам проведенного анализа соответствия собранных фактов нормативным критериям установлено, что при выполнении строительно-монтажных работ в Арабской Республике Египет на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа» культура безопасности имеет «вовлекающий уровень» развития с «проактивными» составляющими. В результате независимой оценки состояния культуры безопасности выявлены сильные стороны (по принятию решений, выявлению проблем и их решению, ответственности лидеров, рабочей обстановке взаимного уважения, эффективной коммуникации по вопросам безопасности), области достаточности (по персональной ответственности, непрерывному самообучению, выражению обеспокоенности и планированию работ) и точка роста (область для улучшения) по критическому отношению, требующему усилить нацеленность персонала на повышение безопасности труда.*

**Ключевые слова:** культура безопасности, строительство, атомная электростанция.

**Введение.** Безопасная и надежная эксплуатация атомной станции возможна при условии обеспечения качества на всех этапах ее жизненного цикла. Строительные работы характеризуются наиболее высоким риском несчастных случаев с летальным исходом, к примеру, в странах ЕС более 20% смертельных случаев производственного травматизма регистрируются в строительном секторе. Этап строительства атомной электростанции крайне важен для обеспечения безопасной эксплуатации станции в течение всего ее проектного срока службы. При строительстве атомных электростанций значительное внимание уделяется культуре безопасности<sup>1,2</sup> [1–8]. Культура безопасности не достигается простым следованием инструкции, недостаточно знать, что делать и как это делать, необходимо понимать, почему необходимо делать именно так. Для развития культуры безопасности требуется, чтобы работники полностью понимали ее значение и были готовы к возможным нештатным ситуациям и негативным событиям.

Анализ крупных аварий в атомной энергетике показал, что ведущей причиной большинства из них являются недостатки в управлении и организации, что обусловлено неэффективно сформированной культурой безопасности на производстве. Причиной аварии 28 марта 1979 года на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США стала неготовность операторов к правильному поведению в возникшей нештатной ситуации, а также отсутствие в инструкциях требуемого порядка действий в сложившейся чрезвычайной ситуации, после чего была пересмотрена концепция аварийных инструкций для всех АЭС. В итоговом докладе экспертов Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) о совещании по рассмотрению причин и последствий катастрофы в Чернобыле 26 апреля 1986 года (INSAG-1) использовали термин «культура безопасности», обозначалась причина аварии – неправильные действия персонала ЧАЭС. В 1988 году в атомной энергетике появилось первое определение культуры безопасности, под данным термином стали понимать следующее: «квалификационная и психологическая подготовленность всех лиц, при которой обеспечение безопасности АЭС является приоритетной целью и внутренней потребностью, приводящей к самоосознанию ответственности и к самоконтролю при выполнении всех работ, влияющих на безопасность». Концепция культуры безопасности впервые была представлена Международной консультативной группой по ядерной безопасности (INSAG) в «Итоговом докладе послеварийной обзорной конференции по Чернобыльской аварии» INSAG-1 в 1986 году. Позднее концепция была расширена в 1988 году в докладе «Об основных принципах безопасности на атомных электростанциях» INSAG-3, в 1991-м в докладе «Культура безопасности» INSAG-4, а также в INSAG-15 «Основные вопросы повышения культуры безопасности» в 2002 г. Другие документы МАГАТЭ также обращаются к принципам культуры безопасности и формулируют требования к организациям по культуре безопасности при использовании ядерной энергии<sup>3</sup> [1–7].

**Основная часть.** Объектом исследования являются строительно-монтажные работы (армирование, бетонирование, устройство гидроизоляции и монтаж металлоконструкций), выполняемые для возведения АЭС «Эль-Дабаа» в Арабской Республике Египет.

Формирование культуры безопасности при строительстве АЭС «Эль-Дабаа» осуществляется на основе единой отраслевой политики культуры безопасности Госкорпорации «Росатом»<sup>4</sup> [8].

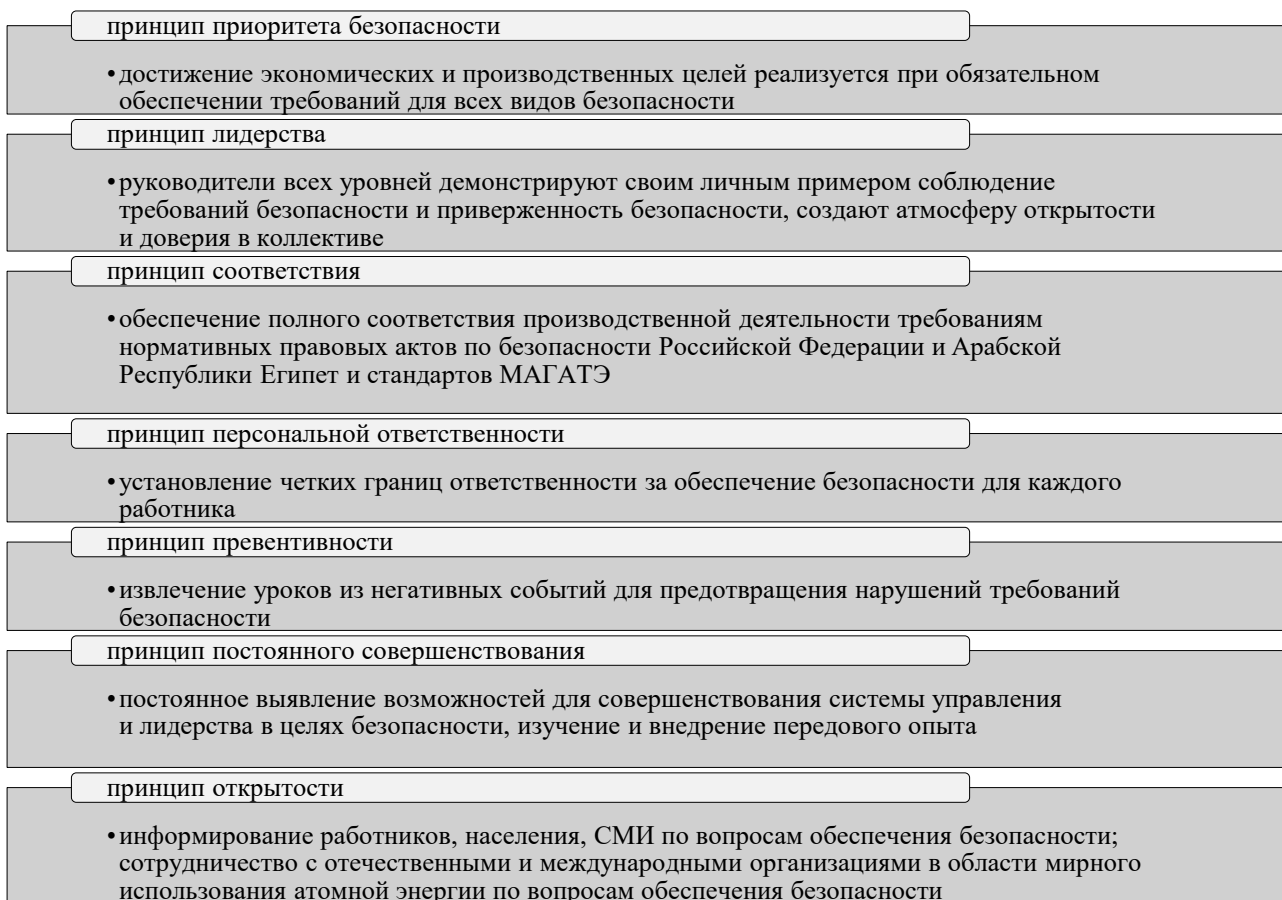
<sup>1</sup> ОПБ-88/97. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97) Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=97305>.

<sup>2</sup> Единая отраслевая политика культуры безопасности Госкорпорации «Росатом» и ее организаций [Электронный ресурс]: утв. приказом Госкорпорации «Росатом» от 19.07.2021 № 1/884-П.

<sup>3</sup> См. сноску 1.

<sup>4</sup> См. сноску 2.

Основные принципы деятельности по формированию культуры безопасности на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа» приведены на рисунке 1.



**Рисунок 1. – Основные принципы деятельности по формированию культуры безопасности на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа»**

В 2023 году в организации, осуществляющей строительно-монтажные работы на площадке возведения АЭС «Эль-Дабаа», проведена независимая оценка состояния культуры безопасности Технической академией Росатома. Техническая академия Росатома, в сотрудничестве с МАГАТЭ, готовит иностранных специалистов в области ядерной инфраструктуры и эксплуатации АЭС. С 2010 является членом Европейской сети ядерного образования, а также на постоянной основе сотрудничает с МАГАТЭ по вопросам ядерной безопасности. Технической академией Росатома разработана нормативная и методическая документация по культуре безопасности на основе документов МАГАТЭ и всемирной ассоциации организаций, эксплуатирующих атомные электростанции (ВАО АЭС). Независимая оценка состояния культуры безопасности позволяет идентифицировать, насколько приоритетней является производственная безопасность относительно других задач при организации рабочих процессов предприятия. Мероприятие считается состоявшимся при участии в независимой оценке более 85% работников.

Основной целью проведения независимой оценки состояния культуры безопасности является получение достоверной информации о ее текущем состоянии, выявление сильных сторон и областей для улучшений, а также поиск эффективных решений для совершенствования деятельности организации.

Методы, используемые для проведения независимой оценки состояния культуры безопасности, приведены на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Методы, используемые для проведения независимой оценки состояния культуры безопасности**



Независимая оценка состояния культуры безопасности на объекте исследования проводилась в 6 последовательных этапов:

- 1) информирование персонала о проведении независимой оценки состояния культуры безопасности;
- 2) проведение анкетирования более 400 работников в онлайн и в очном формате;
- 3) анализ документов по безопасности и культуре безопасности в дистанционном формате;
- 4) проведение наблюдений, интервью, фокус-групп в очном формате непосредственно на площадках;
- 5) анализ и интерпретация данных, полученных в результате независимой оценки состояния культуры безопасности;
- 6) информирование сотрудников по итогам проведения независимой оценки состояния культуры безопасности.

Диагностика проводилась методом экспертной оценки соответствия собранных фактов критериям, установленным в Гармонизированной модели культуры безопасности. Уровни развития культуры безопасности определялись с использованием моделей Р. Вестрама и П. Хадсона, а также кривой безопасности Бредли (DuPond). Используемая эволюционная модель культуры безопасности Р. Вестрама и П. Хадсона приведена на рисунке 3.

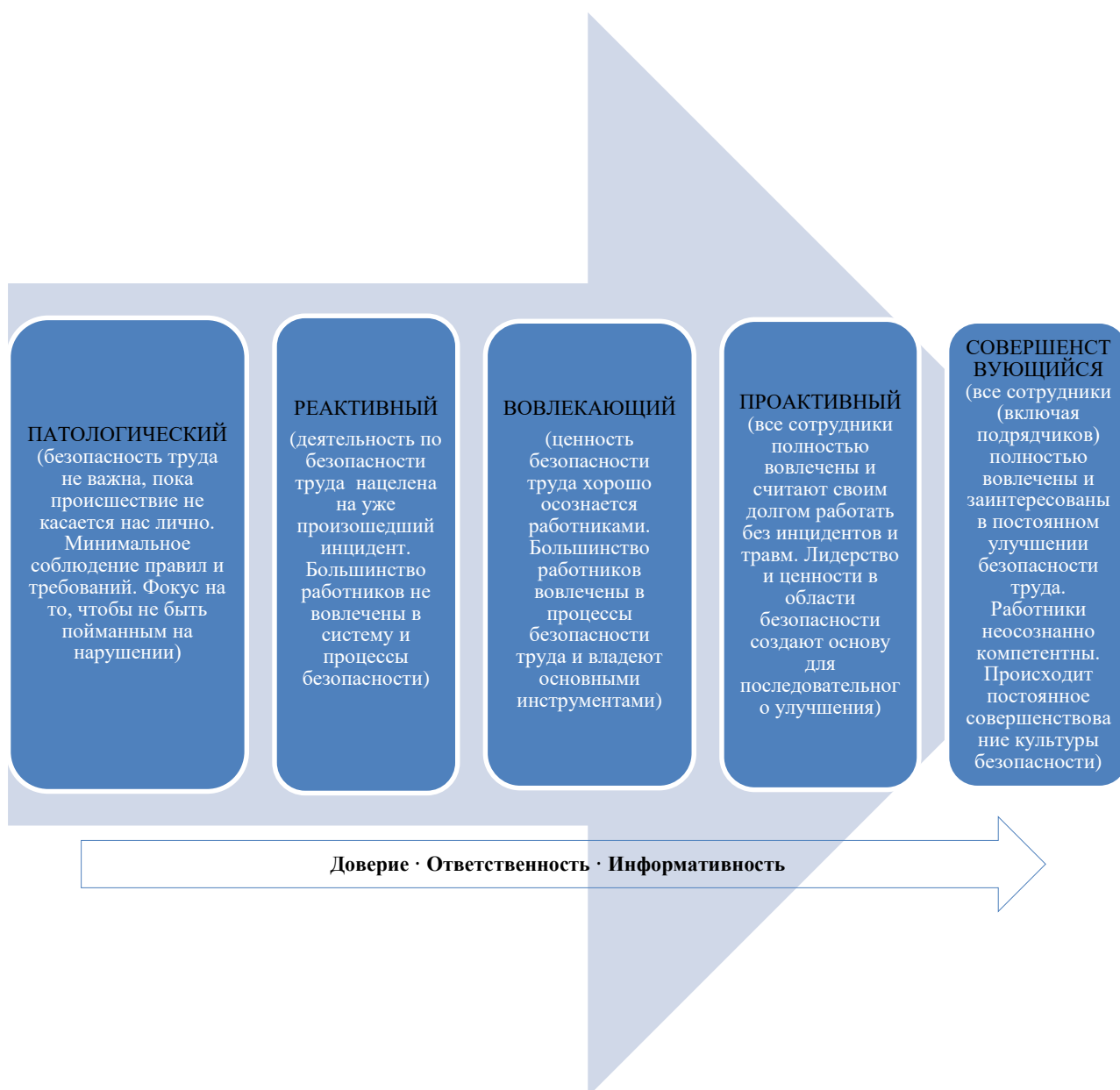


Рисунок 3. – Эволюционная модель культуры безопасности Р. Вестрама и П. Хадсона

В результате проведенного анализа соответствия собранных фактов нормативным критериям установлено, что при выполнении строительно-монтажных работ в Арабской Республике Египет на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа» культура безопасности имеет «вовлекающий уровень» развития с «проактивными» составляю-

щими. По результатам независимой оценки состояния культуры безопасности выявлены сильные стороны, область достаточности и точка роста (область для улучшения):

1. *Сильные стороны:*

- «принятие решений» (перед внедрением изменений руководством, как правило, проводится всесторонняя оценка риска их влияния на безопасность);
- «ответственность лидеров» (руководители стремятся вести регулярную работу по вовлечению всех подчиненных в процесс повышения безопасности);
- «рабочая обстановка взаимного уважения» (доверие и уважение, как правило, является нормой в организации);
- «коммуникация по вопросам безопасности эффективна» (информация от рядовых сотрудников по вопросам безопасности всегда воспринимается столь же важной, что и информация от руководства);
- «выявление проблем и их решение» (анализ проблем, связанных с безопасностью, проводится с глубоким анализом всех коренных причин).

2. *Область достаточности:*

- «персональная ответственность» (работники несут персональную ответственность за безопасность труда);
- «непрерывное самообучение» (при назначении на должность, как правило, учитывается приверженность работника культуре безопасности);
- «выражение обеспокоенности» (достаточно развита практика доведения до работников результатов рассмотрения их сообщений о проблемах безопасности в организации);
- «планирование работ» (рабочие процессы достаточно качественны).

3. *Область для улучшения:* «критическое отношение» – требуется усилить нацеленность персонала на повышение безопасности. Выделение данной области для улучшения обусловлено тем, что на объекте исследования около 75% локального персонала на начальных этапах и в момент проведения оценки имели сложности с языковым барьером. На данном этапе формирования культуры безопасности потребуется увеличение количества наглядных агитационных плакатов, переводов обучающих курсов по безопасности труда. Создан комитет по культуре безопасности, целью деятельности которого является создание необходимых условий для ее непрерывного совершенствования, развитие приверженности культуры безопасности на объекте исследования, а также атмосферы доверия и открытости при рассмотрении вопросов, связанных с безопасностью труда. В каждом структурном подразделении выбраны и назначены уполномоченные по культуре безопасности, которые оказывают необходимую помощь руководителям в проведении поведенческих аудитов, диалогов по безопасности и развитию культуры безопасности. Оперативно доносят до коллег всю информацию по несчастным случаям в отрасли и важным аспектам безопасности труда в целом.

**Заключение.** Таким образом, по результатам проведенного анализа соответствия собранных фактов нормативным критериям установлено, что при выполнении строительно-монтажных работ в Арабской Республике Египет на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа» культура безопасности имеет «вовлекающий уровень» развития с «проактивными» составляющими. В результате независимой оценки состояния культуры безопасности выявлены сильные стороны (по принятию решений, выявлению проблем и их решению, ответственности лидеров, рабочей обстановке взаимного уважения, эффективной коммуникации по вопросам безопасности), области достаточности (по персональной ответственности, непрерывному самообучению, выражению обеспокоенности и планированию работ) и точка роста (область для улучшения) по критическому отношению, требующему усилить нацеленность персонала на повышение безопасности труда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mathematical modeling and evaluation of the safety culture for the operating nuclear power plants in China: Critical review and multi-criteria decision analysis / Yi-Jing Zhang, Zhi-Rong Huang, Fu-Yun Zhao et al. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2022. – Vol. 168. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108871.
2. SEM-based study on the impact of safety culture on unsafe behaviors in Chinese nuclear power plants / Licao, Dai, Li, Ma, Meihui, Zhang et al. // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2023. – Vol. 55, iss. 10. – P. 3628–3638. DOI: 10.1016/j.net.2023.06.028.
3. Суменкова О.А., Суменков И.А. Формирование культуры безопасности компании при взаимодействии с подрядными организациями // *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Нац. с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвящ. 65-летию Тюмен. индустр. ун-та / отв. ред.: А.Н. Халин*. – Тюмень: ТИУ, 2021. – С. 340–343.
4. Макаров П.В. Оценка эффективности поведенческого аудита безопасности на предприятиях строительной отрасли // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2019. – Т. 8, № 4(48). – С. 221–226.
5. Қанжігітова Д.Қ., Рысқалиева Р.Г. Тіршілік эрекетінің қауіпсіздігі мәдениетін қалыптастыруды қамтамасыз ететін модульдік оқыту технологиясы // *Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университетінің Хабаршысы*. – 2020. – № 2. – С. 36–43.
6. Абильтарова Э.Н. Организация педагогического эксперимента по проблеме формирования культуры безопасности профессиональной деятельности у будущих специалистов по охране труда // *Глобальный научный потенциал*. – 2022. – № 3(132). – С. 136–139.
7. Файнбург Г.З., Гавриков А.А. Культура безопасности как неотъемлемый элемент культуры производства // *Безопасность и охрана труда*. – 2017. – № 2(71). – С. 49–53.
8. Руденко В.А., Василенко Н.П. Культура безопасности в системе ценностей госкорпорации «РОСАТОМ» // *Глобальная ядерная безопасность*. – 2016. – № 1(18). – С. 118–122.

## REFERENCES

1. Zhang, Yi-Jing, Huang, Zhi-Rong, Zhao, Fu-Yun & Wang, Yang. (2022). Mathematical modeling and evaluation of the safety culture for the operating nuclear power plants in China: Critical review and multi-criteria decision analysis. *Annals of Nuclear Energy*, (168). DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108871.
2. Licao, Dai, Li, Ma, Meihui, Zhang & Ziyi, Liang. (2023). SEM-based study on the impact of safety culture on unsafe behaviors in Chinese nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(10), 3628–3638. DOI: 10.1016/j.net.2023.06.028.
3. Sumenkova, O.A. & Sumenkov, I.A. (2021). Formirovanie kul'tury bezopasnosti kompanii pri vzaimodeistvii s podryadnymi organizatsiyami. In A.N. Khalin (Eds.) *Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse: materialy Nats. s mezhdunar. uchastiem nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, uchenykh i spetsialistov, posvyash. 65-letiyu Tyumen. industr. un-ta* (340–343). Tyumen: TIU. (In Russ.).
4. Makarov, P.V. (2019). Otsenka effektivnosti povedencheskogo audita bezopasnosti na predpriyatiyakh stroitel'noi otrasli. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 8, 4(48), 221–226. (In Russ.).
5. Qanzhigitova, D.Q. & Ryskaliyeva, R.G. (2020). Tirshilik erketiniń kauripsizdigi mädenietin qalyptastyrudy qamtamasyz etetin modul'dik oqytu tekhnologiyasy. *Qazaq Yltyq Qyzdar Pedagogikalıq Universitetiniń Khabarshysy*, (2), 36–43. (In Kazakh).
6. Abil'tarova, E.N. (2022). Organizatsiya pedagogicheskogo eksperimenta po probleme formirovaniya kul'tury bezopasnosti professional'noi deyatel'no-sti u budushchikh spetsialistov po okhrane truda. *Global'nyi nauchnyi potentsial [Global Scientific Potential]*, 3(132), 136–139. (In Russ.).
7. Fainburg, G.Z. & Gavrikov, A.A. (2017). Kul'tura bezopasnosti kak neot'emlemyi element kul'tury proizvodstva [Safety culture as integral part of technology culture]. *Bezopasnost' i okhrana truda*, 2(71), 49–53. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Rudenko, V.A. & Vasilenko, N.P. (2016). Kul'tura bezopasnosti v sisteme tsennosti goskorporatsii «ROSATOM» [Safety Culture in Value System of ROSATOM State Corporation]. *Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Security]*, 1(18), 118–122. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 23.04.2024

#### FORMATION OF A SAFETY CULTURE DURING NUCLEAR PLANT CONSTRUCTION POWER PLANTS IN THE ARAB REPUBLIC OF EGYPT

S. KOZHARSKIY<sup>1)</sup>, O. KAPUSTINA<sup>2)</sup>, Y. BULAUKA<sup>3)</sup>  
(<sup>1)</sup> The ARE Branch Office of NIKIMT-Atomstroy JSC, Egypt,  
<sup>2)</sup> NIKIMT-Atomstroy JSC, Moscow,  
<sup>3)</sup> Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*This article analyzes the state of safety culture during the construction of a nuclear power plant in the Arab Republic of Egypt. Based on the results of the analysis of the compliance of the collected facts with regulatory criteria, it was established that when performing construction and installation work in the Arab Republic of Egypt at the El-Dabaa NPP construction site, the safety culture has an “involving level” of development with “proactive” components. Based on the results of an independent assessment of the state of safety culture, strengths were identified (in decision making, problem identification and resolution, leadership responsibility, a working environment of mutual respect, effective communication on safety issues), areas of sufficiency (in personal responsibility, continuous self-learning, voicing concerns and planning work) and a growth point (area for improvement) with a critical attitude requiring increased personnel focus on improving safety.*

**Keywords:** safety culture, construction, nuclear power plant.

## АРХЕТИПЫ В САКРАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЯХ: ХРИСТИАНСКИЕ ХРАМЫ И МЕЧЕТИ

канд. архитектуры, доц. А.Н. КОЛОСОВСКАЯ<sup>1)</sup>,  
канд. архитектуры И.Н. ОЖЕШКОВСКАЯ<sup>2)</sup>

<sup>(1), 2)</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск)

<sup>1)</sup> ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5271-1347>,

<sup>2)</sup> ORCID <https://orcid.org/0009-0009-7911-7589>

*Статья посвящается исследованию общих архетипов в сакральных сооружениях христианских храмов и мечетей. Архетипы рассматриваются как универсальные образы, которые пронизывают коллективное бессознательное человечества и выражаются через мифологию, символику и архитектуру. В работе анализируется, как архетипы влияют на архитектурные решения сакральных сооружений, в том числе на планировку, композицию и художественно-стилистическое оформление. Авторы рассматривают, как общие архетипы отражаются в таких архитектурных особенностях, как наличие куполов, минаретов и колоколен, а также в организации внутреннего пространства и расположении алтаря. Исследование показывает, что несмотря на различия в религиозных концепциях, христианство и ислам обладают удивительным сходством в архитектурных формах, орнаментах и символах. Это свидетельствует о единстве человеческого опыта и стремлении к духовной гармонии. Статья подчеркивает важность изучения и сохранения наследия разных религий и культур, а также необходимость диалога и взаимоуважения между различными религиозными сообществами. Внесение вклада в понимание архитектурного наследия разных религий и культур подчеркивает важность изучения и сохранения общего культурного достояния.*

**Ключевые слова:** архетипы, сакральные сооружения, христианские храмы, мечети, архитектура, символизм, религиозные традиции, культурные связи.

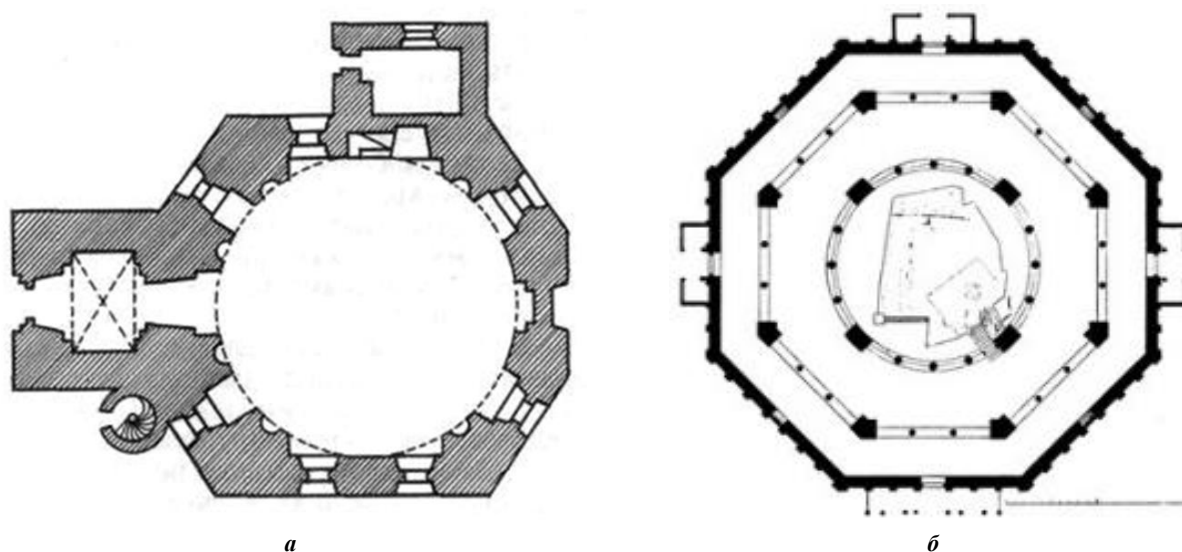
**Введение.** В истории развития архитектуры разных народов существуют общие архетипы, которые отражают как потребности и технологические возможности общества, так и культурные традиции. К факторам, оказавшим наиболее влияние на формирование архитектурного наследия человечества, относятся использование природных материалов в строительстве, политические, социальные и экономические изменения. К выработке общих архетипов в сооружениях привела также адаптация к климату. Например, в жарких регионах использовались вентиляционные системы и внутренние дворики для охлаждения (атриум, перистиль, пастада, айван<sup>1)</sup>), а в холодных регионах – изоляция и теплые материалы. Появление внутренних двориков можно увидеть при формировании заупокойных храмов, дворцов и жилых домов в искусстве Древнего Египта, в эллинистической культуре, в жилищах индейцев доколумбовой Америки. Воздействие технологического прогресса на форму и структуру зданий приводило к изменению архитектурного стиля. Религиозный фактор повлиял на архитектурное решение именно сакральных сооружений. Сложившиеся на протяжении столетий религиозные и культурные ценности выработали определенные архетипы в христианских и мусульманских сооружениях, многие из которых стали едиными для, казалось бы, разных религиозных концепций.

**Основная часть.** Сакральные сооружения, такие как христианские храмы и мечети, являются важными символами религиозной веры и культурных традиций. В них отражаются основные архитектурные архетипы, которые имеют свои корни в древних религиозных практиках и символизме. По своему происхождению архетипы являются универсальными образами, которые пронизывают коллективное бессознательное человечества. Они отражают фундаментальные аспекты человеческой психики и выражаются через мифологию, символику и в том числе архитектуру. В контексте культовых сооружений архетипы играют особую роль в создании сакральной атмосферы места и удовлетворении духовных потребностей верующих. Исследование общих архетипов, зародившихся в христианских храмах и мечетях, и их взаимосвязи можно провести через объемно-планировочное построение и художественно-стилистическое решение архитектурных сооружений.

Для сакральных объектов характерны планировочные решения, отражающие символическое значение, связанное с понятиями пространства, иерархии и божественности. Выбор решения формы плана здания от вытянутого прямоугольного объема до центрической композиции зависел кроме материальных затрат и возможностей заказчика от заложенной религиозной идеи. Круглый план символизировал бесконечность и единство макрокосмоса, в то время как крестообразный план отражал жертвенность и смерть. Исторически сформированы два композиционных способа формирования культовой архитектуры для воплощения двух замыслов: движения в пространстве

<sup>1</sup> Айван (эйван) – сводчатое помещение, с трех сторон обнесенное стеной и открытое с четвертой стороны. Кроме того, это название применимо к сводчатому залу для приемов во дворцах или культовых сооружениях, который открывался во внутренний дворик, а также применимо к террасе (открытой галерее) в среднеазиатских жилищах, мечетях и др. сооружениях, которое имело плоское покрытие и поддерживалась колоннами или столбами [1, с. 16].

и нахождения в пространстве. От глубинно-пространственных композиций, характерных для храмов древних верований, более современные концепции сакрального пространства базируются на центрических объемно-планировочных схемах. И здесь появляется универсальный образ купольного здания культового назначения (рисунок 1).



*а* – кальвинский сбор в Сморгони, начало XVI в. [2, с. 183];  
*б* – мечеть Аль Акса в Иерусалиме, XI в. Реконструкция 1938–1943 гг.<sup>2</sup>

**Рисунок 1.** – Примеры центрических сооружений, принадлежащих разным конфессиям, культурам и эпохам

Купол характерен для христианской и исламской строительной практики. При этом истоком формирования для обеих культовых моделей послужила византийская архитектура. Купол как символическая интерпретация веры в христианстве передает образ Небесного Царства. В исламе купол символизирует священную скалу, вершину горы Мория<sup>3</sup>, своеобразный центр мироздания как аналог горы Меру в иудаизме.

Одним из общих архетипов в сакральной архитектуре рассматриваемых объектов является появление в композиционных решениях вертикальных доминант, связанных с идеей приближения к небу для символического единения с духовными высшими силами. При этом сами сооружения старались возводить в наиболее благоприятном месте и с точки зрения ландшафта, и с точки зрения градостроительной ситуации. В общем объемно-пространственном построении мечетей и христианских храмов характерным элементом становится выделение отдельно стоящих или включенных в композицию здания вертикальных объемов. Для исламской архитектуры – это минареты, для христианской – колокольни, кампанилы, звонницы (рисунок 2). Все они с момента своего возникновения не только направляли взоры верующих к небу, но и несли в себе функции призыва на богослужение (в одном случае – объявлением намаза, в другом – колокольным звоном).

Важная часть молитвенного зала мечетей и церквей относится к алтарю, устройство которого в разных по конфессиональной принадлежности сооружениях имеет много общего. Во-первых, его расположение на высоте или изолированной от верующих площадке. Во-вторых, ориентация. Михраб в мечети всегда будет указывать направление Каабы в Мекке<sup>4</sup>. Алтарь в храме – на восток, что являлось обязательным условием в раннем христианстве и средневековье, а в более позднее время преимуществом при расположении здания становится градостроительная ситуация.

Историк и теоретик архитектуры Б.П. Михайлов пишет о первоистоках европейской архитектуры: «Древнегреческая ордерная система выкристаллизовалась преимущественно на опыте строительства храмов. Будучи «домом бога», храм строился так же, как и жилище человека – мегарон<sup>5</sup>, но больших размеров в соответствии с монументальным образом обитавшего в нем божества. Так возникли древнейшие типы храмов: храм в антах<sup>6</sup>, ... имеющий монументальный вход, акцентированный двумя колоннами в антах и фронтоном, и простиль<sup>7</sup> – храм, у которого анты заменены колоннами, а архитрав – не только на фасаде, но и справа и слева от него» [3, с. 207].

<sup>2</sup> Мечеть Аль Акса. URL: <https://yandex.by/images/search>.

<sup>3</sup> Символика купола в мечети. URL: <https://www.booksite.ru>.

<sup>4</sup> Каба. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.

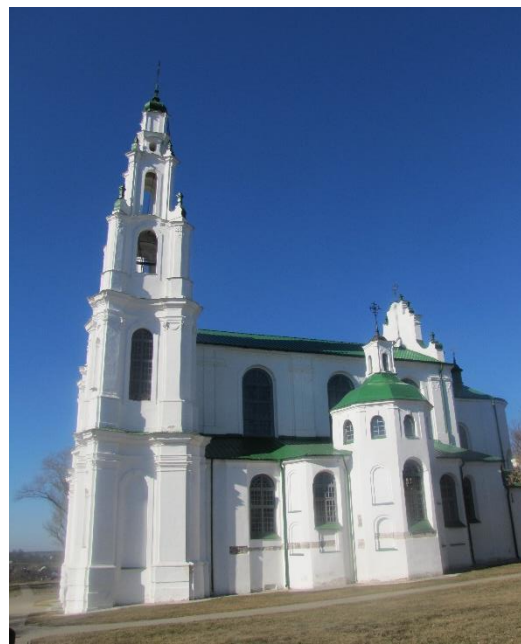
<sup>5</sup> Мегарон (др.-греч. μέγαρον – большой зал) – жилой дом в Древней Греции, возведенный в бронзовом веке (Эгейская цивилизация), III–II тыс. до н.э.

<sup>6</sup> Анты (лат. Antae – «прихожая») – выступы (продолжение) боковых стен на фасаде древнегреческого храма и обрамляющие пространство входа.

<sup>7</sup> Простиль (от др.-греч. πρό – впереди и στῦλος – колонна) – тип античного храма, прямоугольного в плане, имеющего один ряд колонн на главном фасаде.



а



б

а – минареты мечети Джейме в Йезде, XIV в.<sup>8</sup>; б – Софийский собор в Полоцке, 1738–1750 гг.<sup>9</sup>

Рисунок 2. – Примеры вертикальных доминант в иранской и белорусской архитектуре

Древнегреческий жилой дом (мегарон) по формообразованию являлся прямоугольным в плане строением с конической крышей. В самом центре глинобитной постройки размещался очаг, прямо над ним в соломенной крыше устраивалось отверстие для выхода дыма. В плане жилища были овальные и круглые. Сравнивая жилые дома в Микенах и Тиринфе, советский теоретик и историк искусства Б.Р. Виппер не видит прямой связи прямоугольных жилищ с круглыми и овальными [4, с. 29]. В принадлежащих знати крупных мегаронах кровля возводилась на деревянных опорах, которые стали прототипами колонн. У первых мегаронов входная дверь была достаточно узкая. Столбы, которые служили опорами на фасаде, появились гораздо позднее, одновременно с постройками с продомосом (др.-греч. *πρόδομος* – «перед домом»). В этих постройках расположенная впереди входная часть имела выносы боковых стен, а между ними размещались два столба. Постепенно мегарон из архаичного жилища трансформировался в царский дворец, где известковый пол украшался росписью, а на возвышении располагался трон. Возле очага уже не спали, как в ранних мегаронах: очаг стал культовым жертвенником. Таким образом, произошло выделение отдельного культового пространства. В среднеэллиадский (крито-микенский) период в XX–XVII вв. до н.э. распространились мегароны с входным портиком, а также с двумя помещениями, размещенными на одной оси. Мегароны стали не только местом устройства царских пиров, приема гостей, но и местом совершения культа.

Мегарон явился прообразом типа культового здания, так называемого «храма в антах», в композиции которого присутствует углубление между выступами боковых стен, оформляющее вход. На фасадах античного храма (по продольной оси – спереди и сзади) воздвигались анты, являющиеся угловыми опорами. Древнеримский архитектор Витрувий в трактате «Десять книг об архитектуре» такой тип строений назвал «наос» (13 г. до н.э.)<sup>10</sup> [5, с. 53–54].

«Антропоморфизм Бога сближает архетипы Дома и Храма в западной культуре. Субъектность человека с Востока отвечает идее Неба, что отражается в архетипах архитектуры»<sup>11</sup>. Сближению приемов организации арабских и европейских пространств еще с древнейших времен способствовали коммуникации средиземноморских цивилизаций. В строениях Востока и Запада присутствуют так называемые «образцы», которые служат примером для последующих зодчих. Постепенно в архитектуре разных культур сложился тип жилья с организацией открытого внутреннего двора: в греческой – аула, в персидской – айван, в римской – атриум. Центральное место в объемно-пространственной композиции жилого дома было отведено очагу. Являясь источником света и тепла, очаг стал центром дома, на него ориентировались остальные помещения. Массу всевозможных толкований у разных народов имеет отверстие в центре кровли.

<sup>8</sup> Удивительные исторические места Ирана. URL: [https://avatars.dzeninfra.ru/get-zen\\_doc/](https://avatars.dzeninfra.ru/get-zen_doc/).

<sup>9</sup> Внешний облик Софийского собора в Полоцке, 1750-е гг. Современное состояние. Фотография Ожешковской И.Н., 2015 г.

<sup>10</sup> Наос (от греч. *ναός* – дом божества) – основная (центральная) часть древнегреческого храма. В Греции в период Архаики наосом называли святилище в виде деревянного ящика для хранения статуэтки божества, который имел двускатную крышу и раскрывающиеся дверцы. В классическую эпоху в архитектурной композиции древнегреческого храма (периптера) наос занимал центральную часть, где и размещалась статуя божества.

<sup>11</sup> Морозов И.В. Мир архитектуры в контексте гуманитарной культуры: автореф. дис. ... д-ра культурологических наук: 24.00.01. – СПб., 1998. – 39 с. См. с. 8.

Каждую отдельную композиционную структуру архитектурного объекта обуславливает идея (творческий замысел), художественный образ, эстетические воззрения современников определенной исторической эпохи, а также утилитарная функция, технические методы строительства, материальные ресурсы, возможности строительной техники, климатические условия и прочие факторы, которые становятся определяющими при создании материального объекта – архитектурного сооружения. Основными функциями архитектуры как вида архитектонического искусства являются: художественно-образная, эстетическая и утилитарная. По мнению основоположника московской школы искусствознания А.И. Некрасова, «... в процессе действий архитектора пространство, объем и масса воспринимаются специфически и являются существом архитектуры» [6, с. 143]. Значение искусства архитектуры содержится в самом художественном образе пространства. Такие мысленные категории, а именно идеи завершенности, напряжения и равновесия, проявляются идеями композиции в архитектуре. И, следовательно, архитектурно-осмысленные формы несут в себе архетипы мышления, т.е. каждой идее соответствует определенный архетип (крест, треугольник, окружность и пр.). Определенная варибельность таких архетипов создает бесконечное множество сочетаний.

Формирование идеи архитектурной композиции культового объекта для воплощения замысла нахождения в пространстве нашло свое отражение во многих типах храмов, выработанных зодчими Древней Греции и позднее воспринятых и переосмысленных архитекторами Ренессанса, барокко и классицизма. Эпоха барокко сформировала особый стиль, в котором слились эти две композиции при организации динамичного развертывания архитектурного пространства с сильным акцентом на статичность фасадов и декоративность. Стиль барокко хорошо видим по ряду характерных черт и приемов, таких как широкое внутреннее пространство, взамен существовавших ранее длинных и узких нефов, а в интерьере произошли кардинальные изменения в работе света, его акцента, обильном декоративном убранстве с включениями таких произведений искусства как фрески, скульптура, живопись. Фасады претерпели значительные изменения и приобрели многослойность линий карнизов, фронтоны криволинейного очертания и пр.

Первоначально исламская архитектура находит в себе много общего в формообразовании с византийской, особенно в применении таких элементов, как своды, круглые арки и купола. О сближении элементов не только в различных стилях, но и цивилизациях, пишут многие исследователи. Например, использование ионической капители можно найти в греческой, римской, сирийской и палестинской архитектуре [7, с. 53]. Исламский мир богат разнообразием характерных типов мечетей, среди них анатолийские и аббасидские мечети. К самому раннему стилю относится арабский тип мечети, причисляющийся к периоду правления династии Омейядов. В композиции такой мечети главным элементом является прямоугольный или квадратный двор с примыкающим к нему молитвенным залом и аркадой (галереей), проходящей по периметру двора. Например, Масджид аль-Харам в Мекке (Саудовская Аравия) – первая мечеть около Каабы – относится к 632 г. Существующее в настоящее время сооружение известно с 1570 г.<sup>12</sup>

Персидский тип мечети сформировался под архитектурным влиянием Персии и характеризовался наличием айванов и куполов. Например, медресе Мири Араб в Бухаре (рисунок 3). В Средние века в дворцовой и культовой архитектуре Среднего и Ближнего Востока широко использовались айваны. Например, в мечетях и медресе Бухары, Самарканды и многих др. Мечети, которые строили в это период, иногда называют «айванные». В них возводились один или несколько айванов, ведущих к центральному двору, который являлся молитвенным залом. Ряд таких мечетей был сформирован под влиянием архитектуры Персии. Но они могли перестраиваться и из зороастрийских храмов огня (рисунок 4), где на территории двора хранили священный огонь.

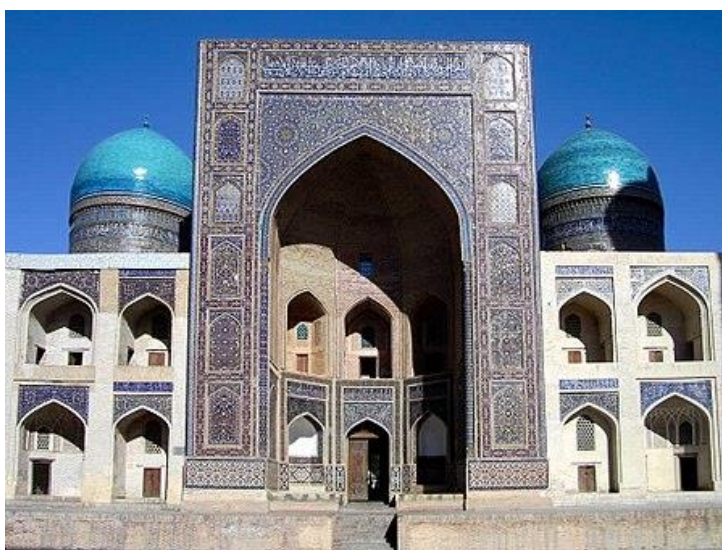


Рисунок 3. – Персидский стиль медресе Мири Араб в Бухаре, Узбекистан, XVI в.<sup>13</sup>

<sup>12</sup> Мечеть аль-Харам. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.

<sup>13</sup> Айван. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mir-i-Arab\\_Medressa](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mir-i-Arab_Medressa).

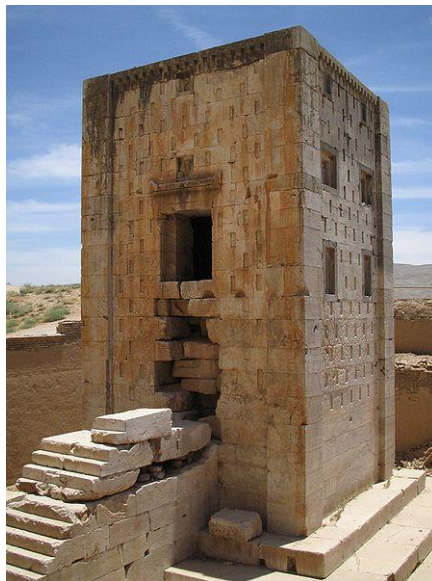


Рисунок 4. – Храм огня Кааба Зороастра, Иран, V в. до н.э.<sup>14</sup>

**Заключение.** Именно «обращения человека к единому божественному началу», а также «стремление человека к познанию вечных истин через слияние с Богом, с вечностью» [7, с. 35–37] служили основными критериями в появлении общих архетипов в сакральных сооружениях, несмотря на разные религиозные идеи христианства и ислама. Они создавали психологически комфортное пространство для поклонения и общения с божественным. Феномен общих архетипов присущ как в архитектурных элементах, так и в сакральных символах, что позволило выявить определенные закономерности и связи между двумя культурными традициями.

Результаты анализа показали, что хотя христианство и ислам имеют разные исторические и культурные корни, они все же располагают удивительным подобием архитектурных форм, орнаментов и символов. Изучение общих архетипов в сакральных сооружениях христианских храмов и мечетей позволяет не только углубить понимание религиозных традиций и культурных связей, но также открывает новые возможности для диалога и взаимоуважения между различными религиозными сообществами. Это исследование подтверждает важность изучения и сохранения наследия разных религий и культур, а также укрепляет идею о единстве человеческого опыта и стремлении к духовной гармонии. При этом, несмотря на общие тенденции, каждая культура имеет свои уникальные архитектурные черты и стили, которые отражают ее исторические и культурные особенности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Юсупов Э.С. Словарь терминов архитектуры. – СПб.: Ленингр. галерея, 1994. – 432 с.
2. Архітэктура Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксте: у 4 т. / рэдкал. А. Лакотка (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск: Беларус. навука, 2005–2008. – Т. 2: XV – сярэдзіна XVIII ст. – 2006. – 623 с.
3. Михайлов Б.П. Витрувий и Эллада. – М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1967. – 280 с.
4. Виппер Б.Р. Искусство Древней Греции. – М.: Наука, 1972. – 436 с.
5. Витрувий. Десять книг об архитектуре / пер. с лат. Ф.А. Петровского. – М.: КомКнига, 2005. – 328 с.
6. Некрасов А.И. Теория архитектуры / вступ. ст. И. Кызласовой, В.В. Кириллова. – М.: Стройиздат; Галерея современ. искусства'91, 1994. – 477 с.
7. Сардаров А.С., Байрамзадеkh X. Зеркало красоты. Эстетика персидской архитектуры. – Минск: БНТУ, 2017. – 164 с.

#### REFERENCES

1. Yusupov, E.S. (1994). Slovar' terminov arkhitektury. Saint Petersburg: Leningradskaya galereya. (In Russ.).
2. Lakotka, A. (Eds.). (2006). *Arkhitektura Belarusi: narysy evalyutsyi va uskhodneslavjanskim i eurapeiskim kantekstse: u 4 t. T. 2. [XV – syaredzina XVIII st.]*. Minsk: Belarus. Navuka. (In Belarus.).
3. Mikhailov, B.P. (1967). *Vitruvii i Ellada*. Moscow: Izd-vo lit. po str-vu. (In Russ.).
4. Vipper, B.R. (1972). *Iskusstvo Drevnei Gretsii*. Moscow: Nauka. (In Russ.).
5. Vitruvii. (2005). *Desyat' knig ob arkhitekture* [per. s lat. F.A. Petrovskogo]. Moscow: KomKniga. (In Russ.).
6. Nekrasov, A.I. (1994). *Teoriya arkhitektury* [vstup. st. I. Kyzlasovoi, V.V. Kirillova]. Moscow: Stroizdat; Galereya sovremen. iskusstva'91. (In Russ.).
7. Sardarov, A.S. & Bairammzadekh, Kh. (2017). *Zerkalo krasoty. Estetika persidskoi arkhitektury*. Minsk: BNTU. (In Russ.).

Поступила 22.03.2024

<sup>14</sup> Зороастрийский храм. URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/>



**ARCHETYPES IN SACRED BUILDINGS: CHRISTIAN CHURCHES AND MOSQUES**

**A. KOLOSOVSKAYA, I. OZHESHKOVSKAYA**  
*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

*The article is devoted to the study of common archetypes in sacred buildings of Christian churches and mosques. Archetypes are seen as universal images that permeate the collective unconscious of humanity and are expressed through mythology, symbolism and architecture. The work analyzes how archetypes influence architectural decisions of sacred buildings, including layout, composition and artistic and stylistic design. The authors consider how common archetypes are reflected in architectural features such as the presence of domes, minarets and bell towers, as well as in the organization of internal space and the location of the altar. The study shows that despite differences in religious concepts, Christianity and Islam have striking similarities in architectural forms, ornaments and symbols. This testifies to the unity of human experience and the desire for spiritual harmony. The article emphasizes the importance of studying and preserving the heritage of different religions and cultures, as well as the need for dialogue and mutual respect between different religious communities. Contributing to the understanding of the architectural heritage of different religions and cultures highlights the importance of studying and preserving the common cultural heritage.*

**Keywords:** *archetypes, sacred buildings, Christian churches, mosques, architecture, symbolism, religious traditions, cultural ties.*

УДК 624.046.5/624.014

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-42-50

## ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

канд. техн. наук, доц. **В.В. НАДОЛЬСКИЙ**  
(Брестский государственный технический университет)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4211-7843>

Выполнен обзор и анализ процедур верификации и валидации компьютерных вычислительных моделей с целью предоставить концептуальную основу и руководство по реализации применительно к проектированию строительных конструкций. Представлено описание процедур верификации программного обеспечения компьютерного моделирования и компьютерных вычислительных моделей. Сформулированы основные этапы валидации для подтверждения применимости, прогностической способности и установления характеристик метрики точности компьютерных моделей. На основе анализа расчетного значения несущей способности сделан вывод о количестве экспериментов, необходимых для валидации не апробированных компьютерных моделей. В исследовании акцент сделан на описании процедур верификации и валидации для компьютерных моделей новых конструктивных решений и не стандартизированных параметров моделей. Однако приведенные здесь рекомендации также подходят и для более изученных конструктивных решений, при этом масштаб деятельности по верификации и валидации может быть уменьшен.

**Ключевые слова:** верификация, валидация, компьютерная модель, математическая модель, компьютерное моделирование.

**Введение.** Компьютерное моделирование играет все более важную роль в проектировании и оценке функционирования конструктивных систем [1–10]. Сложные и новые конструктивные элементы являются примерами, которые становятся все более и более зависимыми от компьютерных моделей и результатов моделирования для прогнозирования их функционирования, безопасности и надежности. Хотя важные решения принимаются на основе компьютерной модели, достоверность, или правдоподобие, этих моделей и результатов моделирования часто не подвергается сомнению со стороны широкой общественности, включая службы заказчиков, эксплуатирующие организации, строителей, изготовителей и, как ни странно, многих представителей органов экспертизы и проектного сообщества.

На чем основано это доверие? На сегодня существует общая склонность доверять «продвинутым» компьютерным моделям, особенно если их результаты представлены в разноцветных графических, анимационных изображениях. В большей степени это доверие основано «на вере» в знания и способности ученых и инженеров, которые разрабатывают, используют и интерпретируют модели. По этой причине все большую важность приобретают исследования в этой области – исследования по требованиям и принципам создания [11–16], по проверкам (верификации и валидации) и определению точности компьютерных моделей, а также по обеспечению надежности принятых решений с учетом неопределенностей компьютерного моделирования и базисных переменных [17; 18]. Также важность приобретает необходимость разработки нормативных документов в этой области, в том числе как инструмента помощи и защиты разработчиков компьютерных моделей, ведь от их решений сильно зависит риск обрушения строительных конструкций, следовательно, они несут постоянную ответственность за обеспечение достоверности результатов своего моделирования.

Помощь в решении проблемы достоверности результатов моделирования оказывают такие процедуры, как верификация и валидация [19–24]. С 2017 года в Российской Федерации начала выходить серия ГОСТов Р 57700, посвященных компьютерному моделированию. Так, согласно ГОСТу Р 57700.21-2020 «Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения», установлены следующие определения терминов верификация и валидация:

– проверка корректности компьютерного моделирования (*верификация* модели): совокупность действий с моделью, результатом которых является подтверждение соответствия компьютерной реализации модели ее исходной математической или информационной модели.

– проверка адекватности компьютерной модели (*валидация* модели): совокупность действий с моделью, результатом которых является подтверждение ее адекватности объекту моделирования.

По сути, «верификация» – это процесс сбора доказательств того, что компьютерная реализация математической модели и связанное с ней решение верны, а «валидация» – это процесс сбора доказательств того, что были выбраны соответствующие математические модели для ответа на интересующие вопросы. Желаемым результатом верификации и валидации является подтверждение модели для ее предполагаемого использования с точки зрения демонстрации прогностической способности и точности (установления численных характеристик точности), а также определение ограничений, налагаемых на применимость модели. На основании валидации компьютерной модели должны быть установлены статистические характеристики метрики точности моделирования, которая в дальнейшем наравне с изменчивостью базисных переменных должна быть учтена при обеспечении надежности проектируемой конструкции [17; 21].

Цель этого исследования – предоставить общий язык, концептуальную основу и руководство по реализации процессов верификации и валидации. Одной из основных задач является адаптация терминов и определений, принятых в отечественных нормативных документах ГОСТ Р 57188–2016 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения», ГОСТ Р 57700.21-2020 и зарубежных AIAAG-077-1998 «Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations», ASME V&V 10-2006 «Guide for verification and validation in computational solid mechanics», применительно к оценке несущей способности строительных конструкций. В исследовании акцент сделан на описание процедур верификации и валидации для компьютерных моделей новых конструкций. Однако приведенные здесь рекомендации также подходят и для более изученных конструкций, при этом масштаб деятельности по верификации и валидации может быть уменьшен.

**Верификация.** Процесс верификации оценивает соответствие компьютерной модели математической модели и оценивает численную точность компьютерной модели. Верификация предшествует валидации и состоит из двух основных составляющих: верификации программного обеспечения компьютерного моделирования и верификации компьютерной вычислительной модели.

Верификация программного обеспечения компьютерного моделирования – это процесс устранения ошибок и ограничения погрешностей в численном алгоритме решения и его компьютерном коде при любых обстоятельствах, при которых будет применяться программное обеспечение. Верификация программного обеспечения фокусируется на математической корректности и конкретных реализациях дискретных алгоритмов решения. Однако кроме численной верификации программного обеспечения необходимо гарантировать поддержание качества, т.е. исключение ошибок в процессе выпуска и установки программного обеспечения, и затронуть такие вопросы, как контроль версий, конфигураций, архитектуры программного кода [25; 26]. Верификация программного обеспечения является зоной ответственности его разработчиков и поставщиков. При верификации программного обеспечения создают компьютерные модели для набора тестовых задач с известными «точными» решениями. Эти задачи обычно имеют гораздо более простую геометрию, нагрузки и граничные условия, чем реальные задачи.

Верификация компьютерной вычислительной модели сосредоточена на оценке погрешности, связанной с особенностями дискретизации (размер сетки, нерегулярность сетки и/или разные временные шаги, тип конечного элемента) и численного решения (тип решателя и его настройки) для конкретной модели. Также важной задачей верификации модели является анализ влияния дискретизации на поведение моделируемого объекта. Например, недостаточно качественная сетка в задачах потери устойчивости может исказить формы потери устойчивости [17]. Качество сетки напрямую влияет на точность и надежность численного решения. Поэтому основной этап верификации связан с анализом плотности сетки (дискретизации) [20]. В большинстве случаев для оценки этой погрешности требуется использование компьютерной вычислительной модели с разными размерами сетки, типами конечных элементов и настройками решателя. Так как предположение о гладкости решения (т.е. отсутствие сингулярности и разрывов) лежит в основе большей части существующих теоретических методов оценки этой погрешности [27–30], а это, как правило, не выполняется, то для практического применения получил распространение эмпирический подход к оценке погрешности на основе наблюдаемых скоростей сходимости. Опыт свидетельствует, что эмпирический подход надежнее, когда используется более трех размеров сеток и когда рассматриваются не точечные значения, а интегральные показатели. Исследования показывают, что если решения находятся в режиме асимптотической сходимости, то смещение от конвергентного значения не вызывает искажений в поведении элемента и стандартное отклонение погрешности моделирования практически не изменяется [17].

При верификации модели создают компьютерную модель, которая будет применяться для решения рассматриваемой задачи, т.е. с геометрией, нагрузками и граничными условиями, типичными для практических задач. Верификация модели дает количественную оценку точности (погрешности) конкретного численного решения по крайней мере относительно условного конвергентного значения несущей способности, а также должна быть дополнена инженерным суждением (критическим анализом полученных результатов) [20; 21].

**Валидация.** Валидация должна подтвердить/определить область применимости (использования по назначению), прогностическую способность, устранить ошибки и установить характеристики точности (погрешности и неопределенности) компьютерных результатов, в том числе с учетом экспериментальных неопределенностей. Это достигается путем сравнения результатов моделирования с эталонными данными. Для валидации перво-степенным является сравнение характера поведения(отказа) с эталонным поведением, т.е. данное сравнение направлено на оценку применимости (адекватности) модели и исключение грубых ошибок моделирования [31; 32]. Валидация начинается с выбора метрик, показывающих соответствия между результатами моделирования и эталонными данными. Метрика валидации предоставляет математическую меру разницы между двумя результатами. Чаще всего в качестве метрики применяют отношение максимальной нагрузки к эталонному значению. Однако может потребоваться метрика для измерения не точечных результатов, а для анализа поведения, например, предельного графикам нагрузка-перемещение.

Следующим этапом является оценка статистических характеристик метрики точности (неопределенностей и погрешностей) моделирования для предполагаемого использования, чтобы впоследствии учесть их при обеспечении надежности [17]. Вердикт о валидации не имеет смысла без указания значений характеристик точности моделирования, так как невозможно выработать стратегию обеспечения надежности [21]. Разработчик модели должен дать общую количественную оценку точности (погрешности и неопределенности) результатов моделирования. Погрешности обусловлены преднамеренными упрощениями, такими как размер конечных элементов,

диаграмма деформирования стали, установленная погрешность численного решения и т.д. Неопределенности обусловлены внутренней изменчивостью физических параметров модели или недостатком знаний о параметрах или о концептуальной модели.

Для строительных конструкций можно выделить две крайние ситуации. Первая характеризуется наличием хорошо изученных видов конструкций, для которых существуют формульные классические модели сопротивления (позволяющие получить не только значение несущей способности, но и поведение элемента под нагрузкой) и накоплен достаточный опыт их применения. В этом случае валидация может косвенно быть подтверждена на основании общепринятых формульных моделей и общепризнанных знаний о поведении элемента (хотя нерешенным вопросом остается оценка характеристик точности). Концептуально данный случай соответствует текущей ситуации для подтверждения валидации (адекватности, применимости) формульных моделей сопротивления, т.е. когда инженер на базе знаний и опыта подтверждает область применения формульной модели. Однако применение компьютерных моделей также целесообразно и эффективно для неизученных видов конструкций, в результате чего может возникнуть вторая крайняя ситуация. В данном случае ситуация ничем не отличается от сложившейся практики исследований новых конструкций, когда проводят теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых разрабатывается и подтверждается модель.

Также возможны более благоприятные ситуации, например, когда существуют упрощенные модели (полученные/подверженные на основании эксперимента), имеющие принципиально более узкую область применения, нежели полноценные компьютерные модели. Как правило, формульные модели целенаправленно упрощены для простоты использования, и поэтому могут только подтвердить некоторое значение несущей способности на графике деформирования, но не дают никакой гарантии правильности решения на всех этапах деформирования. При этом принципиальные зависимости результатов моделирования от параметров модели сохраняются, однако полноценную процедуру валидации невозможно выполнить только на основании этих знаний и опыта, и, соответственно, требуются экспериментальные данные.

Как итог вышеприведенных рассуждений валидация может быть выполнена на основании:

- экспериментальных данных, что позволяет проверить применимость и точность модели (наиболее правильный путь, но и более затратный);
- формульных моделей сопротивления (необходимо знать и понимать основы модели и статистические характеристики погрешности), но при этом должен быть стандартизированный набор параметров компьютерной модели, чтобы можно было оценить характеристики точности.

Валидация на основе экспериментальных данных заключается в качественном и количественном сравнении результатов моделирования и экспериментальных результатов, полученных на основе надлежащим образом спланированных экспериментов. В большинстве случаев оценка прогностической способности компьютерной модели во всем диапазоне ее предполагаемого использования не может основываться исключительно на существующих данных. Эксперименты могут иметь множество целей, следовательно, набор измерений во многих экспериментах может отличаться от измерений, необходимых для валидации модели. Существующие данные могут не в полной мере отражать предполагаемое использование модели, а также часть данных может понадобиться при калибровке компьютерной модели во время ее разработки. В таких случаях требуются новые валидационные эксперименты. Задача состоит в том, чтобы определить и провести серию экспериментов, которые обеспечат достаточно строгую валидацию модели. Если модель предсказывает результаты эксперимента, то она считается валидированной для использования по назначению.

Для валидационного эксперимента все входные (геометрия испытываемого объекта, начальные и граничные условия, приложенные нагрузки) и выходные (характеристики поведения) параметры модели должны быть описаны как можно более полно и точно. В идеале экспериментальные данные должны обеспечить как можно больше информации и оставить как можно меньше неизвестных параметров, требуя минимального количества предположений со стороны разработчика валидируемой компьютерной модели. Подробное описание условий испытаний помогает разработчику модели понять связь между выходными данными эксперимента и выходными данными модели. В некоторых случаях разработчику модели может потребоваться создать модель, включающую такие части, как испытательное оборудование или измерительные приспособления, чтобы более точно спрогнозировать результаты.

Когда некоторые значимые параметры не измерялись, разработчик модели может выполнить несколько вычислений для сравнения с экспериментами, изменяя значения этих параметров. Однако разработчик модели не может слишком произвольно выбирать значение этих параметров. Если результаты моделирования с использованием реалистичных диапазонов параметров находятся в согласии с экспериментом, тогда модель может быть заявлена валидированной. Выбор количества измерений должен быть основан в первую очередь на представляющих интерес характеристиках поведения. По возможности эти характеристики следует измерять напрямую, а не получать из других измерений. Например, если интересующей характеристикой является деформация, то, вероятно, лучше использовать тензометрический датчик вместо измерений перемещений.

В большинстве случаев неопределенностью валидационных экспериментов пренебрегают, однако это допущение должно быть тщательно проанализировано. Один из подходов уменьшения неопределенностей – дополнительные испытания для разных образцов. В этом случае разброс может быть обусловлен различиями

в геометрии образцов, свойствах материала, в установке образцов для испытания, в датчиках, в установке датчиков (местоположение и ориентация) и в сборе данных. Другой подход заключается в повторении эксперимента с использованием того же образца. Этот подход может быть применен, если стоимость эксперимента высока или доступность экспериментальных образцов ограничена. Также этот подход может быть полезен для разделения влияния факторов. Еще один подход для получения резервных измерений заключается в размещении аналогичных датчиков в симметричных местах (если эксперимент обладает достаточной симметрией) для оценки разброса. Данные этих датчиков также могут быть применены для подтверждения ожидаемой симметрии.

Набор параметров компьютерной вычислительной модели, подтвержденный в процессе верификации и валидации, должен последовательно применяться во время решения рассматриваемой проблемы.

На примере компьютерной конечно-элементной модели, применяемой для оценки изгибающего момента консольной балки, рассмотрим различия в понятиях верификации и валидации. Верификация связана с проверкой соответствия между математической и численной моделью исследуемого объекта. Математическая модель (аналитическое решение) для изгибающего момента  $M = qL^2/2$  – в случае распределенной нагрузки, или  $FL$  – в случае сосредоточенной. Численная модель – стержневая (для поставленной задачи наиболее оптимальна), пластинчатая (вероятнее всего избыточная) или объемная (абсурдно избыточная) – привносит погрешности за счет дискретизации решения, типа конечного элемента и т.д. Валидация связана с проверкой соответствия между реальным объектом и компьютерной моделью. В реальности закрепление обладает конечной жесткостью, что вносит неопределенности, поэтому в процессе валидации можно выяснить, в какой степени применение полностью жесткого закрепления балки отражает реальное поведение.

Достоверность результатов компьютерного моделирования повышается с увеличением количества доступных эталонных данных для валидации. Для новых конструктивных решений и не стандартизированных параметров компьютерной модели в качестве эталонных данных могут выступать только результаты физических испытаний. Учитывая то, что физические испытания несут значительные финансовые и временные затраты, возникает вопрос о минимально достаточном количестве экспериментов для оценки точности компьютерной модели. Для ответа на этот вопрос проанализируем влияние количества экспериментальных образцов на неопределенность и расчетное значение несущей способности.

Рассмотрим базовый случай, когда среднее значение и стандартное отклонение метрики точности компьютерной модели вычисляются на основании сравнения с  $n$  результатами экспериментов, при этом значение коэффициента  $k_{n,p}$ , учитывающего уровень надежности, статистическую неопределенность и наличие предварительной информации о значении стандартного отклонения генеральной совокупности, вычисляется в предположении «стандартное отклонение неизвестно» [21]. Данный случай возможен при  $n$  равном 4 и более экспериментальных результатов, так как при меньшем количестве статистическая неопределенность стандартного отклонения очень большая или его просто невозможно вычислить. Для количественного примера примем, что вычисленный по  $n$  результатам физических испытаний коэффициент вариации метрики точности компьютерной модели составляет 5%, 7%, 9% или 11%, что соответствует большинству практических задач [17; 31–34]. Неопределенность несущей способности из-за изменчивости базисных переменных примем 7% как наиболее усредненный показатель [18; 35–38]. Значения коэффициента надежности представим в следующем виде:

$$\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = \mu_\theta \cdot \mu_r / R_d, \quad (1)$$

где  $\mu_r \approx r_{\min}(\underline{X}_m)$  – значение несущей способности, полученное на основе численной модели при средних значениях базисных переменных;

$\mu_\theta$  – среднее значение метрики точности моделирования;

$R_d$  – расчетное значение несущей способности, вычисленное согласно исследованию [21].

Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

Второй случай рассмотрим в предположении, что наибольшее значение коэффициента вариации априорно известно, тогда значения коэффициента надежности вычислим при коэффициенте  $k_{n,p}$  для случая «стандартное отклонение известно» [21]. На основании исследований [17; 31–34] можно предположить наиболее консервативные значения параметров метрики точности. Исследования показывают, что для моделей стальных конструкций коэффициент вариации  $V_\theta$  не превышает 12%. При больших значениях коэффициента вариации  $V_\theta$  происходит явное отклонение от поведения валидируемого образца и такие модели не проходят валидации.

Дополнительно, чтобы учесть уверенность в оценивании среднего значения  $\mu_\theta$  и коэффициента вариации  $V_\theta$  метрики точности с каждым новым результатом валидации, фактически вычисленные значения параметров будем обновлять Байесовским методом уточнения статистических характеристик [39]. В качестве предварительной (априорной) информации для статистических характеристик примем наиболее консервативные значения, равные  $V_\theta' = 12\%$  и  $\mu_\theta' = 0,95$ ;  $n' = 1,0$ ;  $v' = 1,0$ . Тогда с помощью уравнений (25–28), приведенных в работе [18], можно обновить значения  $V_\theta$  и  $\mu_\theta$ . Соответственно, среднее значение метрики точности компьютерной модели вычисляется на основании сравнения с экспериментальными данными, а стандартное отклонение принимается консервативным на основании априорной информации с обновлением по количеству экспериментальных результатов,

и значение коэффициента  $k_{n,p}$  вычисляется в предположении «стандартное отклонение известно» [21]. Таким образом, выполнена оценка верхнего значения коэффициентов надежности  $\gamma_{R,верх}$  (см. рисунок 1). Аналогичным образом вычислено нижнее значение коэффициента надежности  $\gamma_{R,ниж}$ , но для расчета коэффициент вариации принят равным 5% (см. рисунок 1).

Как видно из представленных результатов исследования, для проектирования новых конструктивных решений на основе компьютерных вычислительных моделей необходимо по крайней мере 4 результата валидации. При этом при характерных статистических характеристиках метрики точности для стальных конструкций наибольший эффект за счет увеличения количества валидации возникает в диапазоне от 4 до 6 результатов. В отдельных случаях возможна валидация на основе 2 и 3 экспериментальных результатов, но тогда следует применять консервативные значения частных коэффициентов (по верхней границе), при этом прогностическая способность модели становится существенно зависимой от опыта и приобретает более интуитивный характер, чем математически обоснованный.

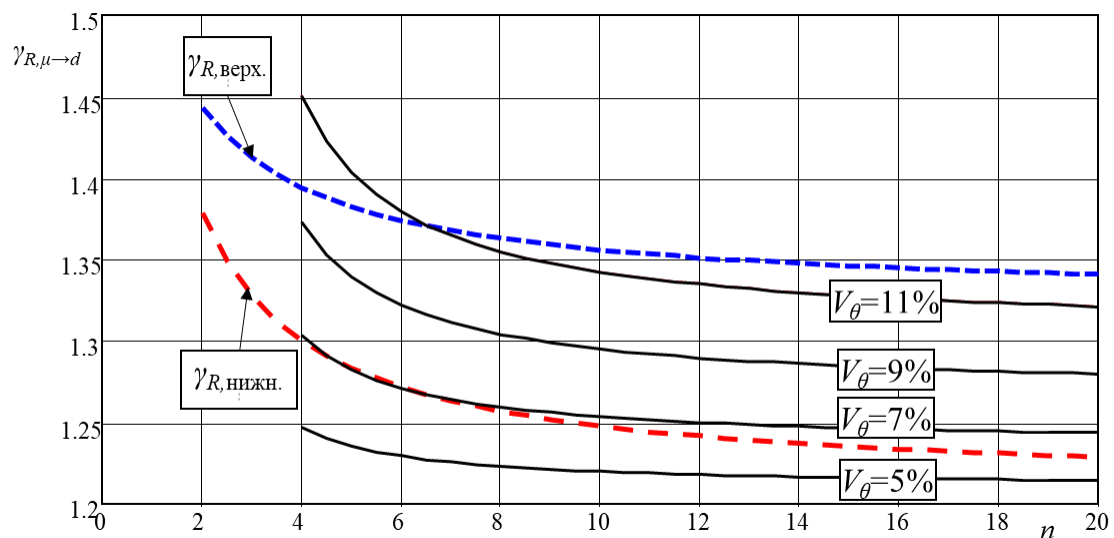


Рисунок 1. – Зависимость коэффициента надежности от количества экспериментальных результатов

**Заключение.** В исследовании представлены принципы проверки и повышения достоверности моделей компьютерного моделирования для оценки несущей способности строительных конструкций. Основные результаты представлены ниже:

- *верификация программного обеспечения* направлена на устранение ошибок и ограничение до приемлемо низкого уровня погрешностей в численном алгоритме решения и компьютерном коде при любых обстоятельствах, при которых допускается применять программное обеспечение. Верификация программного обеспечения выполняется на основе сравнения с тестовыми задачами с известными аналитическими, полуаналитическими или высокоточными численными решениями. Разработчики и поставщики программного обеспечения должны брать на себя ответственность за верификацию программного обеспечения.

- *верификация компьютерной вычислительной модели* направлена на устранение ошибок и определение погрешностей, связанных с дискретизацией и численным решением для конкретной модели, набора ее параметров. Верификация модели выполняется главным образом на основании анализа сходимости или сравнения с результатами расчетов, полученными посредством других алгоритмов решения. Разработчик модели несет ответственность за верификацию модели. Верификация должна предшествовать валидации.

- *валидация* направлена на устранение ошибок и подтверждение применимости, прогностической способности (способность модели предсказывать поведение конструкции) компьютерной модели и на оценку ее точности. Валидация специфична для конкретной компьютерной модели для конкретного предполагаемого использования. Валидация выполняется на основании качественного (цель – подтвердить поведение) и количественного (цель – установить точность) сравнения с эталонными данными. В качестве эталонных данных могут выступать экспериментальные данные (главным образом для неизученных, новых конструктивных решений и их условий эксплуатации) или валидированные формульные модели сопротивления (главным образом для изученных конструктивных решений и их условий эксплуатации). Валидация на основании общепринятых формульных моделей и общепризнанных знаний о поведении элемента не может рассматриваться как универсальная стратегия, но может рассматриваться как дополнительная информация, требуя консервативных подходов к назначению параметров надежности. Валидация также является основой для оценки статистических параметров метрики точности (неопределенности и погрешности) моделирования и для дальнейшего назначения способа учета неопределенности при обеспечении проектной надежности;

– анализ количества экспериментов, необходимых для валидации не апробированных компьютерных моделей, показал, что для проектирования новых конструктивных решений необходимо по крайней мере 4 результата валидации, при этом наибольший эффект за счет увеличения количества валидации возникает в диапазоне от 4 до 6 результатов. В отдельных случаях возможна валидация на основе 2 и 3 экспериментальных результатов, но тогда следует вводить дополнительный консерватизм в значения частных коэффициентов, а прогностическая способность модели становится существенно зависимой от опыта и приобретает более интуитивный характер, чем математически обоснованный. Валидационные эксперименты напрямую вносят вклад в доверие к модели. Однако трудно количественно оценить потребность в новых экспериментах. Даже при наличии данных для валидации остается проблема в создании основы для количественной оценки прогностической способности модели для условий, отличных от валидационных экспериментов. Это может быть особенно проблематичным, когда данные экспериментов недостаточно репрезентативны или испытания невозможны.

Верификация и валидация усложняются отсутствием соответствующих тестовых решений и эталонных данных. Опасность заключается в том, что без надлежащей верификации любое отклонение в способности модели к прогнозированию не может быть связано ни с точностью реализации компьютерной модели (роль верификации), ни с неадекватным представлением физики, механики (роль валидации), особенно при малом количестве эталонных данных. Таким образом, чтобы компьютерное моделирование могло в дальнейшем эволюционировать в более надежную методику, существует потребность в создании баз данных для верификации и валидации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 80. – P. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders / B. Kövesdi, J. Alcaine, L. Dunai et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 103. – P. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading / V. Nadolski, J. Marková, V. Podymako et al. // Proceedings of conference Modelling in Mechanics. – 2022. – P. 11–21.
4. On Development of Numerical Resistance Models of Thin-Web Steel Girders / V. Nadolski, J. Marková, V. Podymako et al. // Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. – 2023. – Vol. 23(1). – P. 12–19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003.
5. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research / S. Kovacevic, N. Markovic, D. Sumarac et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2019. – Vol. 158. – P. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur F., Beg D. Moment-shear interaction of stiffened plate girders – Tests and numerical model verification // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 85. – P. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Estrada I., Real E., Mirambell E. General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal // Journal of Constructional Steel Research. – 2007. – Vol. 63. – P. 985–996. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.08.010.
8. Надольский В.В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Приклад. науки. Стр-во. – 2018. – № 16. – С. 121–130.
9. Тур В.В., Надольский В.В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления // Стр-во и реконструкция. – 2022. – № 6(104) – С. 78–90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.
10. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13, Iss. 3. – P. 86–102. DOI: 10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102.
11. Матвеев, А.Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных балок сложной формы // Решетневские чтения. – 2018. – Ч. 1. – С. 568–569.
12. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Метод конечных элементов модели тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента // Инженер. вестн. Дона. – 2019. – № 4(55). – С. 54–63.
13. Надольский В.В. Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов // Стр-во и реконструкция. – 2023. – № 1(1). – С. 43–56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.
14. Анализ прочности узловых соединений при различных исполнениях конструкции на основе моделирования в среде ANSYS / Т.М. Мартыненко, С.А. Пронкевич, И.М. Мартыненко и др. // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – № 15. – С. 147–151.
15. Моделирование напряженно-деформированного состояния сварных соединений в ANSYS Mechanical / А.В. Фролов, М.В. Воронов, А.А. Медельцев и др. // Изв. ТулГУ. Техн. науки. – 2022. – № 11. – С. 61–76. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-61-76.
16. Палаев А.Г., Носов В.В., Красников А.А. Моделирование распределения температурных полей и напряжений в сварном соединении с применением ANSYS // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Т. 12(5). – С. 461–469. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469.
17. Надольский В.В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов // Стр-во и реконструкция. – 2023. – № 3(107). – С. 17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34.
18. Надольский В.В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой // Вестн. МГСУ. – 2023. – Т. 18(6). – С. 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863.
19. Бритов Г.С. Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 2(63). – С. 75–82.
20. Верификация и валидация компьютерных моделей / А.В. Сальников, М.С. Французов, К.А. Виноградов и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9(750). – С. 100–115. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

21. Надольский В.В. Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей // Вестн. МГСУ. – 2023. – Т. 18, вып. 3. – С. 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378.
22. Чарикова И.Н. Особенности математического моделирования балочных систем в интерактивной образовательной среде // Пром. и гражданское стр-во. – 2017. – № 11. – С. 112–116.
23. Цифровой двойник установки для испытаний центробежного компрессора малоразмерного ГТД / Ю.М. Темис, А.В. Соловьева, Ю.Н. Журенков и др. // Авиац. двигатели. – 2021. – № 1(10). – С. 5–16. DOI: 10.54349/26586061\_2021\_1\_5.
24. Цифровые двойники – платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей / А.В. Сальников, М.В. Гордин, Ю.Н. Шмотин и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2022. – № 4. – С. 60–72. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72.
25. Борисов Е.А., Теплов А.В. Особенности проверки качества программного обеспечения // Наука через призму времени. – 2020. – № 1(34). – С. 27–29.
26. Караханова А.А., Маликова А.С. Рассмотрение принципов проведения тестирования программного обеспечения // Синергия Наук. – 2019. – № 41. – С. 264–270.
27. Алексеев А.К., Бондарев А.Е. Об апостериорной оценке нормы погрешности численного расчета на ансамбле независимых решений // Сиб. журн. вычисл. математики. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 233–248. DOI: 10.15372/SJNM20200301.
28. Алексеев А.К., Бондарев А.Е. Оценка локальной погрешности аппроксимации по набору численных решений // Сиб. журн. вычисл. математики. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 343–358. DOI: 10.15372/SJNM20220401.
29. Белов А.Н., Туровцев В.В., Орлов Ю.Д. Оценка погрешностей численного решения торсионного уравнения Шредингера в базисе функций Матье // Вычисл. технологии. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 33–43. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.3.003.
30. Гришанов А.Н. Метод определения апостериорных оценок погрешностей в расчетах композитных оболочек с применением многосеточных конечных элементов // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 16–25. DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-16-25.
31. Надольский В.В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // Стр-во и реконструкция. – 2022. – № 2(100). – С. 26–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43.
32. Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестн. МГСУ. – 2022. – Т. 17, вып. 6. – С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706.
33. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 199. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624.
34. Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 2: Variability of steel properties / L. Silva, C. Rebelo, D. Nethercot et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – Vol. 65(4). – P. 832–849. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017.
35. Kala Z., Melcher J., Puklický L. Material and geometrical characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products // Journal of Civil Engineering and Management. – 2009. – Vol. 15(3). – P. 299–307. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.299-307.
36. Kala Z. Sensitivity assessment of steel members under compression // Engineering Structures. – 2009. – Vol. 31. – P. 1344–1348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001.
37. Agüero A., Pallarés L., Pallarés F.J. Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 96. – P. 160–177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.065.
38. Kala Z., Kala J. Sensitivity Analysis of Stability Problems of Steel Structures using Shell Finite Elements and Nonlinear Computation Methods // AIP Conference Proceedings. – 2011. DOI: 10.1063/1.3636974.
39. Соловьева А.А., Соловьев С.А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации // Вестн. МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 5. – С. 587–607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607.

## REFERENCES

1. Graciano, C. & Ayestarán, A. (2013). Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*, (80), 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi, B., Alcaine, J., Dunai, L., Mirambell, E., Braun, B. & Kuhlmann, U. (2014). Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*, (103), 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Nadolski, V., Marková, J., Podymako, V. & Sýkora, M. (2022). Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading. *Proceedings of conference Modelling in Mechanics*, 11–21.
4. Nadolski, V., Marková, J., Podymako, V. & Sýkora, M. (2023). On Development of Numerical Resistance Models of Thin-Web Steel Girders. *Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*, 23(1), 12–19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003.
5. Kovacevic, S., Markovic, N., Sumarac, D. & Salatic, R. (2019). Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*, (158), 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur, F. & Beg, D. (2013). Moment-shear interaction of stiffened plate girders – Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*, (85), 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Estrada, I., Real, E. & Mirambell, E. (2007). General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal. *Journal of Constructional Steel Research*, (63), 985–996. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.08.010.
8. Nadol'skii, V.V. (2018). Raschet i konstruirovaniye flantsevogo soedineniya elementov pryamougol'nogo secheniya, podverzhennykh tsentral'nomu rastyazheniyu [Calculation and Construction of the Flange Connection of Rectangular Elements Subjected to the Axial Tension]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F: Priklad. nauki. Str-tvo [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied sciences]*, (16), 121–130. (In Russ., abstr. in Engl.).



9. Tur, V.V. & Nadol'skii, V.V. (2022). Kontseptsiya proektirovaniya stroitel'nykh konstruksii na osnove chislennykh modelei soprotivleniya [The Concept of Design of Building Structures Based on Numerical Resistance Models]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 6(104), 78–90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Perel'muter, A.V. & Tur, V.V. (2017). Gotovy li my pereiti k nelineinomu analizu pri proektirovanii [Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing?]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 13(3), 86–102. DOI: 10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Matveev, A.D. (2018). Metod mnogosetochnykh konechnykh elementov v raschetakh kompozitnykh balok slozhnoi formy [Multigrid finite element method in the calculations of composite beams of irregular shape]. In *Reshetnevskie chteniya: v 2 ch. Ch. 1*. Krasnoyarsk: SibGU im. M.F. Reshetneva. (In Russ.).
12. Ustimenko, E.E. & Skachkov, S.V. (2019). Metod konechnykh elementov modeli tonkostennogo profilya s polkami ob"emnogo fasonnogo elementa. *Inzhener. vestn. Dona*, 4(55), 54–63. (In Russ.).
13. Nadol'skii, V.V. (2023). Parametry chislennykh modelei nesushchei sposobnosti dlya stal'nykh elementov [Parameters of Numerical Resistance Models for Steel Elements]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 1(1), 43–56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Martynenko, T.M., Pronkevich, S.A., Martynenko, I.M. & Maksimovich, V.A. (2022). Analiz prochnosti uzlovykh soedinenii pri razlichnykh ispolneniyakh konstruksii na osnove modelirovaniya v srede ANSYS [Strength Analysis of Junction Joints for Different Design Performances on the Basis of Simulation in the Ansys Software]. *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii*, (15), 147–151. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Frolov, A.V., Voronov, M.V., Medel'tsev, A.A., Sedova, K.A. & Shapovalov, P.A. (2022). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarykh soedinenii v ANSYS Mechanical [Modeling the stress-strain state of welded joints in ANSYS Mechanical]. *Izv. TulGU. Tekhn. nauki [Izvestiya TulGU. Technical science]*, (11), 61–76. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-61-76. (In Russ., abstr. in Engl.).
16. Palaev, A.G., Nosov, V.V. & Krasnikov, A.A. (2022). Modelirovanie raspredeleniya temperaturnykh polei i napryazhenii v svarnom soedinenii s primeneniem ANSYS [Simulating Distribution of Temperature Fields and Stresses in Welded Joint Using ANSYS]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov [Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products]*, 12(5), 461–469. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Nadol'skii, V.V. (2023). Statisticheskie kharakteristiki pogreshnosti chislennykh modelei nesushchei sposobnosti dlya stal'nykh elementov [Statistical Characteristics of the Numerical Model Uncertainties for Steel Elements]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 3(107), 17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34. (In Russ., abstr. in Engl.).
18. Nadol'skii, V.V. (2023). Koeffitsienty nadezhnosti dlya nelineinykh modelei nesushchei sposobnosti balok s gibkoi stenкой Realiability coefficients for nonlinear models of load-bearing capacity of beams with flexible web]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 18(6), 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863. (In Russ., abstr. in Engl.).
19. Britov, G.S. (2013). Verifikatsiya, validatsiya i testirovanie komp'yuternykh modelei lineinykh dinamicheskikh sistem. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2(63), 75–82. (In Russ.).
20. Sal'nikov A.V., Frantsuzov, M.S., Vinogradov, K.A., Pyatunin, K.R. & Nikulin, A.S. (2022). Verifikatsiya i validatsiya komp'yuternykh modelei [Digital Simulation Verification and Validation]. *Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]*, 9(750), 110–115. (In Russ., abstr. in Engl.).
21. Nadol'skii, V.V. (2023). Otsenka raschetnogo znacheniya nesushchei sposobnosti stal'nykh elementov, proektiruemykh na osnove chislennykh modelei [Evaluating the design value of the bearing capacity of steel elements designed using numerical models]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 18(3), 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378. (In Russ., abstr. in Engl.).
22. Charikova, I.N. (2017). Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya balochnykh sistem v interaktivnoi obrazovatel'noi srede. *Prom. i grazhdanskoe str-vo*, (11), 112–116. (In Russ.).
23. Temis, Yu.M., Solov'eva, A.V., Zhurenkov, Yu.N., Startsev, A.N., Temis, M.Yu., Yakushev, D.A., ... Drozhzhin, M.V. (2021). Tsifrovoy dvoynik ustanovki dlya ispytaniy tsentrobezhnogo kompressora malorazmernogo GTD [Digital twin of rig for testing of centrifugal compressor for small-scale gas turbine engine]. *Aviats. dvigateli [Aviation Engines]*, 1(10), 5–16. DOI: 10.54349/26586061\_2021\_1\_5. (In Russ., abstr. in Engl.).
24. Sal'nikov, A.V., Gordin, M.V., Shmotin, Yu.N., Nikulin, A.S., Makarov, P.V. & Frantsuzov, M.S. (2022). Tsifrovye dvoyniki – platforma dlya upravleniya zhiznennym tsiklom aviatsionnykh dvigatelei [Digital Twins – a Platform for Aircraft Engine Lifecycle Management]. *Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]*, 4(745), 60–72. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72. (In Russ., abstr. in Engl.).
25. Borisov, E.A. & Teplov, A.V. (2020). Osobennosti proverki kachestva programmno obespicheniya. *Nauka cherez prizmu vremeni*, 1(34), 27–29. (In Russ.).
26. Karakhanova, A.A. & Malikova, A.S. (2019). Rassmotrenie printsipov provedeniya testirovaniya programmno obespicheniya [Consideration of Principles of Testing the Software]. *Smergiya Nauk*, (41), 264–270. (In Russ., abstr. in Engl.).
27. Alekseev, A.K. & Bondarev, A.E. (2020). Ob aposteriorni otsenke normy pogreshnosti chislennogo rascheta na ansamble nezavysimykh reshenii [On a posteriori estimation of the approximation error norm for an ensemble of independent solutions]. *Sib. zhurn. vychisl. matematiki [Numerical Analysis and Applications]*, 23(3), 233–248. DOI: 10.15372/SJNM20200301. (In Russ., abstr. in Engl.).
28. Alekseev, A.K. & Bondarev, A.E. (2022). Otsenka lokal'noi pogreshnosti approksimatsii po naboru chislennykh reshenii [An estimation of point-wise approximation error using the set of numerical solutions]. *Sib. zhurn. vychisl. matematiki [Numerical Analysis and Applications]*, 25(4), 343–358. DOI: 10.15372/SJNM20220401. (In Russ., abstr. in Engl.).
29. Belov, A.N., Turovtsev, V.V. & Orlov, Yu.D. (2019). Otsenka pogreshnostei chislennogo resheniya torsionnogo uravneniya Shredingera v bazise funktsii Mat'e [Errors in the numerical solution of the torsion Schrödinger equation with Mathieu functions basis set]. *Vychisl. tekhnologii [Computational Technologies]*, 24(3), 33–43. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.3.003. (In Russ., abstr. in Engl.).
30. Grishanov, A.N. (2018). Metod opredeleniya aposteriornykh otsenok pogreshnostei v raschetakh kompozitnykh obolochek s primeneniem mnogosetochnykh konechnykh elementov [Method of Determining a Posteriori Error Estimation in Calculations of Composite Shells using Multigrid Finite Elements]. *Vestn. Astrakh. gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Astrakhan State Technical University]*, (4), 16–25. (In Russ., abstr. in Engl.).

31. Nadol'skii, V.V. & Podymako, V.I. (2022). Otsenka nesushchei sposobnosti stal'noi balki metodom konechnykh elementov pri sovmestnom deistvii lokal'nykh i sdvigovykh usilii [The evaluation of ultimate resistance of steel beams to combined shear and patch loading by finite element method]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 2(100), 26–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43. (In Russ., abstr. in Engl.).
32. Nadol'skii, V.V. & Vikhlyaev, A.I. (2022). Otsenka nesushchei sposobnosti balok s gofirovannoi stenкой metodom konechnykh elementov pri deistvii lokal'noi nagruzki [Using the Finite Element Method to evaluate the Load-bearing capacity of beams with a corrugated web subjected to local loading]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 17(6), 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706. (In Russ., abstr. in Engl.).
33. Fieber, A., Gardner, L. & Macorini, L. (2019). Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits. *Engineering Structures*, (199). DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624.
34. Silva, L., Rebelo, C., Nethercot, D., Marques, L. & Simões, R. (2009). Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 2: Variability of steel properties. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), 832–849. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017.
35. Kala, Z., Melcher, J. & Puklický, L. (2009). Material and geometrical characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(3), 299–307. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.299-307.
36. Kala, Z. (2009). Sensitivity assessment of steel members under compression. *Engineering Structures*, (31), 1344–1348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001.
37. Agüero, A., Pallarés, L. & Pallarés, F.J. (2015). Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression. *Engineering Structures*, (96), 160–177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.065.
38. Kala, Z. & Kala, J. (2011). Sensitivity Analysis of Stability Problems of Steel Structures using Shell Finite Elements and Nonlinear Computation Methods. *AIP Conference Proceedings*. DOI: 10.1063/1.3636974.
39. Solov'eva, A.A. & Solov'ev, S.A. (2021). Issledovanie razvitiya modelei sluchainykh velichin v raschetakh nadezhnosti stroitel'nykh konstrukttsii pri nepolnoi statisticheskoi informatsii [A research into the development of models of random variables as part of the structural reliability analysis performed in the absence of some statistical information]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 16(5), 587–607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 12.03.2024

## VERIFICATION AND VALIDATION OF A COMPUTER COMPUTATIONAL MODEL FOR THE DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

**V. NADOLSKI**  
(*Brest State Technical University*)

*A review and analysis of the verification and validation procedures of computer computational models has been performed in order to provide a conceptual framework and guidance on their implementation in relation to the design of building structures. The description of verification procedures for computer software and computer computational models is presented. The main stages of validation are formulated. The purpose of validation is to confirm the applicability, predictive ability and determination of the characteristics of the accuracy of computer models. Based on the analysis of the design value of the load-bearing capacity, a conclusion is made about the number of experiments required for validation for computer models. The study focuses on the description of verification and validation procedures for computer models of new design solutions and non-standardized model parameters. However, the recommendations given here are also suitable for more studied design solutions, while the scale of verification and validation activities may be reduced.*

**Keywords:** *verification, validation, computer model, mathematical model, computer modeling.*

УДК 624.131

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-51-58

**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ВЕРТИКАЛЬНОГО АРМИРОВАНИЯ  
СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВА СПЛОШНОЙ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ ЗДАНИЯ***канд. техн. наук А.Н. НЕВЕЙКОВ<sup>1</sup>, В.Н. ДЕДОК<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Белорусский государственный университет транспорта, Гомель,**<sup>2</sup> Брестский государственный технический университет)**<sup>1</sup> geomonolith@gmail.com*

*Статья посвящена проблемам проектирования и устройства искусственного основания из вертикальных армирующих элементов при устройстве сплошной фундаментной плиты здания в Республике Беларусь.*

**Ключевые слова:** *слабое основание, вертикальное армирование основания, забивная свая, метод конечных элементов.*

**Введение.** Ограниченность территорий для строительства в черте города и их высокая стоимость вынуждают уплотнять существующую застройку и повышать этажность зданий, что сопровождается ростом нагрузок на фундаменты и основания зданий. Одним из решений в отмеченных условиях строительства является применение сплошной фундаментной плиты под всем зданием. Опыт применения таких фундаментов для возведения жилых высотных зданий оказался эффективным как с позиции способа ведения строительно-монтажных работ, так и надежности. Однако возведение таких фундаментов на слабых основаниях может приводить к развитию больших осадок фундаментов и их неравномерности, превышающих допустимые нормами величины. В таких условиях для снижения неравномерности осадок и деформаций плитных фундаментов потребуются применение свай для устройства свайно-плитного фундамента, или альтернативного варианта, – устройство искусственного основания под сплошным плитным фундаментом методом вертикального армирования, практическая реализация которого рассмотрена ниже.

**Проектные решения по зданию и инженерно-геологические условия площадки строительства.** Проектное решение здания – типовой одиннадцатипятиэтажный двухсекционный крупнопанельный жилой дом с перекрестно-стеновой конструктивной системой и узким шагом несущих поперечных стен в 3,6 м и несущими трехслойными наружными стенами. Пространственная жесткость здания обеспечена совместной работой поперечных и продольных несущих стен с замоноличенными бетоном стыками в сочетании с дисками перекрытий, опертыми на стены по контуру и трем сторонам. Под всем зданием предусмотрено техническое подполье, предназначенное для прокладки инженерных коммуникаций. Фундамент под жилой дом принят в виде сплошной фундаментной плиты толщиной 600 мм по бетонной подготовке толщиной 100 мм. Выбор исходного типа фундамента принят в соответствии с техническим заключением по инженерно-геологическим изысканиям после предварительно выполненных расчетов ленточных фундаментов. Нагрузки на фундамент здания приняты в соответствии с привязкой типового проекта.

Согласно выполненным инженерно-геологическим изысканиям на площадке строительства здания грунтовый массив в ее пределах сложен сверху вниз:

- техногенными отложениями из насыпных грунтов мощностью от 0,4 до 3,7 м (ИГЭ 1, 1а) преимущественно из песка мелкого с включениями строительного мусора;
- флювиогляциальными надморенными отложениями мощностью от 0,5 до 1,8 м из песка пылеватого средней прочности (ИГЭ 2 –  $E = 14$  МПа) и прочного (ИГЭ 3 –  $E = 16$  МПа);
- моренными отложениями мощностью от 10,9 до 24 м из супеси прочной (ИГЭ 4 –  $E = 23$  МПа) и суглинков слабых (ИГЭ 5а –  $E = 4,2$  МПа), средней прочности (ИГЭ 5 –  $E = 8,5$  МПа), прочных (ИГЭ 6 –  $E = 26$  МПа) и очень прочных (ИГЭ 7 –  $E = 46$  МПа) с включениями гравия и гальки.

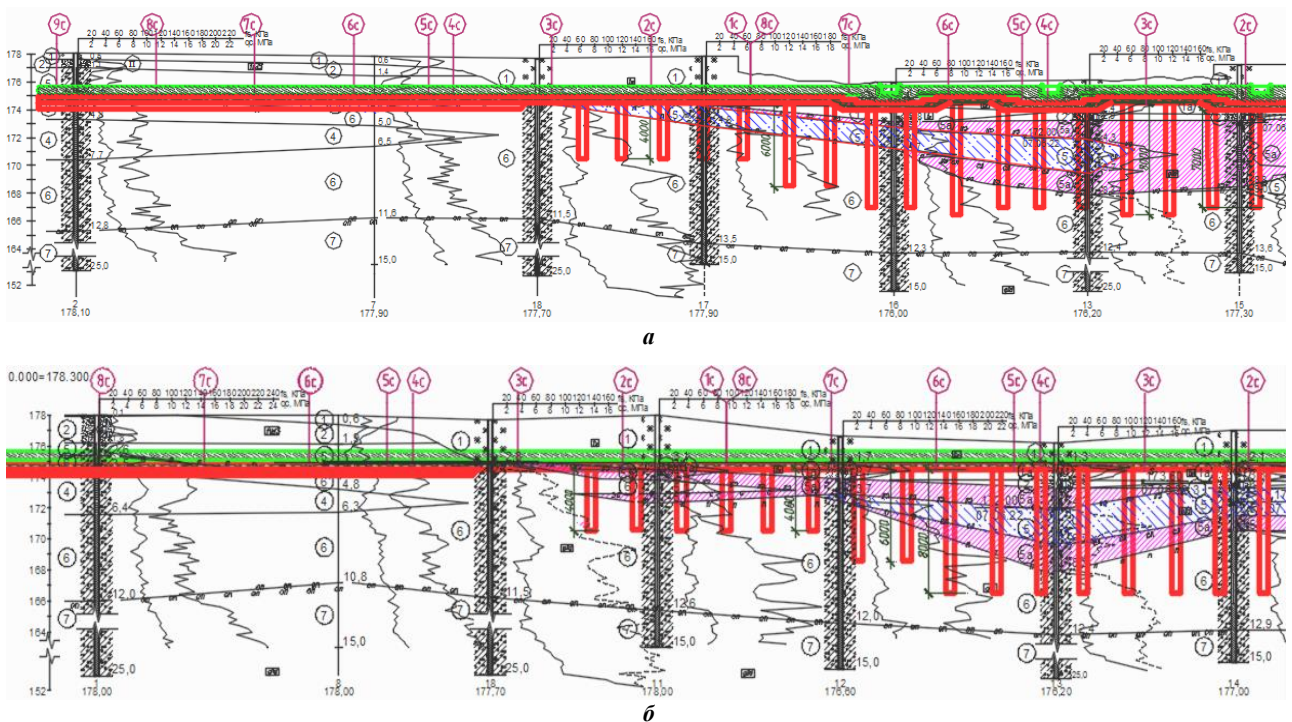
По совокупности факторов инженерно-геологические условия площадки строительства по данным изысканий, выполненных в июне 2022 года, отнесены к III категории сложности<sup>1</sup>. Осложняющие факторы – наличие техногенных насыпных грунтов и суглинков моренных малопрочных. Класс геотехнического риска – Б<sup>2</sup>, как для здания II уровня ответственности. Физико-механические характеристики грунтов основания представлены в таблице 1, а характерные продольные инженерно-геологические разрезы вдоль здания – на рисунке 1.

<sup>1</sup> СН 1.02.01-2019 Инженерные изыскания для строительства. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 113 с.

<sup>2</sup> ТКП 45-5.01-254-2012 Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения проектирования. Строительные нормы проектирования. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012. – 164 с.

Таблица 1. – Физико-механические характеристики грунтов основания

ЭГП	Наименование грунта	Коеф. пор.	Показ. текуч.	Плотн., г/см <sup>3</sup>	Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>			Удельное сцепление, кПа			Угол вн. трения, градусы			Мод. деф., МПа
		$e$	$I_L$	$\rho_n$	$\gamma_{II}$	$\gamma_I$	$\gamma_{sb}$	$c_n$	$c_{II}$	$c_I$	$\varphi_n$	$\varphi_{II}$	$\varphi_I$	$E$
1	Насыпной грунт	0,75	–	1,72	16,8	16,5	9,5	–	–	–	–	–	–	–
1a	Насыпной песок мелкий ср. прочности	0,62	–	-	–	–	–	2,0	2,0	1,3	33,0	33,0	30,0	23
2	Песок пылеватый ср. прочности	0,68	–	1,71	16,9	16,8	9,9	3,4	3,4	2,3	28,8	28,8	26,2	14
3	Песок пылеватый водонас. ср. прочности	0,61	–	2,03	19,9	-	10,3	4,0	4,0	2,7	31,3	31,3	28,5	16
4	Супесь моренная прочная	0,48	0,11	2,07	20,4	20,2	11,5	34,5	34,5	23,0	27,7	27,7	24,1	23
5	Суглинок моренный ср. прочности	0,62	0,43	1,94	19,3	19,3	10,5	33,1	32,5	32,0	24,4	23,8	23,3	8,5
5a	Суглинок моренный слабый	0,64	0,48	1,93	1,92	1,92	1,04	26,7	25,5	24,4	22,2	21,7	21,2	4,2
6	Суглинок моренный прочный	0,55	0,26	2,00	19,9	19,8	11,0	44,4	44,4	29,6	26,9	26,9	23,4	26
7	Суглинок моренный очень прочный	0,43	0,11	2,10	21,0	21,0	11,9	50,5	50,5	33,7	28,5	28,5	24,8	46



а – разрез 1-1; б – разрез 2-2

Рисунок 1. – Характерные продольные инженерно-геологические разрезы вдоль здания

Предварительные инженерные расчеты здания на сплошной фундаментной плите были выполнены методом конечных элементов в программном комплексе «Ingr+2019»<sup>3</sup> в пространственной постановке по комплексной схеме: надземные конструкции – фундаментная плита – основание. Для создания конечно-элементной расчетной схемы были

<sup>3</sup> Описание компонентов программного комплекса «Инж-РУ». URL: <http://www.tech-soft.ru/index.php/docru>.

использованы исходные данные и параметры, соответствующие реальным условиям строительства. Грунты основания задавали объемными элементами в виде упругого изотропного полупространства. Характеристики грунтов принимали по данным инженерно-геологических изысканий. Для моделирования железобетонных конструкций здания применили линейно-упругие плоские элементы с физико-механическими свойствами, соответствующими свойствам железобетона, приняв  $\gamma_m = 24 \text{ кН/м}^3$ ;  $E_c = 30000 \text{ ГПа}$ ;  $\nu = 0,2$ .

По результатам статического расчета здания определено, что при осредненном расчетном давлении ( $\gamma_f = 1,0$ ) от фундамента на основание в  $175 \text{ кПа}$  осадки сплошной фундаментной плиты превышают допустимые нормами<sup>4</sup> значения по неравномерности и максимальной величине, что впоследствии было подтверждено расчетом в специализированной геотехнической программе «GEO5-FEM»<sup>5</sup>, основанной на методе конечных элементов.

Опираясь на полученные результаты, было предложено под частью сплошной фундаментной плиты заполнить искусственное основание методом вертикального армирования с эквивалентным модулем деформаций не менее  $20 \text{ МПа}$ , а под оставшейся частью фундаментной плиты выполнить замену грунта на уплотненную песчаную подушку. Искусственное основание предложено выполнять вертикальным армированием слабых грунтов забивными сваями сечением  $300 \times 300 \text{ мм}$  переменной длины от  $4$  до  $8 \text{ м}$ . Дополнительно под всей плитой был предусмотрен буферный слой из песчано-гравийной смеси толщиной  $500 \text{ мм}$  с модулем деформации ( $E$ )  $35 \text{ МПа}$ . Такое решение позволило отказаться от применения длинных свай и свайно-плитного фундамента. Применение забивных свай было обосновано технико-экономическим сравнением с буронабивными и щебеночными сваями. Полученное искусственное основание подстилают:

– суглинок моренный средней прочности (ИГЭ 5) со следующими характеристиками:  $E = 8,5 \text{ МПа}$ ;  $\varphi_{II} = 24,4$ ;  $c_{II} = 33,1 \text{ кПа}$ ;  $\gamma_{II} = 19,3 \text{ кН/м}^3$  (под уплотненной песчаной подушкой и буферным слоем в месте отсутствия свай под плитой);

– суглинок моренный прочный (ИГЭ 6) с характеристиками  $E = 26 \text{ МПа}$ ;  $\varphi_{II} = 26,9$ ;  $c_{II} = 44,4 \text{ кПа}$ ;  $\gamma_{II} = 19,9 \text{ кН/м}^3$  (под вертикальными армирующими элементами и ИГЭ5).

Отличительной особенностью такого основания является то, что отсутствует контакт между фундаментом и сваями, а нагрузка передается через буферный слой грунта. За счет расположения этого слоя нагрузка на сваи передается равномерно. Также одним из отличий является отсутствие ограничений к диаметру и длине вертикальных элементов армирования. Отмеченные особенности существенным образом влияют на напряженно-деформированное состояние такого основания, которое необходимо определить расчетом.

**Примененные методы расчета вертикального армирования основания.** Несмотря на значительный опыт применения метода вертикального армирования оснований в фундаментостроении Беларуси [1–3] и наличие практических рекомендаций по их расчету и проектированию<sup>6</sup>, позднее отраженных в национальном нормативном документе СП 5.01.01-2023<sup>7</sup>, широкое применение данного метода все еще вызывает затруднения. Основные вопросы связаны с тем, что в публикуемых сведениях отражены неполные данные об инженерно-геологических условиях площадки строительства, применяемых проектных решениях, методах и результатах опытных полевых исследований при отсутствии каких-либо сведений о выполняемых расчетах численными методами, что затрудняет верификацию предложенных рекомендаций по расчету проектными организациями. При этом в рекомендациях в части сплошного плитного фундамента не оговорены возможности применения вертикального армирования под его частью, назначение минимально необходимых длин армирующих элементов и толщины буферного слоя. Также требует уточнения и дополнительного разъяснения определение эквивалентных физико-механических характеристик полученного таким образом искусственного основания.

Поэтому при проектировании искусственного основания дополнительно были выполнены уточняющие расчеты по ряду методов:

– практическому методу, предложенному В.Г. Федоровским и С.Г. Безволевым [4] и уточненному в своей работе А.М. Карауловым [5];

– методу конечных элементов в специализированной геотехнической программе «GEO5-FEM», которая предназначена для моделирования и анализа широкого спектра геотехнических задач (расчеты устойчивости основания, напряженно-деформированного состояния основания и др.) в плоской постановке.

Расчет в этой программе позволил учесть фактическое состояние грунтов основания с использованием упругопластической модели Кулона – Мора. Для расчета в программе вводили характеристики грунтов по данным инженерно-геологических изысканий. Моделирование свай и сплошной фундаментной плиты выполняли упругими стержнями с интерфейсными элементами, физико-механические свойства которых соответствовали свойствам

<sup>4</sup> СП 5.01.01-2023 Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2023. – 150 с.

<sup>5</sup> Технические руководства к программе «GEO5 – FEM». URL: <https://www.finesoftware.ru/geotekhnicheskikh-raschetov/teoreticheskie-rukovodstva/>.

<sup>6</sup> Р1.02.133-2014 Рекомендации по проектированию и устройству вертикально армированных оснований (геомассивов) для плитных фундаментов зданий и сооружений в грунтовых условиях Республики Беларусь. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2014. – 28 с.

<sup>7</sup> См. сноску 4.

железобетона, приняв  $\gamma_m = 24 \text{ кН/м}^3$ ;  $E_m = 30000 \text{ ГПа}$ ;  $\nu_m = 0,2$ . Расчетные схемы (разбиение на конечные элементы условно не показано) представлены на рисунках 2 и 3.

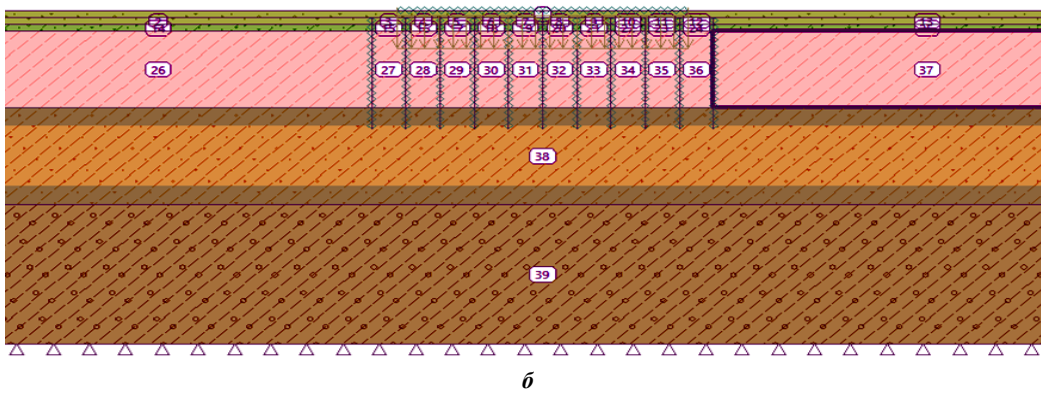
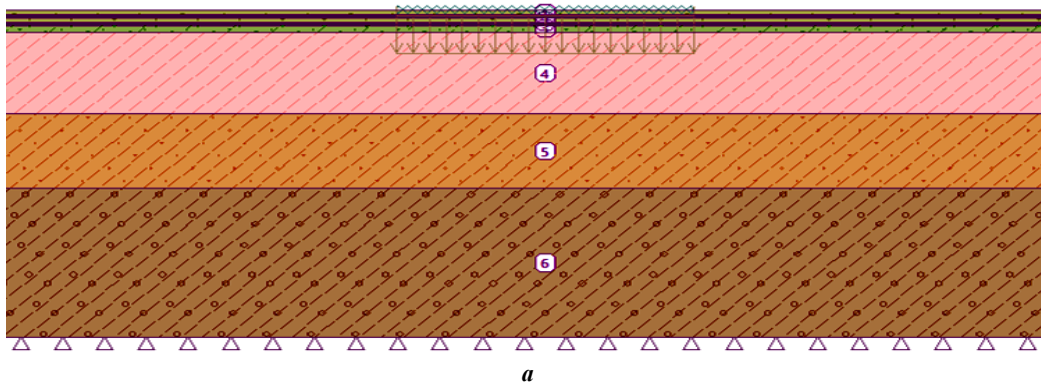


Рисунок 2. – Расчетные схемы фундамента на естественном (а) и усиленном вертикальным армированием (б) основаниях по скважине 15

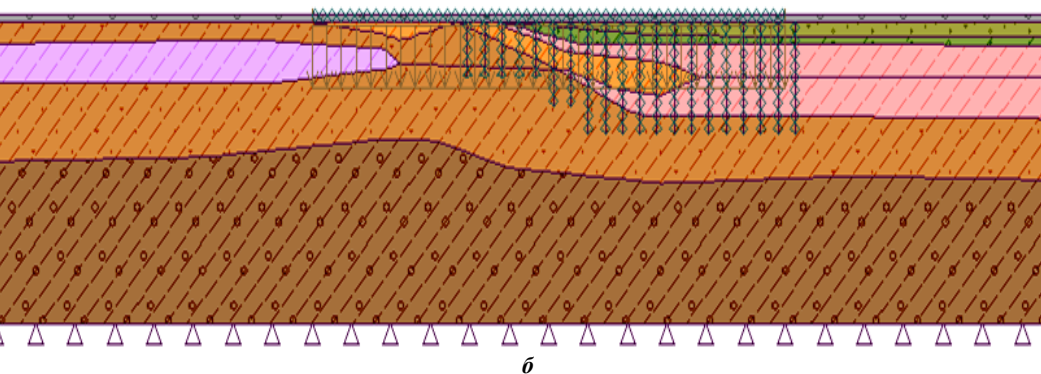
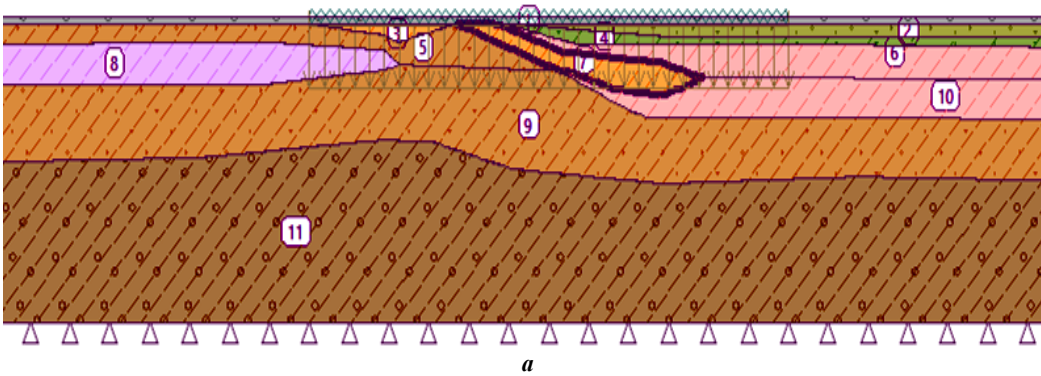


Рисунок 3. – Расчетные схемы фундамента для продольного разреза на естественном (а) и усиленном вертикальным армированием (б) основаниях

Расчет в программе выполнен по характерным скважинам (в статье представлены результаты по наиболее неблагоприятной скважине 15) и для одного из разрезов. Расчеты в программе выполняли в плоской постановке по этапам:

- моделирование природного состояния грунта (этап 1);
- моделирование возведения здания с приложением нагрузки в виде давления на фундамент в 170 кПа от выше возводимых конструкций (этапы 2, 3, 4).

В результате проведенных расчетов удалось получить качественную и количественную оценку работы армированного вертикальными элементами грунтового массива.

**Результаты расчетов и контрольных испытаний на объекте и их анализ.** Результаты расчетов позволили окончательно назначить длину свай от 4 до 8 м и шаг в 1,8 м, рассчитать максимальное усилие в армоэлементах и осадку плитного фундамента и ее неравномерность. По результатам расчета в «GEO5-FEM» был определен эквивалентный модуль деформации полученного искусственного основания, равный 25 МПа, который был далее применен в программе «ING+2019» для совместного расчета здания с основанием для определения армирования плиты.

Результатами расчета в программе «GEO5-FEM» установлено, что:

- максимальная осадка фундаментной плиты на естественном основании не превышает 205 мм при относительной разности осадок не более 0,005, а на искусственном – 95 мм и 0,0015 соответственно;
- максимальное расчетное усилие в армирующем элементе не превышает 475–525 кН при передаче грунтом на верхний и нижний концы расчетного усилия не более 275–325 кН;
- применение вертикального армирования основания привело к равномерной передаче давления на грунтовый массив, которое не превышало расчетного сопротивления грунта распределительного и подстилающего слоев, снизило осадку плитного фундамента почти на 55%, обеспечило передачу нагрузки на слои грунта, расположенные глубже.

При расчете по рекомендациям и методу, предложенному В.Г. Федоровским и А.М. Карауловым, для наиболее неблагоприятных условий (скважины) установлено, что максимальная осадка фундаментной плиты не превышает 79 и 104 мм соответственно при максимальном расчетном усилии в свае до 500 кН.

Результаты всех расчетов сведены в таблицу 2. Результаты расчета в программах «GEO5-FEM» и «ING+2019» представлены на рисунках 4–6.

Таблица 2. – Основные результаты расчета фундамента на вертикально армированном основании различными методами

Метод расчета	Рассчитываемый показатель в методе			
	Осадка фундамента	Усилие в армоэлементе	Шаг армоэлементов	Эквивалентный модуль деформации
Практический метод по рекомендациям Р1.02.133-2014 [4]	79	***	1,9	20
Практический метод, разработанный В.Г. Федоровским, С.Г. Безволевым, А.М. Карауловым [5; 6]	104	497	2**	***
Метод конечных элементов: – в программе «GEO5-FEM» – в программе «ING+2019»	81 (95) 72 (84)*	475–525	1,8**	25

*Примечание.* Приняты следующие обозначения:

\* – расчет выполнен по эквивалентному модулю деформации;

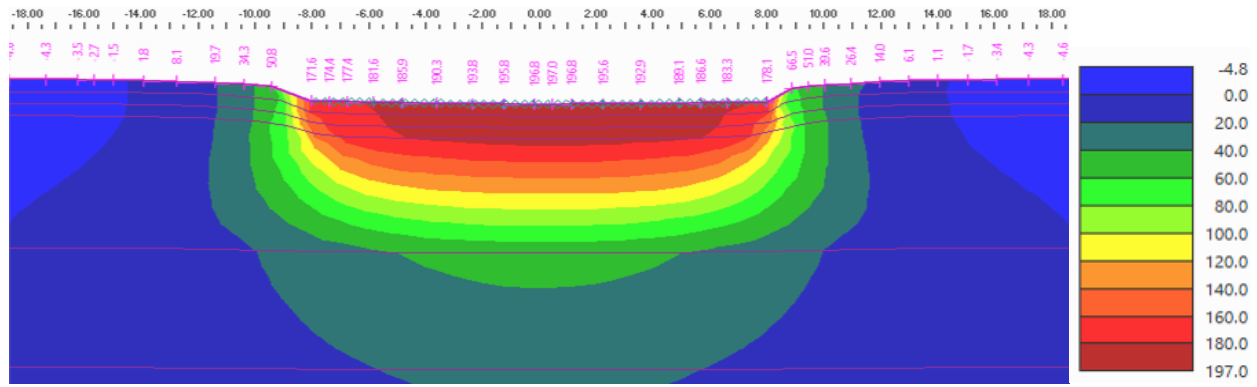
\*\* – назначен шаг армоэлементов в методе;

\*\*\* – показатель в методе не определяется;

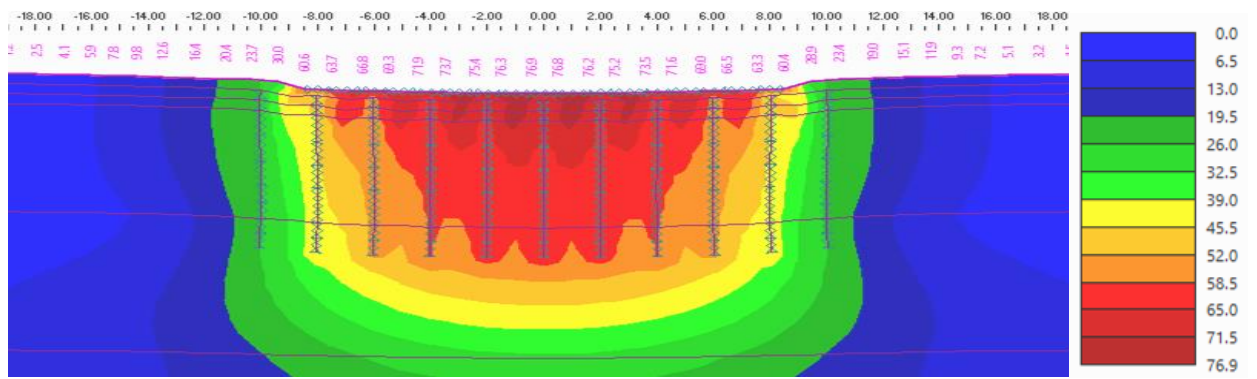
значение в скобках – для участка плиты без вертикального армирования.

Для контроля качества работ в дополнение к стандартным методам контроля (определение отказа забивных свай, контроль коэффициента уплотнения отсыпаемого грунта) проектом были запланированы три опытных полевых испытания геомассива и одно опытное полевое испытание естественного основания в месте отсутствия геомассива. Испытания выполняли через распределительный слой большеразмерным железобетонным штампом размером 3,00×1,75 м, который загружался ступенчато возрастающей статической вдавливающей вертикальной нагрузкой до достижения давления под штампом в 250 кПа. Результаты испытаний представлены на рисунке 7.

В результате проведенных штамповых испытаний был определен эквивалентный модуль деформаций грунтов с вертикальным армированием, который составил 35–45 МПа, что превысило проектное значение.



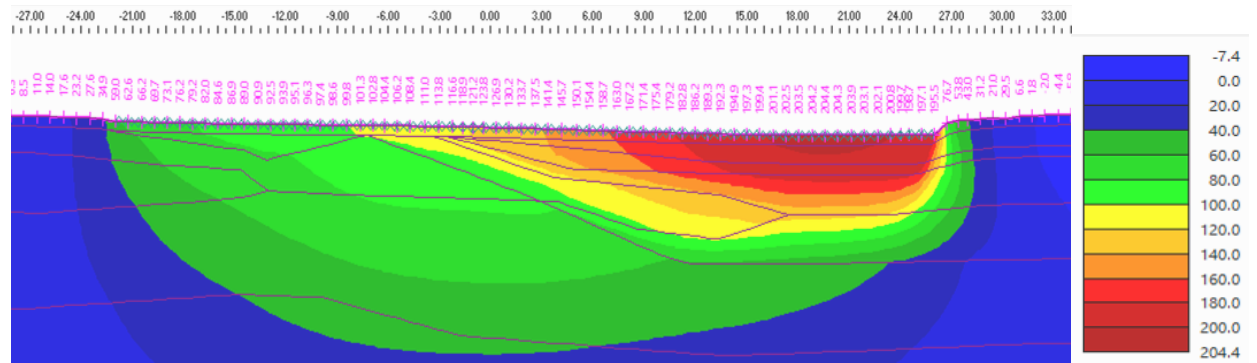
**a**



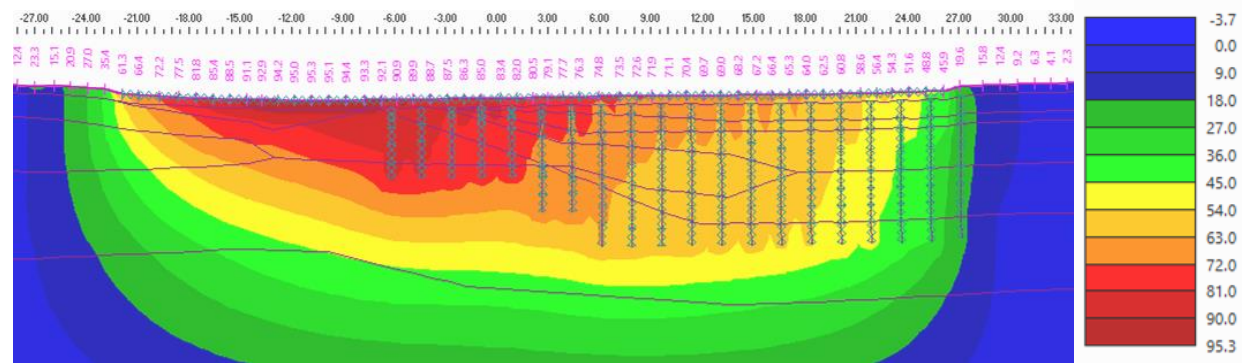
**б**

**a** – на естественном основании (максимальная осадка 197 мм);  
**б** – на усиленном вертикальным армированием основании (максимальная осадка 77 мм)

**Рисунок 4. – Осадка фундамента по скважине 15 в программе «GEO5-FEM»**



**a**



**б**

**a** – на естественном основании (максимальная осадка 204 мм);  
**б** – на усиленном вертикальным армированием основании (в зоне без свай максимальная осадка 95 мм; в зоне свай длиной 8 м максимальная осадка 81 мм)

**Рисунок 5. – Осадка фундамента для продольного разреза в программе «GEO5-FEM»**



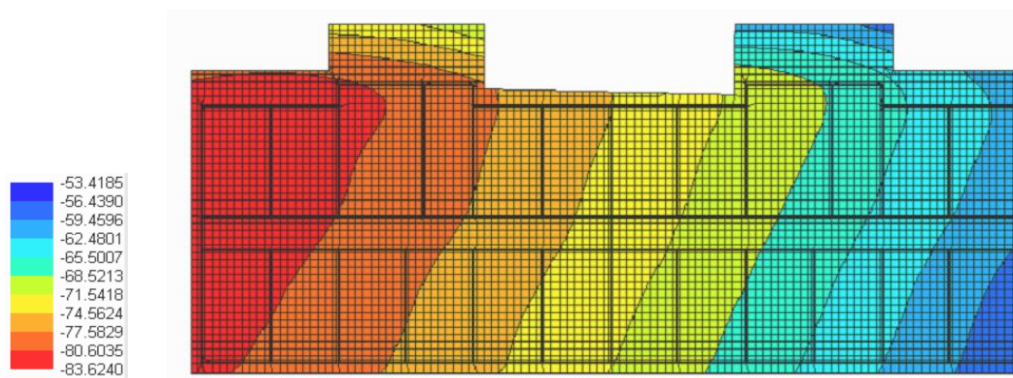
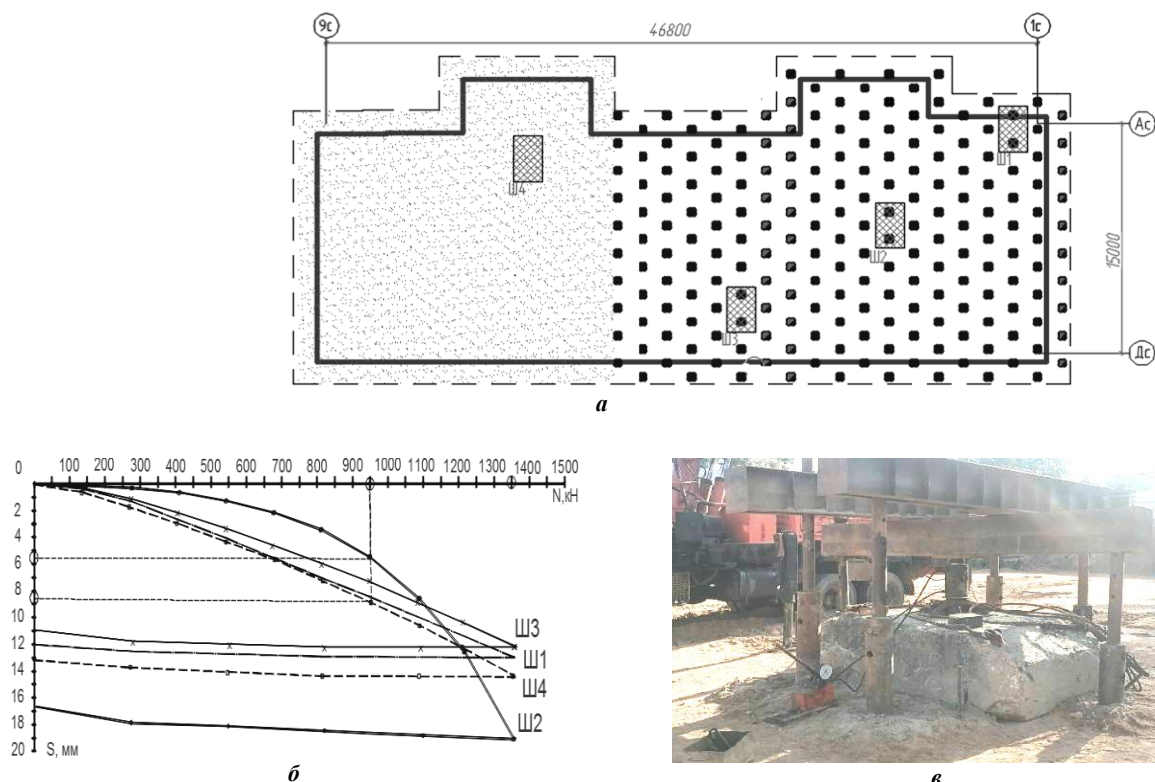


Рисунок 6. – Осадка фундамента на искусственном основании в программе «ING+2019»  
(в зоне без свай максимальная осадка 84 мм, в зоне свай длиной 8 м максимальная осадка 72 мм)



*а* – схема искусственного основания с размещением опытных штампов;  
*б* – графики штамповых испытаний Ш1–Ш4;  
*в* – общий вид проводимых штамповых испытаний

Рисунок 7. – Контрольные штамповые испытания вертикально армированного основания

**Заключение.** С учетом полученных результатов по окончательному проектному решению под частью сплошного плитного фундамента одиннадцатизэтажного двухсекционного жилого крупнопанельного дома было принято вертикальное армирование слабых грунтов забивными сваями длиной от 4 до 8 м, а под оставшейся частью фундамента – замена слабого грунта на уплотненную песчаную смесь. Дополнительно под всей плитой предусмотрен распределительный слой из уплотненной песчано-гравийной смеси мощностью 500 мм. Это обеспечит равномерную расчетную осадку здания, не превышающую допустимых нормами значений. Эффективность принятого решения подтверждена результатами расчетов методом конечных элементов в программах «GEO5-FEM» и «ING+2019» и опытных полевых штамповых испытаний статической вдавливающей нагрузкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сернов В.А., Тронда Т.В. Применение геомассива при строительстве трех девятиэтажных жилых домов в г.п. Колодищи // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: сб. тр. XVIII Междунар. науч.-метод. семинара, Новополоцк, 28–29 нояб. 2012 г. / гл. ред.: Д.Н. Лазовский, А.А. Бакатович. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2012. – С. 286–292.

2. Кравцов В.Н., Якуненко С.А., Лапатин П.В. Исследование вертикально армированных оснований плитных фундаментов грунтобетонными микросваями и апробация их результатов в производственных условиях // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2015. – № 16. – С. 40–47.
3. Тронда Т.В., Сернов В.А. Натурное исследование основания, армированного цилиндрическими и коническими вертикальными элементами из сухой бетонной смеси // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. II Междунар. науч. конф., Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / гл. ред.: Л.М. Парфенова. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2019. – С. 47–51.
4. Федоровский В.Г., Безволев С.Г. Метод расчета свайных полей и вертикально армированных грунтовых массивов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1994. – № 3 – С. 11–15.
5. Караулов А.М. Решение одномерной задачи уплотнения вертикально армированного основания // Тр. НГАСУ. – 1998. – № 3(3). – С. 29–33.

## REFERENCES

1. Sernov, V.A. & Tronda, T.V. (2012). Primenenie geomassiva pri stroitel'stve trekh devyatiyazhnykh zhilykh domov v g.p. Kolodishchi. In D.N. Lazovskii (Eds.) & Bakatovich, A.A. (Eds). *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologii v stroitel'stve i podgotovke inzhenernykh kadrov v Respublike Belarus'*: sb. tr. XVIII Mezhdunar. nauch.-metod. seminar (286–292). Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ).
2. Kravtsov, V.N, Yakunenko, S.A. & Lapatin, P.V. (2015). Issledovanie vertikal'no armirovannykh osnovanii plitnykh fundamentov gruntobetonnymi mikrosvayami i aprobatsiya ikh rezul'tatov v proizvodstvennykh usloviyakh [Research of Vertical Reinforced by Soil-concrete Micropiles Slab Foundations Ground Bases and Testing Results in Industrial Practice]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Vestnik of Polotsk State University, Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (16), 40–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Tronda, T.V. & Sernov, V.A. (2019). Naturnoe issledovanie osnovaniya, armirovannogo tsilindricheskimi i konicheskimi vertikal'nymi elementami iz sukhoy betonnoi smesi [In-situ Research of Foundation Soils Reinforced with Cylindrical and Conical Vertical Elements of Dry Concrete]. In L.M. Parfenova (Eds.) *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii: elektronnyi sb. statei II Mezhdunar. nauch. konf.* (47–51). Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Fedorovskii, V.G. & Bezvolev, S.G. (1994). Metod rascheta svainykh polei i vertikal'no armirovannykh gruntovykh massivov. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov.* (3), 11–15. (In Russ).
5. Karaulov, A.M. (1998). Reshenie odnomernoi zadachi uplotneniya vertikal'no armirovannogo osnovaniya. *Tr. NGASU*, 3(3), 29–33. (In Russ).

*Поступила 15.05.2024*

**THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF VERTICAL REINFORCEMENT OF A WEAK BASE FOR THE DEVICE OF A SOLID FOUNDATION SLAB OF THE BUILDING**

*A. NEVEJKOV<sup>1</sup>, V. DEDOK<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Belarusian State University of Transport, Gomel,*

*<sup>2</sup> Brest State Technical University)*

*The article is devoted to the vertically reinforced basement designing and constructing problems while slab foundation erection in the Republic of Belarus.*

**Keywords:** *weak basement, basement vertical reinforcement, driven pile, finite element method, foundation settlement.*

УДК 666.97.035:691.32

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-59-63

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЕТОНА НА ТОЧНОСТЬ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЕГО ТВЕРДЕНИЯ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

канд. техн. наук, доц. А.М. НИЯКОВСКИЙ<sup>1)</sup>, А.А. КОРШУН<sup>2)</sup>, А.Д. МИЛОЧКИНА<sup>3)</sup>  
(<sup>1)-3)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)  
<sup>1)</sup> ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5106-6278>

На основании анализа литературных источников и собственных исследований определены пределы изменения удельной теплоемкости и теплопроводности бетонов в процессе осуществления их тепловой обработки в теплотехнологических установках. Установлено влияние на величины этих теплофизических показателей температуры, поддерживаемой в процессе тепловой обработки, и достигаемой в результате прогресса степени гидратации. Сделан вывод об определяющем влиянии изменения теплопроводности бетона в процессе его тепловой обработки (по сравнению с удельной теплоемкостью) на результаты аналитических и численных расчетов режимов тепловой обработки.

**Ключевые слова:** тепловая обработка бетона, теплопроводность, удельная теплоемкость, математическое моделирование твердения бетона, сравнительный анализ.

**Введение.** Вопрос о полноте учета различных технологических и рецептурных факторов в процессе исследования механизмов твердения бетона при его тепловой обработке (ТО) в теплотехнологических установках (ТТУ) не решен окончательно и является дискуссионным. В частности, в работе [1] при анализе результатов исследований, представленных в [2], указывается, что практический интерес для построения моделей ускоренной гидратации имеют лишь такие важнейшие факторы, как температура, время твердения и состав активной части цементного клинкера. Влияние других факторов для заданного вида и класса бетона, по мнению, высказанному в [1], предопределено его рецептурой и нормативными документами.

В работе [3] утверждается, что исходя из производственного опыта, определяющее влияние на твердение бетона оказывают его температура, степень гидратации и водоцементное отношение, а остальные факторы мало значимы или могут быть стабилизированы. В [4] указывается, что существенными являются те факторы, которые определяют формирование температурных полей в бетоне, то есть его теплопроводность, плотность, теплоемкость, а также водоцементное отношение и состав активной части цементного клинкера, который влияет на мощность тепловыделений при гидратации.

Сведения о кинетике тепловыделений важны для определения степени гидратации бетона в процессе твердения, которая зависит от множества факторов, таких как активность и минералогический состав цемента, тонкость помола компонентов, начальное водоцементное отношение, наличие добавок, однородность и начальная температура бетонной смеси, влажностные условия, время твердения, температура процесса [2; 5–10]. Определяющее значение на протекание реакции гидратации имеют удельная теплоемкость и теплопроводность бетонной смеси.

Цель данной работы состоит в анализе степени влияния удельной теплоемкости и теплопроводности бетона на гидратацию активной части цементного клинкера при тепловой обработке бетона в теплотехнологических установках.

Объект исследования: процессы гидратации в теплотехнологических установках для тепловой обработки бетонных изделий.

Предмет исследования: теплофизические характеристики бетона в процессе его тепловой обработки.

**Основная часть.** Одной из главных характеристик физико-химических превращений, имеющих место при структурообразовании и твердении бетонных смесей, является кинетика гидратации, прямым образом связанная с кинетикой тепловыделений, обусловленных экзотермией цемента [11; 12]. Ее величина должна учитываться при составлении теплового баланса теплотехнологических установок для ТО бетона.

В общем случае полный тепловой эффект гидратации цемента складывается из суммы следующих составляющих [13; 14], Дж:

$$q_{\text{полн.}} = q_{\text{см}} + q_{\text{кр}} + q_{\text{х}} + q_{\text{в}} + q_{\text{р}}, \quad (1)$$

где  $q_{\text{см}}$  – теплота адсорбции (смачивания) воды на исходной смеси, Дж;  
 $q_{\text{кр}}$  – теплота кристаллизации в процессе новообразований, Дж;  
 $q_{\text{х}}$  – теплота гидратации, обусловленная химической реакцией, Дж;  
 $q_{\text{в}}$  – теплота адсорбции воды продуктами новообразований, Дж;  
 $q_{\text{р}}$  – теплота растворения минералов, составляющих цемент, в воде, Дж.

При этом на долю химической составляющей  $q_x$ , вызванной протеканием реакции гидратации, приходится 80% всего количества теплоты, выделяющейся при твердении бетона [13]. Кинетика указанной реакции напрямую связана с основными теплофизическими свойствами твердеющего бетона: удельной теплоемкостью и теплопроводностью.

Удельная теплоемкость бетона не является постоянной величиной в процессе гидратации. Некоторые исследователи, например, Шуттер (De Schutter) с соавторами, Рейнхард (Reinhardt) и Хансен (Hansen) с соавторами, установили, что удельная теплоемкость бетона уменьшается с течением времени твердения [4; 15]. Снижение оказалось зависящим линейно от степени гидратации или логарифма времени. Однако относительно величины этого уменьшения (а оно варьируется от 1% до 20%) единого мнения нет. Типичное значение конкретной удельной теплоемкости тяжелых бетонов различных видов и марок находится в пределах между 800 и 1200 Дж/(кг·К) [4; 5; 15; 16].

Удельная теплоемкость бетона с учетом пропорций смешиваемых компонентов, температуры и степени гидратации может быть определена на основании уравнения [4], кДж/(кг·°К):

$$c_p = \frac{1}{\rho} \left[ G_{ce} \cdot H_t \cdot (0,0084 \cdot t + 0,339) + G_{ce} \cdot (1 - \xi) \cdot C_{ce} + G_a \cdot C_a + G_w \cdot C_w \right], \quad (2)$$

где  $G_{ce}$ ,  $G_a$ ,  $G_w$  – удельные количества соответственно цемента, заполнителя и воды в расчете на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, (кг/м<sup>3</sup>);

$C_a$ ,  $C_{ce}$ ,  $C_w$  – удельная теплоемкость соответственно заполнителя, цемента и воды, кДж/(кг·°К);

$t$  – фактическая температура изделия, °С;

$H_t$  – степень гидратации цемента в бетоне (в долях от 1).

Степень гидратации цемента представляет собой отношение фактических тепловыделений за рассматриваемый период времени к максимально возможному тепловыделению<sup>1</sup> [1; 17–25] за весь период твердения бетонного изделия. В общем виде степень гидратации может быть определена следующим образом:

$$H_t = \frac{Q(\tau)}{Q_{\max}} = \frac{1}{Q_{\max}} \int_0^{\tau_{\text{зад}}} q(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где  $Q(\tau)$  – фактическое удельное тепловыделение, достигнутое в течение всей заданной продолжительности времени твердения, Дж/кг;

$\tau_{\text{зад}}$  – заданная продолжительность времени твердения, с;

$q(\tau)$  – удельная мощность тепловыделений цемента, Дж/(кг·с);

$Q_{\max}$  – предельно возможное удельное тепловыделение при гидратации, свойственное данному цементу при заданном водоцементном отношении, Дж/кг.

Расчеты, выполненные с использованием уравнения (2), показывают, что удельная теплоемкость бетона, обычно используемого при изготовлении железобетонных изделий, в процессе твердения увеличивается с ростом температуры и степени гидратации в среднем на 4,1% в пределах изменений указанных параметров соответственно от 20 °С до 85 °С и от 0,2 до 0,5.

Теплопроводность бетона определяется его минералогическим составом и характером компонентов бетонной смеси, содержанием воды, температурой, плотностью бетонного тела в сухом состоянии. По данным [26], значения коэффициентов теплопроводности по мере ТО уменьшаются приблизительно в три раза (однако этот вывод сделан для условий повышенного давления и температур выше 100 °С).

Хан (Khan) с соавторами исследовали теплопроводность бетона как в твердом (гидратированном), так и в созревающем состоянии при различных температурах и обнаружили, что теплопроводность по мере затвердевания бетона уменьшается с 1,723–1,740 до 1,17–1,14 Вт/(м·К) [4; 15]. В результате было установлено, что теплопроводность прогидратированного бетона на 33% ниже, чем созревающего. Эта тенденция подтверждена также в работах Шуттера (De Schutter) и Брауна (Brown) [17; 25]. Руйз (Ruiz) для вычисления текущего значения теплопроводности бетона в процессе его твердения предложил следующее уравнение [4], Вт/(м·К):

$$\lambda = \lambda_{\infty} (1,33 - 0,33 \cdot H_t), \quad (4)$$

где  $\lambda_{\infty}$  – теплопроводность бетона в полностью прогидратированном (сухом) состоянии, Вт/(м·К).

Расчеты с использованием уравнения (4) показывают, что теплопроводность бетона в процессе тепловой обработки и увеличения степени гидратации снижается в среднем на 24...25%.

<sup>1</sup> Соколов А.М. Научные основы процессов электротепловой обработки композиционных материалов в производстве конструкционного бетона: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13. – Иваново, 2012. – 38 с.

Таким образом, теплопроводность бетона в процессе твердения изменяется в шесть раз сильнее, чем его теплоемкость, что должно приниматься в расчет при моделировании процессов теплопереноса. Это также означает, что влиянием изменения теплоемкости в процессе ТО на результаты расчетов температурных полей и полей степени гидратации в бетонном изделии с использованием ранее разработанной нами методологии [27; 28; 29] можно пренебречь, так как это влияние находится в пределах погрешности рассматриваемой физико-математической модели.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что удельная теплоемкость тяжелого бетона, имеющего составы, используемые при изготовлении железобетонных изделий, в процессе твердения увеличивается с ростом температуры и степени гидратации в среднем на 4,1% при изменении температуры от 20 °С до 85 °С и степени гидратации от 0,2 до 0,5.

2. Показано, что теплопроводность бетона в процессе тепловой обработки изменяется в пределах от 1,723...1,740 до 1,17...1,14 Вт/(м°К). При этом изменение теплопроводности подчиняется линейному закону и является функцией степени гидратации. Теплопроводность бетона в процессе тепловой обработки снижается по мере роста степени гидратации в среднем на 24...25%.

3. Теплопроводность бетона в процессе твердения изменяется в шесть раз сильнее, чем его теплоемкость, что должно приниматься в расчет при моделировании процессов теплопереноса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование набора прочности бетоном при гидратации цемента / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, А.М. Ибрагимов и др. // Строит. материалы. – 2011. – № 11. – С. 38–41.
2. Бабицкий В.В., Семенюк С.Д., Бирик М.С. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжелого бетона // Ресурсекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. Вип. 18. – Рівне: НУВГП, 2009. – С. 3–12.
3. Математическая модель твердения бетона в условиях тепловой обработки заводов ЖБИ / Ю.Ю. Громов, О.Г. Иванова, А.В. Лагутин и др. // Вестн. ТГУ. – 2001. – Т. 6, вып. 3. – С. 344–345.
4. Ge Zh. Predicting temperature and strength development of the field concrete // Iowa State University Digital Repository. Civil, Construction and Environmental Engineering. – 2005. DOI: 10.31274/rtd-180813-15373.
5. Марьямов Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки). – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
6. Суходеев Н.В., Бабицкий В.В. Методика проектирования состава бетона // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 2(23). – С. 167–176.
7. Бирик М.С., Бабицкий В.В. Расчет энергосберегающих режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий // Керамика: наука и жизнь. – 2009. – № 3. – С. 17–26.
8. Бирик М.С., Суходоева Н.В., Бабицкий В.В. К возможности проектирования режима тепловой обработки бетона в ямных пропарочных камерах // Строит. наука и техника. – 2009. – № 2. – С. 58–63.
9. Бирик М.С., Бабицкий В.В. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий // Строит. наука и техника. – 2010. – № 4. – С. 55–59.
10. Дворкин О.Л. Проектирование составов бетона (основы теории и методологии). – Ровно: УДУВГП, 2003. – 265 с.
11. Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1971. – 229 с.
12. Заседателев И.Б., Шифрин С.А. Кинетика гидратации цемента при температурном воздействии на бетон // Бетон и железобетон. – 1976. – № 12. – С. 25–26.
13. Брунауэр С., Кантро Д.Л. Гидратация трехкальциевого силиката и β-двухкальциевого силиката в температурном интервале 5–50 °С // Химия цементов: сб. – М.: Изд. лит. по строительству, 1969. – С. 214–232.
14. Запорожец И.Д., Огороков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. – Л.: Стройиздат, 1967. – 317 с.
15. Khan A.A., Cook W.D., Mitchell D. Thermal properties and transient analysis of structural members during hydration // ACI Materials Journal. – 2002. – Vol. 95, № 3. – P. 293–302.
16. An experimental study on thermal conductivity of concrete / K.H. Kim, S.E. Jeon, J.K. Kim et al. // Cement and Concrete Research. – 2003. – Vol. 33, № 3. – P. 363–371. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00965-1.
17. De Schutter G., Taerwe L. General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement // Cement and Concrete Research. – 1995. – № 25(3). – P. 593–604.
18. Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения // Инженер.-строит. журн. – 2013. – № 3. – С. 36–42.
19. Oh B.H., Cha S.W. Nonlinear analysis of temperature and moisture distributions in early-age concrete structures based on degree of hydration // ACI Materials Journal. – 2002. – Vol. 100, № 5. – P. 361–370.
20. Schindler A.K., Folliard K.J. Heat of hydration models for cementitious materials // ACI Materials Journal. – 2005. – Vol. 102(1). – P. 24–33.
21. Блещик Н.П., Пратько Н.С., Рыскин М.Н. Математические модели кинетики гидратации цемента // Инженерные проблемы современного бетона и железобетона: Материалы III Междунар. конф. – Минск, 1997. – Т. 2. – С. 25–36.
22. Pane I., Hansen W. Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions // ACI Materials Journal. – 2002. – Vol. 99, № 6. – P. 534–542.
23. Modeling Hydration of Cementitious Systems / K.A. Riding, J.L. Poole, K.J. Folliard et al. // ACI Materials Journal. – 2012. – Vol. 109, № 2. – P. 225–234.
24. Schindler A.K., Folliard K.J. Heat of Hydration Models for Cementitious Materials // ACI Materials Journal. – 2006. – Vol. 102, № 1. – P. 24–33.

25. De Schutter G., Taerwe L. Degree of Hydration-Based Description of Mechanical Properties of Early-Age Concrete // *Materials and Structures*. – 1996. – Vol. 29, № 7. – P. 335–344.
26. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1979. – 144 с.
27. Нияковский А.М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трехмерного уравнения теплопроводности // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Приклад. науки*. – 2018. – № 16. – С. 72–79.
28. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А.М. Нияковский, В.Н. Романюк, А.Н. Чичко и др. // *Наука и техника*. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 137–145. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145.
29. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А.М. Нияковский, В.Н. Романюк, А.Н. Чичко и др. // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*. – 2019. – Т. 63, № 4. – С. 496–505. DOI: 10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505.

## REFERENCES

1. Fedosov, S.V., Bobylev, V.I., Ibragimov, A.M., Kozlova, V.K. & Sokolov, A.M. (2011). Modelirovanie nabora prochnosti betonom pri gidratatsii tsementa. *Stroitel'nye materialy*, (11), 38–41. (In Russ.).
2. Babitskii, V.V., Semenyuk, S.D. & Bibik, M.S. (2009). Prognozirovanie kharakteristik tverdeyushchego tyazhelogo betona. In *Resursoekonomnii materialy, konstruksii, budivli ta sporudi: zbirnik naukovikh prats'*. Vip. 18, (3–12). Rivne: NUVGP. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Gromov, Yu.Yu., Ivanova, O.G., Lagutin, A.V. & Lutkhon, T. (2001). Matematicheskaya model' tverdeniya betona v usloviyakh teplovoi obrabotki zavodov ZhBI. *Vestn. TGU*, 6(3), 344–345. (In Russ.).
4. Ge, Zh. (2005). Predicting temperature and strength development of the field concrete. *Iowa State University Digital Repository. Civil, Construction and Environmental Engineering*. DOI: 10.31274/rtd-180813-15373.
5. Mar'yamov, N.B. (1970). *Teplovaya obrabotka izdelii na zavodakh sbornogo zhelezobetona (protssy i ustanovki)*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
6. Sukhodeev, N.V. & Babitskii, V.V. (2009). Metodika proektirovaniya sostava betona [Technique of concrete structure designing]. *Vestn. Belarus.-Ros. un-ta*, 2(23), 167–176. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Bibik, M.S. & Babitskii, V.V. (2009). Raschet energosberegayushchikh rezhimov teplovoi obrabotki betonnykh i zhelezobetonnykh izdelii. *Keramika: nauka i zhizn'*, (3), 17–26. (In Russ.).
8. Bibik, M.S., Sukhodoeva, N.V. & Babitskii, V.V. (2009). K vozmozhnosti proektirovaniya rezhima teplovoi obrabotki betona v yamnykh proporoch-nykh kamerakh. *Stroit. nauka i tekhnika*, (2), 58–63. (In Russ.).
9. Bibik, M.S. & Babitskii, V.V. (2010). Ob energosberegayushchikh rezhimakh teplovoi obrabotki betonnykh i zhelezobetonnykh izdelii. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*, (4), 55–59. (In Russ.).
10. Dvorkin, O.L. (2003). *Proektirovanie sostavov betona (osnovy teorii i metodologii)*. Rovno: UDUVGP. (In Russ.).
11. Mchedlov-Petrosyan, O.P. (1971). *Khimiya neorganicheskikh stroitel'nykh materialov*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
12. Zasedatelev, I.B. & Shifrin, S.A. (1976). K inetika gidratatsii tsementa pri temperaturnom vozdeistvii na beton. *Beton i zhelezobeton*, (12), 25–26. (In Russ.).
13. Brunauer, S. & Kantro, D.L. (1969). Gidratatsiya trekhkal'tsievogo silikata i  $\beta$ -dvukhkal'tsievogo silikata v temperaturnom intervale 5–50 °C. In *Khimiya tsementov* (214–232). Moscow: Izd. lit. po stroitel'stvu. (In Russ.).
14. Zaporozhets, I.D. Okorokov, S.D. & Pariiskii, A.A. *Teplovydelenie betona*. Leningrad: Stroizdat. (In Russ.).
15. Khan, A.A., Cook, W.D. & Mitchell, D. (2002). Thermal properties and transient analysis of structural members during hydration. *ACI Materials Journal*, 95(3), 293–302.
16. Kim, K.H., Jeon, S.E., Kim, J.K. & Yang, S. (2003). An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 363–371. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00965-1.
17. De Schutter, G. & Taerwe, L. (1995). General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement. *Cement and Concrete Research*, 25(3), 593–604.
18. Adamtsevich, A.O., Pashkevich, S.A. & Pustovgar, A.P. (2013). Ispol'zovanie kalorimetrii dlya prognozirovaniya rosta prochnosti tsementnykh sistem uskorenogo tverdeniya [Application of calorimetry for prognosticating strength increase of fast-curing cement systems]. *Inzhener.-stroit. zhurn. [Magazine of Civil Engineering]*, (3), 36–42. (In Russ., abstr. in Engl.).
19. Oh, B.H. & Cha, S.W. (2002). Nonlinear analysis of temperature and moisture distributions in early-age concrete structures based on degree of hydration. *ACI Materials Journal*, 100(5), 361–370.
20. Schindler, A.K. & Folliard, K.J. (2005). Heat of hydration models for cementitious materials. *ACI Materials Journal*, 102(1), 24–33.
21. Bleshchik, N.P., Prat'ko, N.S. & Ryskin, M.N. (1997). Matematicheskie modeli kinetiki gidratatsii tsementa. In *Inzhenernye problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: Materialy III Mezhdunar. konf. T. 2* (25–36). Minsk. (In Russ.).
22. Pane, I. & Hansen, W. (2002). Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions. *ACI Materials Journal*, 99(6), 534–542.
23. Riding, K.A., Poole, J.L., Folliard, K.J., Juenger, M.C.G. & Schindler, A.K. (2012). Modeling Hydration of Cementitious Systems. *ACI Materials Journal*, 102(1), 24–33.
24. Schindler, A.K. & Folliard, K.J. (2006). Heat of Hydration Models for Cementitious Materials. *ACI Materials Journal*, 102(1), 24–33.
25. De Schutter, G. & Taerwe, L. (1996). Degree of Hydration-Based Description of Mechanical Properties of Early-Age Concrete. *Materials and Structures*, 29(7), 335–344.
26. Sizov, V.P. (1979). *Proektirovanie sostavov tyazhelogo betona*. Moscow: Stroizdat.
27. Niyakovskii, A.M. (2018). Razrabotka matematicheskoi modeli protsessa tverdeniya betona na osnove trekhmernogo uravneniya teploprovodnosti [Development of a Concrete Hardening Process Mathematical Model Based on a Three-dimensional Heat Equation]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied sciences]*, (16), 72–79. (In Russ., abstr. in Engl.).

28. Niyakovskii, A.M., Romanyuk, V.N., Chichko, A.N. & Yatskevich, Yu.V. (2019). Verifikatsiya nestatsionarnoi matematicheskoi modeli tverdeniya betona v teplotekhnologicheskikh ustanovkakh [Verification of Non-Stationary Mathematical Model of Concrete Hardening in Thermal Technological Installations]. *Nauka i tekhnika*, 18(2), 137–145. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145 (In Russ.).
29. Niyakovskii, A.M., Romanyuk, V.N., Chichko, A.N. & Yatskevich, Yu.V. (2019). Nestatsionarnaya model' protsessy gidratatsii zhelezobetonnoy izdeliya, nakhodyashchegosya v programmno-nagrevaemoy srede [Unsteady Model of the Hydration Process of a Reinforced Concrete Product at Software-Controlled Heating]. *Dokl. Nats. akad. nauk Belarusi*, 63(4), 496–505. DOI: 10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505 (In Russ.).

Поступила 14.05.2024

**THE INFLUENCE OF CHANGES IN THE SPECIFIC HEAT CAPACITY AND THERMAL CONDUCTIVITY OF CONCRETE ON THE ACCURACY OF THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF ITS HARDENING IN THERMAL TECHNOLOGY INSTALLATIONS**

**A. NIYAKOVSKII, A. KORSHUN, A. MILOCHKINA**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*Based on the analysis of literary sources and our own research, the limits of changes in the specific heat capacity and thermal conductivity of concrete during their heat treatment in thermal technology installations have been determined. The influence of the temperature maintained during the heat treatment and the degree of hydration achieved as a result of heating on the values of these thermophysical parameters has been established. The conclusion is made about the determining effect of changes in the thermal conductivity of concrete during its heat treatment (compared with the specific heat capacity) on the results of analytical and numerical calculations of heat treatment modes.*

**Keywords:** *heat treatment of concrete, thermal conductivity, specific heat, mathematical modeling of concrete hardening, comparative analysis.*

УДК 628.11(628.16)

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-64-71

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

**Е.И. РАШКЕВИЧ**(Витебское областное коммунальное унитарное предприятие  
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»)  
selenaruko@gmail.com

*В статье рассмотрены пути определения расчетных параметров при использовании метода внутрипластовой обработки воды для малых объемов водопотребления. Полученные экспериментальные данные подтверждают правильность таких подходов и могут быть рекомендованы для предварительных расчетов и оценки эффективности этого метода.*

**Ключевые слова:** константа скорости окисления железа, предельная адсорбционная емкость пород по отношению к кислороду, продолжительность защитного периода откачки воды из скважины, экспериментальные данные, оценка эффективности метода.

**Введение.** Водоснабжение населенных пунктов в Республике Беларусь осуществляется подземной водой. Для сельских населенных пунктов, включая агрогородки, особенностью систем водоснабжения является сравнительно небольшое водопотребление 40–300 м<sup>3</sup>/сут, причем с резко изменяющимся расходом по часам суток. Практически на всей территории республики отмечается присутствие железа и его соединений в составе подземных вод, что часто является основной задачей при их очистке.

УП «Витебскоблводоканал» ведутся исследования по использованию для водоочистки подземных вод малых населенных пунктов метода обезжелезивания воды непосредственно в водоносном пласте скважин in-situ в исполнении системы Subterra. Сущность метода состоит в том, что в каждой отдельной скважине, непосредственно внутри водоносного пласта, происходят все стадии процесса обработки подземных вод [1–4]. Вначале осуществляется закачка обогащенной кислородом воздуха воды непосредственно в водоносный слой. После закрепления кислорода воздуха на породах пласта (их «зарядка») и создания внутрипластовой зоны окисления железа производится откачка воды из скважины в водопроводную сеть.

Г.М. Коммунаром в 80-х годах прошлого столетия была разработана математическая модель процессов, происходящих при применении данного метода. Эта модель описана в [4, глава 21], но в ней не приводится ряд существенных промежуточных выкладок, а определение входящих в нее неизвестных параметров производится на основе экспериментальных данных с использованием достаточно искусственного графоаналитического метода, что затрудняет ее практическое использование.

Поэтому был разработан другой путь решения поставленной задачи [5; 6], где предложен для определения входящих в нее неизвестных параметров на основе экспериментальных данных вместо графоаналитического метода регрессионный подход, допускающий программную реализацию, что позволяет обосновать методику расчета внутрипластовой обработки подземных вод in-situ для водоснабжения малых населенных пунктов.

На основе данных по мощности и характеристике водоносных песчаных слоев, предполагаемой концентрации кислорода в закачиваемой воде в скважину и ее объема, производительности системы водоснабжения и исходного состава подземной воды появляется возможность предварительно определить основные параметры рассматриваемого метода с получением конечного результата – продолжительности защитного периода откачки воды в водопроводную сеть и коэффициента полезности, представляющего собой отношение объемов откаченной и закаченной воды в скважине.

**Цель работы.** На основании получения и анализа математической модели удаления железа при внутрипластовой обработке подземных вод [5; 6] предложить пути определения основных расчетных величин и в процессе «зарядки» кислородом водовмещающих пород, а именно:

- константа скорости окисления железа  $\sigma_{Fe^{2+}}$ , (мг ч/дм<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>;
- независимая вспомогательная величина  $\xi$  для определения предельной адсорбционной емкости пород

по отношению к кислороду  $C_{O_2}^*$ ;

- продолжительность защитного периода откачки воды из скважины  $t_d$ , ч (сут).

**Определение величин**  $\sigma_{Fe^{2+}}$ ,  $\xi$  и  $t_d$ . Математическая модель удаления железа при внутрипластовой обработке подземных вод содержит две неизвестные величины  $\sigma_{Fe^{2+}}$  и  $C_{O_2}^*$ , которые в каждом конкретном случае должны быть определены на основе экспериментальных данных. Для величины  $C_{O_2}^*$  использование каких-либо справочных значений проблематично, так как она сильно зависит от внутреннего строения и химического состава



пород водоносного пласта и может отличаться друг от друга даже в близко расположенных скважинах. Но непосредственное определение предельной адсорбционной емкости пород по отношению к кислороду  $C_{O_2}^*$  по экспериментальным данным также затруднительно, поэтому более удобным для ее определения может быть введение вспомогательной величины  $\xi$  :

$$\xi = C_{O_{20}} \Gamma_{O_2} / (n_0 + \Gamma_{O_2}) = \frac{C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}}, \quad (1)$$

где  $C_{O_{20}}$  – начальная концентрация растворенного кислорода в закачиваемой воде в скважину, мг $O_2$ /дм $^3$ ;  
 $n_0$  – пористость водоносного пласта (объем пор в единице объема породы, безразмерная величина);  
 $\Gamma_{O_2}$  – константа адсорбции Генри, определяемая по формуле:

$$\Gamma_{O_2} = \frac{C_{\bar{O}_2}^*}{C_{O_{20}}}. \quad (2)$$

При вычислении величин  $\sigma_{Fe^{2+}}$  и  $\xi$  необходимо иметь ряд значений величины  $C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$ , которая представляет собой измеренную концентрацию двухвалентного железа в откачиваемой воде на выходе из скважины, а также соответствующие значения объемов откачанной воды, либо (при постоянной интенсивности откачки) момент времени, в который данные концентрации измерены. Обработку этих данных предложено осуществлять с помощью графоаналитического метода [2], который оказался не только трудоемким, но и не допускающим программной реализации. В связи с этим представляется целесообразным заменить его подходом, основанным на построении линейной регрессии.

В найденном решении [1], фиксируя значение независимой переменной  $r = r_0$ , получим концентрацию двухвалентного железа на выходе из скважины, в которую производится закачка воды, обогащенной кислородом воздуха:

$$\frac{C_{Fe^{2+}}(t, r_0)}{C_{Fe_0^{2+}}} = \frac{e^{T_0}}{e^{X_0} + e^{T_0} - 1} = \frac{1}{(e^{X_0} - 1)e^{-T_0} + 1}, \quad (3)$$

где величины  $T_0$  и  $X_0$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} T_0 &= \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}} \left( t - t^* - \frac{n_0}{2q_0} (R_0^2 - r_0^2) \right); \\ X_0 &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{2q_0} (R_0^2 - r_0^2). \end{aligned} \quad (4)$$

В этих формулах:

$B$  – массовое количество кислорода (мг) для окисления 1 мг железа, равно 0,143;

$R_0$  – радиус цилиндра, в котором происходит равномерное распределение кислорода по водоносному пласту при конечном объеме закачки в него воды (радиус фронта адсорбции), м;

$C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$  – радиус скважины, м;

$C_{Fe_0^{2+}}$  – начальная концентрация двухвалентного железа, мг/дм $^3$ .

По определению имеем:

$$R_0^2 = r_0^2 + 2q_3 t_3 / (n_0 + \Gamma_{O_2}), \quad (5)$$

откуда находим разность квадратов:

$$R_0^2 - r_0^2 = 2q_3 t_3 / (n_0 + \Gamma_{O_2}). \quad (6)$$

Подставим это значение разности в выражения для  $X_0$ :

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{2q_0} (2q_3 t_3 / (n_0 + \Gamma_{O_2})) = \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}} \cdot \frac{q_3}{q_0} t_3 = \\ &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}} \cdot \frac{Q_3 t_3}{Q_0} = \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}} t^*, \end{aligned} \quad (7)$$

В этих формулах использованы следующие обозначения:

$$q_3 = Q_3 / 2\pi M; \quad q_0 = Q_0 / 2\pi M; \quad t_0^* = Q_3 t_3 / Q_0,$$

где  $Q_3$  и  $Q_0$  – расходы при закачке и откачке воды в скважине, м<sup>3</sup>/ч;

$t_3$  и  $t_0$  – продолжительность закачки и откачки;

$t^*$  – продолжительность, за которую частицы воды в процессе откачки проходят путь от радиуса фронта адсорбции  $r_f^*$  в момент времени  $t$  до максимального его значения  $R_0$ , численно равная максимальному значению величины  $t_3$ , ч;

$t^{**}$  – продолжительность, в течение которой (в случае мгновенной адсорбции кислорода) при откачке будет отобрана вся вода с концентрацией кислорода, равной начальной концентрации  $C_{O_2}$ , численно равная максимальному значению величины  $t_0$ , ч;

$M$  – мощность пласта, м.

Далее подставим найденное значение разности квадратов в выражения для  $T_0$ :

$$\begin{aligned} \frac{T_0}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}}} &= t - t^* - \frac{n_0}{2q_0} \cdot \frac{2q_3 t_3}{n_0 + \Gamma_{O_2}} = t - t^* - \frac{n_0}{n_0 + \Gamma_{O_2}} \cdot \frac{q_3 t_3}{q_0} = \\ &= t - t^* - \frac{n_0}{n_0 + \Gamma_{O_2}} \cdot \frac{Q_3 t_3}{Q_0} = t - t^* - \frac{n_0}{n_0 + \Gamma_{O_2}} t_0^* = t - t^* - t_0^{**} = t^* - t_0^*, \end{aligned} \quad (8)$$

где дополнительно использовано:

$$\begin{aligned} t_0^{**} &= t_0^* \frac{\Gamma_{O_2}}{n_0 + \Gamma_{O_2}}; \\ t^* &= Q_3 t_3 \Gamma_{O_2} / Q_0 (n_0 + \Gamma_{O_2}) = t_0^* \frac{\Gamma_{O_2}}{n_0}. \end{aligned}$$

В итоге имеем:

$$X_0 = \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}} t_0^* = \sigma_{Fe^{2+}} \xi t_0^*; \quad T_0 = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}} (t - t_0^*), \quad (9)$$

где принята независимая вспомогательная величина  $\xi$ :

$$\xi = \frac{C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}}. \quad (10)$$

Введем вспомогательную переменную величину  $Y$  на выходе из скважины  $r = r_0$ :

$$\begin{aligned} Y(t, r_0) &= \ln \left( \frac{C_{Fe_0^{2+}}}{C_{Fe^{2+}}(t, r_0)} - 1 \right) = \ln \left( (e^{X_0} - 1) e^{-T_0} + 1 - 1 \right) = \ln \left( (e^{X_0} - 1) e^{-T_0} \right) \\ &= \ln(e^{X_0} - 1) + \ln(e^{-T_0}) = \ln(e^{X_0} - 1) - T_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя сюда найденное значение  $T_0$ , получим:

$$Y(t, r_0) = \ln(e^{X_0} - 1) - T_0 = \ln(e^{X_0} - 1) - \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}} (t - t_0^*). \quad (12)$$

Таким образом, величина  $Y(t, r_0)$  линейно зависит от времени при условии, что  $C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$  удовлетворяет системе уравнений (1), (2) [1]. Естественно, измеренные значения  $C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$  содержат отклонения от такой зависимости, вызванные как погрешностями измерения, так и неполным соответствием между реальными условиями и предположениями модели. По общему правилу наибольшие искажения будут иметь место при малых значениях  $C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$ .

Вывод: начальный, наиболее зашумленный, отрезок данных на основе их предварительного анализа, который необходимо проводить в каждом конкретном случае, нужно отбросить.

Вычисляя линейную регрессию незашумленной части данных будем иметь:

$$Y(t, r_0) = a - b(t - t_0^*).$$

Тогда:

$$b = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}; \quad a = \ln(e^{X_0} - 1). \quad (13)$$

При больших значениях  $X_0$  (в [3] рекомендуется уже при  $X_0 > 3$ ) будет приближенно выполняться равенство:

$$a \approx X_0,$$

так как  $a \approx \ln(e^a + 1)$  при достаточно больших  $a$ . Если  $a > 3$ , то имеем  $0 < a - \ln(e^a - 1) < 0,052$ .

При известных значениях  $\beta$  и  $C_{Fe^{2+}}$  находим искомое выражение для  $\sigma_{Fe^{2+}}$ :

$$\sigma_{Fe^{2+}} \approx \frac{b}{\beta C_{Fe^{2+}}}. \quad (14)$$

Затем, имея в наличии величину  $\sigma_{Fe^{2+}}$  и соотношение (9), получим:

$$t_0^* = Q_3 t_3 / Q_0; \quad \sigma_{Fe^{2+}} \approx \frac{b}{\beta C_{Fe^{2+}}}; \quad X_0 = \ln(e^a + 1). \quad (15)$$

И в итоге определяем вспомогательную величину  $\xi$ :

$$\xi = \frac{X_0}{\sigma_{Fe^{2+}} t_0^*} = \frac{\ln(e^a + 1)}{\sigma_{Fe^{2+}} t_0^*}. \quad (16)$$

По найденной величине  $\xi$  определим из выражения (10) предельную адсорбционную емкость пород по отношению к кислороду  $C_{O_2}^*$ .

После того, как определены величины  $\sigma_{Fe^{2+}}$ ,  $\xi$  и  $C_{O_2}^*$ , можно вычислить продолжительность защитного периода  $t_D$  и коэффициент эффективности (полезности)  $K$ , что позволит выполнить оценку эффективности применения метода обезжелезивания воды непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ*.

**Вычисление продолжительности защитного периода  $t_D$ .** Коэффициент эффективности (полезности)  $K$  связан с величиной  $t_D$  равенством:

$$K = \frac{Q_0 t_D}{Q_3 t_3}. \quad (17)$$

Примем величину  $t_D$  как продолжительность достижения ПДК по общему железу в откачиваемой воде из скважины ( $0,3 \text{ мг/дм}^3$ ), тогда при  $C_{Fe^{2+}}(t_D, r_0) = C_D$  получим на выходе из скважины:

$$\frac{C_D(t, r_0)}{C_{Fe^{2+}}} = \frac{e^{T_D}}{e^{X_0} + e^{T_D} - 1} = \frac{1}{(e^{X_0} - 1)e^{-T_D} + 1}, \quad (18)$$

где вспомогательная величина  $T_D$ :

$$T_D = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}} \left( t_D - t^* - \frac{n_0 (R_0^2 - r_0^2)}{2q_0} \right); \quad (19)$$

$C_D$  – нормативная концентрация железа в откачиваемой воде по СанПиН 10.124-99 РБ, равная  $0,3 \text{ мг/дм}^3$ , с фиксацией значения независимой переменной  $r = r_0$ , и последовательно имеем следующие равенства:

$$\begin{aligned} (e^{X_0} - 1)e^{-T_D} &= \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1; \\ e^{-T_D} &= \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right) (e^{X_0} - 1)^{-1}; \\ e^{T_D} &= \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right)^{-1} (e^{X_0} - 1), \end{aligned} \quad (20)$$

или после логарифмирования обеих частей:

$$T_D = \ln(e^{X_0} - 1) - \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right).$$

Ранее для величины  $T_0$  была получена формула (9), из которой в нашем случае при  $C_{Fe^{2+}} = C_D$ ,  $t = t_D$  имеем:

$$T_D = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}} (t_D - t_0^*),$$

откуда:

$$t_D = \frac{T_D}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} + t_0^*. \quad (21)$$

Подставив найденное выше значение  $T_D$ , окончательно имеем:

$$\begin{aligned} t_D &= \frac{\ln(e^{X_0} - 1) - \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right)}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} + t_0^* = \\ &= \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln(e^{X_0} - 1) - \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right) + t_0^*. \end{aligned} \quad (22)$$

Далее выполним анализ этого уравнения на два случая.

1. При больших значениях  $X_0$  ( $\geq 3$ ) имеем приближенное равенство:

$$X_0 \approx \ln(e^{X_0} - 1) = \sigma_{Fe^{2+}} \xi t_0^*$$

Поэтому:

$$\begin{aligned} t_D &= t_0^* + \frac{\xi}{\beta C_{Fe^{2+}}} t_0^* - \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right) = \\ &= \left( 1 + \frac{\xi}{\beta C_{Fe^{2+}}} \right) t_0^* - \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right) = A t_0^* - B, \end{aligned} \quad (22a)$$

где:

$$A = 1 + \frac{\xi}{\beta C_{Fe^{2+}}}; \quad B = \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right),$$

что совпадает с соответствующими формулами (1), (3).

2. Если  $X_0$  невелико, то имеем только формулу вида:

$$t_D = t_0^* + \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( e^{\sigma_{Fe^{2+}} \xi t_0^*} - 1 \right) - \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right). \quad (22b)$$

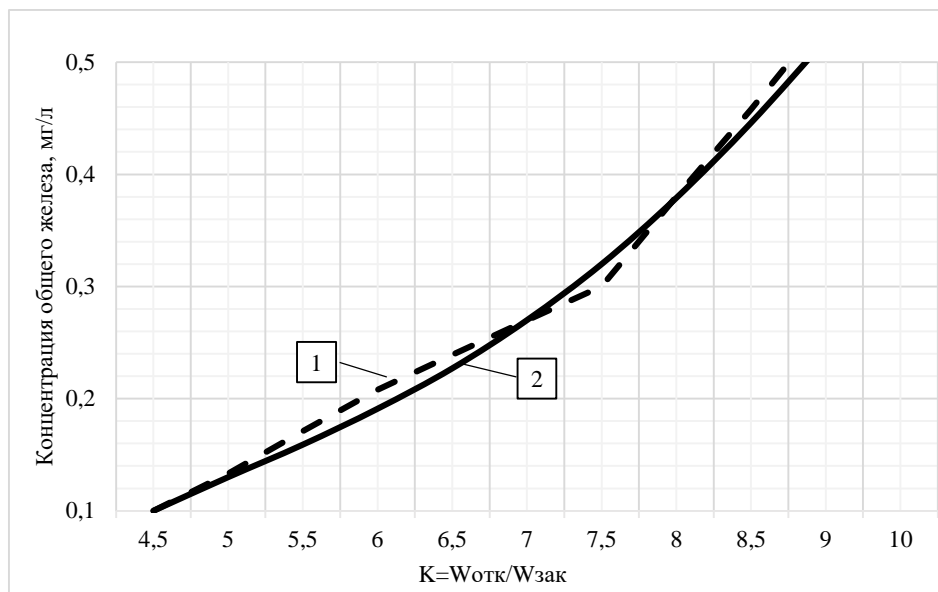
**Экспериментальные исследования.** Исследования по внутрипластовой обработке подземных вод проводились на скважинах малого населенного пункта (Докшицкий район, Витебская область). Суточная производительность водопотребления составила до 50 м<sup>3</sup>/сут. Начальная концентрация кислорода в закачиваемой воде была равна 7 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Водоносный слой состоял из смеси пылевидных и мелко-среднезернистых полиминеральных кварцево-полевошпатовых песков с эквивалентным диаметром 0,3 мм и пористостью порядка 0,32. Исходная концентрация железа составила порядка 3 мг/дм<sup>3</sup>. Попыты по откачке воды из скважин проводились до достижения концентрации железа в 0,5–0,6 мг/дм<sup>3</sup>. Объем закачки  $W_{зак}$  обогащенной кислородом воды в скважину был принят 100 и 300 м<sup>3</sup>, расход воды на всех стадиях процесса колебался в пределах 2,3–2,5 м<sup>3</sup>/ч. На основании проведенных исследований были получены экспериментальные данные по объему откаченной из скважины подземной воды  $W_{отк}$ . Для каждого случая проведено несколько циклов закачки-откачки. Средние показатели циклов представлены на рисунках 1 и 2.

После получения этих данных, исходя из исходных показателей, были произведены математические расчеты с использованием программ Excel и Maple по определению основных параметров применяемого метода очистки подземных вод.

В первом случае (закачка  $W_{зак} = 100$  м<sup>3</sup>), при остаточной концентрации железа до 0,3 мг/дм<sup>3</sup> в откаченной из скважины подземной воде, расчетные величины составили  $\sigma_{Fe^{2+}} = 0,21 \cdot 10^{-1}$  (мг ч/дм<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>,  $\xi = 5,206$  и в конечном итоге  $t_D = 307,94$  ч или  $W_{отк} = 728$  м<sup>3</sup> ( $K=7,28$ ) при фактическом объеме 752 м<sup>3</sup>. Ошибка в рассматриваемых объемах составила 3,5%, что меньше общепринятой величины в технических расчетах – 5%.

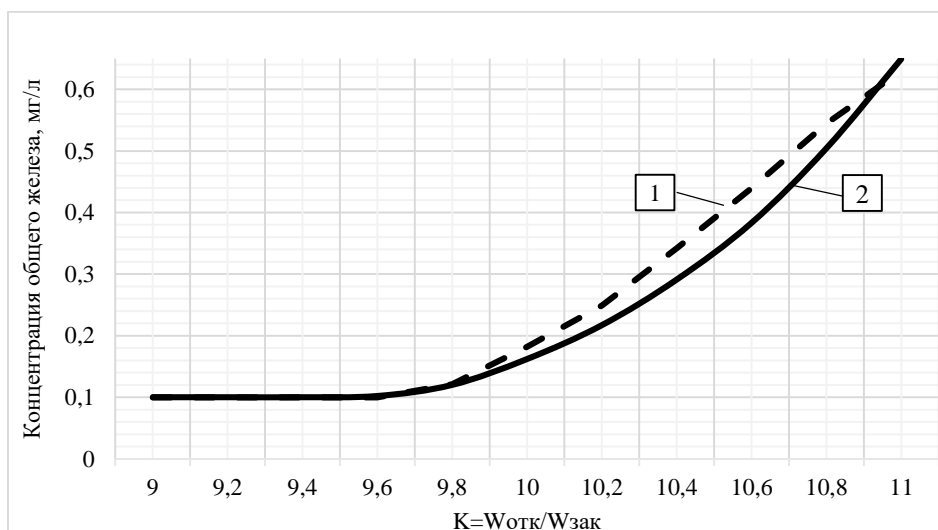
Аналогично для второго случая (закачка  $W_{зак} = 300$  м<sup>3</sup>):  $\sigma_{Fe^{2+}} = 0,306 \cdot 10^{-1}$  (мг ч/дм<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>,  $\xi = 4,63$  и в конечном итоге  $t_D = 1250,53$  ч или  $W_{отк} = 3120$  м<sup>3</sup> при фактическом объеме 3060 м<sup>3</sup>. Ошибка в рассматриваемых объемах составила 1,9%.

Следует отметить, что константа скорости окисления железа  $\sigma_{Fe^{2+}}$ , (мг ч/дм<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> увеличивается с ростом объема закаченной воды в скважину.



1 – экспериментальные данные; 2 – математические расчеты

Рисунок 1. – График зависимости изменения концентрации остаточного железа в откаченной из скважины подземной воде от коэффициента полезности внутрипластового метода при закачке в нее  $W_{зак} = 100 \text{ м}^3$



1 – экспериментальные данные; 2 – математические расчеты

Рисунок 2. – График зависимости изменения концентрации остаточного железа в откаченной из скважины подземной воде от коэффициента полезности внутрипластового метода при закачке в нее  $W_{зак} = 300 \text{ м}^3$

**Заключение.** Приведенные расчеты позволяют определить основные величины и выполнить оценку эффективности использования метода обработки подземных вод непосредственно в песчаных водоносных слоях для малых населенных пунктов.

Таким образом, при рассмотрении возможности применения данного метода для предварительно выбранного объекта малого водопотребления можно, используя исходные данные и задаваясь объемами закачки воды, выполнить расчет с определением в конечном итоге коэффициента его полезности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуринович А.Д., Ваврженюк П., Ельский И. Возможности удаления из воды железа в водоносном пласте на примере существующих водозаборных скважин // Вода и экология: проблемы и решения. – 2013. – Т. 2, № 54. – С. 12–20.
2. Ahmad M. Iron and manganese removal from groundwater. Geochemical modeling of the Vyredox method. – Oslo, 2012. – С. 101.
3. Кулаков В.В., Архипов Б.С., Козлов С.А. Методические рекомендации по опытно-технологическим исследованиям условий обезжелезивания и деманганации подземных вод в водоносном горизонте. – Хабаровск: Дальгеоцентр, 1999. – 61 с.
4. Плотников Н.А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. – М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.

5. Уточненная математическая модель «зарядки» кислородом водовмещающих пород в процессе внутрислоевого обработки подземных вод / Е.И. Рашкевич, В.Д. Ющенко, Е.К. Макаров и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2023. – № 2(34). – С. 38–46. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-38-46.
6. Математическая модель удаления железа в процессе внутрислоевого обработки подземных вод / Е.И. Рашкевич, В.Д. Ющенко, Е.К. Макаров и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2024. – № 1(36). – С. 2–13. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-36-1-2-13.
7. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений. – М.: УПСС, 2006. – 472 с.

## REFERENCES

1. Gurinovich, A.D., Vavrzhenyuk, P. & El'skii, I. (2013). Vozmozhnosti udaleniya iz vody zheleza v vodonosnom plaste na primere sushchestvuyushchikh vodozabornykh skvazhin [Technique of Water Deferrization in Water Bearing Bed by the Example of Existing Water Wells Water and Ecology]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya [Water and ecology: problems and solutions]*, 2(54), 12–20. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Ahmad, M. (2012). Iron and manganese removal from groundwater. *Geochemical modeling of the Vredox method*. Oslo.
3. Kulakov, V.V., Arkhipov, B.S. & Kozlov, S.A. (1999). *Metodicheskie rekomendatsii po opytno-tekhnologicheskimi issledovaniyami uslovii obezhelezivaniya i demanganatsii podzemnykh vod v vodonosnom gorizonte*. Khabarovsk: Dal'geotsentr. (In Russ.).
4. Plotnikov, N.A. (1990). *Proektirovanie i ekspluatatsiya vodozaborov podzemnykh vod*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
5. Rashkevich, E.I., Yushchenko, V.D., Makarov, E.K. & Demenchuk, A.K. (2023). Utochnennaya matematicheskaya model' «zaryadki» kislородом vodovmeshchayushchikh porod v protsesse vnutrisloevoy obrabotki podzemnykh vod [Analysis of the Mathematical Model of “Charging” Oxygen of Water-Bearing Rocks in the Process of in-situ Treatment of Groundwater]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences]*, 2(34), 38–46. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-38-46. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Rashkevich, E.I., Yushchenko, V.D., Makarov, E.K. & Demenchuk, A.K. (2024). Matematicheskaya model' udaleniya zheleza v protsesse vnutrisloevoy obrabotki podzemnykh vod [Mathematical Model of Iron Removal in the Process of in-situ Treatment of Groundwater]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Vestnik of Polotsk State University, Part F. Constructions. Applied Sciences]*, 1(36), 2–13. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-36-1-2-13. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Stepanov, V.V. (2006). *Kurs differentsial'nykh uravnenii*. Moscow: URSS. (In Russ.).

Поступила 26.05.2024

**DETERMINATION OF THE MAIN DESIGN PARAMETERS OF THE PROCESS  
OF IN-SITU GROUNDWATER TREATMENT AND ASSESSMENT  
OF THEIR EFFECTIVENESS FOR SMALL SETTLEMENTS**

**H. RASHKEVICH**

*(Vitebsk Regional Municipal Unitary Enterprise  
of water supply and sewage “Vitebskoblvodokanal”)*

*The article discusses ways to determine the design parameters when using the method of intra-layer water treatment for small volumes of water consumption. The experimental data obtained confirm the correctness of such approaches and can be recommended for preliminary calculations and evaluation of the effectiveness of this method.*

**Keywords:** *iron oxidation rate constant, the maximum adsorption capacity of rocks relative to oxygen, the duration of the protective period of pumping water from the well, experimental data, evaluation of the effectiveness of the method.*

## ГЕОДЕЗИЯ

UDC 528.48

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-72-77

MATRIX GENERALIZATION OF THE PROBLEM OF 3D COORDINATE TRANSFORMATION  
IN SATELLITE CONSTRUCTIONS

*PhD, associate prof. A. DEGTJAREV, E. DEGTJAREVA, M. VALOSHYNA*  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article considers the problem of generalizing the 3D Helmert transformation by 7 parameters and differential equations of the 1st and 2nd types of spheroidal geodesy. A formula is obtained in matrix form, which includes, as special cases, almost all types of coordinate transformations used in satellite geodesy, as well as several new types.

**Keywords:** spheroidal geodesy, seven parameter Helmert transformation, differential equations of the 1st and 2nd kind.

**Introduction.** When processing satellite measurements to fix a point in space, quite a lot of different coordinate systems (CS) are currently used. Obviously, the task of recalculating the coordinates of points from the current system to the system required by the customer is quite relevant. Recalculation of coordinates in satellite networks can be divided into Cartesian (Helmert-type models), geodetic (Molodensky-type models) and combination [1].

Recalculation of coordinates is divided into transformation - coordinate operations using exact formulas without changing the datum, and transformation - coordinate operations in which the elements of recalculation are obtained from previous calculations and imply (not necessarily) a change in the datum.

**Main part.** The basis for the spatial transformation of Cartesian coordinates is the well-known linear movements in space, which in the most general form are a composition of rotations around three coordinate axes, shifts along three coordinate axes and scaling along three coordinate axes. In geodesy it is used in the form of Helmert's conformal transformation (similarity transformation) in which the shape and angles between lines are preserved. In this case, the scales along the axes are the same. Then, during transformation, the Cartesian rectangular coordinates of point  $A(x, y, z)$  in CS  $A$ , goes to point  $B(x', y', z')$  in CS  $B$ , by rotating around 3 axes in space, shifting along 3 axes and the same scaling factor.

Rotations around the  $X$  axis by an angle  $\alpha$ , around the  $Y$  axis by an angle  $\beta$ , around the  $Z$  axis by an angle  $\gamma$  are determined, respectively, by rotation matrices in three-dimensional space  $R_x(\alpha)$ ,  $R_y(\beta)$ ,  $R_z(\gamma)$ . If we choose the Cartesian geocentric system as the spatial coordinate system, then two types of rotation are distinguished:

– *clockwise* rotations, when looking at the center of the coordinate system from the positive direction of the corresponding axis, are represented in matrix form as

$$\left. \begin{aligned}
 R_x(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c & s \\ 0 & -s & c \end{bmatrix}, \\
 R_y(\beta) &= \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 & -s \\ 0 & 1 & 0 \\ s & 0 & c \end{bmatrix},
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

around the  $X$  axis at an angle  $\alpha$ ,

around the  $Y$  axis at an angle  $\beta$ ,

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

around the  $Z$  axis at an angle  $\gamma$ .

This representation of rotation is called coordinate frame (CF) - rotation of a point and is taken by us as the main one.

– *counterclockwise* rotations, when looking at the center of the coordinate system from the positive direction of the corresponding axis, are represented in matrix form as



$$\left. \begin{aligned}
 & \text{around the } X \text{ axis at an angle } \alpha, \\
 & \text{around the } Y \text{ axis at an angle } \beta, \\
 & \text{around the } Z \text{ axis at an angle } \gamma.
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 R_X(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c & -s \\ 0 & s & c \end{bmatrix}, \\
 R_Y(\beta) &= \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 & s \\ 0 & 1 & 0 \\ -s & 0 & c \end{bmatrix}, \\
 R_Z(\gamma) &= \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -s & 0 \\ s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},
 \end{aligned} \quad (2)$$

around the  $Z$  axis at an angle  $\gamma$ .

This representation of rotation is called *vector position (VP) – vector rotation* [2].

Then the total rotation matrix  $R$  is usually assembled in the following two forms: Helmert rotation model of the 1st kind

$$R = R_{XZY}(\alpha\beta\gamma) = R_Z(\gamma) \cdot R_Y(\beta) \cdot R_X(\alpha); \quad (3)$$

$$R = R_{ZYX}(\gamma\beta\alpha) = R_X(\alpha) \cdot R_Y(\beta) \cdot R_Z(\gamma).$$

Helmert rotation model of the 2nd kind.

Scaling along the  $X$  axis is by the value  $m_x$ , along the  $Y$  axis is by the value  $m_y$ , along the  $Z$  axis by the value  $m_z$ . In matrix form it can be represented as

$$M = \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 \\ 0 & 0 & m_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Under the conformal Helmert transformation,  $m_x = m_y = m_z = m$ .

Translation along the  $X$  axis is by the value  $t_x$ , along the  $Y$  axis is by the value  $t_y$ , along the  $Z$  axis by the value  $t_z$ . In matrix form it can be represented as a vector

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

In its full form, the transformation of a point from system  $A$  to system  $B$  in matrix representation is as follows

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B = M \cdot R \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Transformations of this type are called complete spatial linear transformation, or 9-parameter transformation. Then the exact conformal Helmert transformation is as follows

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B = m \cdot R \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

If we multiply three partial rotations according to the first Helmert model in the form of a rotation of a point (the matrices rotate the point clockwise), and look from the positive end of the coordinate axis to the center of the CS, we obtain an expanded representation of the total rotation matrix  $R$  in the form

$$R = R_Z(\gamma) \cdot R_Y(\beta) \cdot R_X(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) & \cos(\beta) \cdot \sin(\gamma) & -\sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) - \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \\ \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) - \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

In geodetic practice, when transforming coordinate systems on the earth's surface, the angles of rotation are very small (up to 1–2 arc seconds), the scale  $m$  along the axes differs very little from one (of the order of several ppm). Then, considering that

- the sines of small angles are equal to the angle itself in radians;
- the cosines of small angles tend to one;
- the product of the sines of small angles – a very small angle, which is taken equal to zero;
- the product of cosines of small angles is taken equal to one;
- the second order of smallness when multiplied by small and identical scales is negligible;
- the scale factor  $m$  differs very slightly from one and can be represented as  $m = (1 + s)$ .

The transformation formula will take the form

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B &= (1+s) \cdot \begin{bmatrix} 1 & w_Z & -w_Y \\ -w_Z & 1 & w_X \\ w_Y & -w_X & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix} = \\ &= m \cdot R_1 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + t \rightarrow K_B = m \cdot R_1 \cdot K_A + t \end{aligned} \quad (9)$$

or without taking into account the second order of smallness in the non-diagonal terms of the matrix (not always acceptable in terms of accuracy)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B &= \begin{bmatrix} (1+s) & w_Z & -w_Y \\ -w_Z & (1+s) & w_X \\ w_Y & -w_X & (1+s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix} = \\ &= R_2 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + t \\ &= \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s & w_Z & -w_Y \\ -w_Z & s & w_X \\ w_Y & -w_X & s \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix} \rightarrow K_B = (E + R_3) \cdot K_A + t, \end{aligned} \quad (10)$$

which is called *the Bursch-Wolff-2 transformation model* [2]. Obviously, the values of angles  $w_i$  are expressed in radians. In the classical Bursch-Wolff-1 model, the signs in the rotation angles are reversed.

Such transformation often referred to the 7-parameter *Helmert* transformation is used most often in higher geodesy and satellite positioning. The reverse transformation of coordinate system  $B$  into coordinate system  $A$  is as follows

$$\begin{aligned} K_A &= \left( \frac{1}{m} \right) \cdot R_1^{-1} \cdot (K_B - t) = \\ &= (1-s) \cdot R_1^T \cdot K_B - t. \end{aligned} \quad (11)$$

The second expression in (11) does not take into account the second order of smallness when producing small numbers and can sometimes give unsatisfactory calculation accuracy.

Quite often in geodetic practice it is necessary to determine the coordinate increment from transformation

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A = K_B - K_A = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{AB} = \Delta K_{AB}. \quad (12)$$

Then from formulas (9) and (12) we have

$$\begin{aligned}
 K_B - K_A &= \Delta K_{AB} = \\
 &= m \cdot R_1 \cdot K_A + t - K_A = , \\
 &= (m \cdot R_1 - E) \cdot K_A + t
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

where  $E$  is the identity matrix of size  $3 \times 3$ .

When transforming geodetic coordinates, the coordinates of point  $A$ ,  $(B, L, H)_A$  on ellipsoid 1, go to point  $A'$ ,  $(B', L', H')_{A'}$  on ellipsoid 2 based on the increment of geodetic coordinates, as [1]

$$\begin{aligned}
 B' &= B + \Delta B; \\
 L' &= L + \Delta L; \\
 H' &= H + \Delta H.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

In the most general case, a problem of this kind is formulated as follows. On ellipsoid 1 there is a point with geodetic coordinates  $(B, L, H)$  in the coordinate system  $A$ . The value  $H$ , equal to the deviation of the point from the model ellipsoid along the normal, may be absent in the case when the point belongs to the ellipsoid,  $H = 0$ . Point 2 is obtained in relation to the first point by small rotations  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ , shift by vector  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , scaling  $m$  axes of the CS  $A$ , as well as changing the parameters of the ellipsoid when the point moves from ellipsoid 1 to ellipsoid 2. It is required to find the change in geodetic coordinates and the geodetic coordinates of point 2  $(B, L, H)$ . To solve the problem, we find the complete differentials of the equations of connection between geodetic coordinates  $(B, L, H)$  and geocentric Cartesian coordinates  $(x, y, z)$  on an ellipsoid with characteristics  $a, e^2$

$$\begin{cases}
 x = (N + H) \cdot \cos(B) \cdot \cos(L); \\
 y = (N + H) \cdot \cos(B) \cdot \sin(L); \\
 z = (N \cdot (1 - e^2) + H) \cdot \sin(B),
 \end{cases}$$

in all respects:  $B, L, H, a, e^2$

$$\begin{aligned}
 dx &= \frac{\partial X}{\partial B} \cdot dB + \frac{\partial X}{\partial L} \cdot dL + \frac{\partial X}{\partial H} \cdot dH + \frac{\partial X}{\partial a} \cdot da + \frac{\partial X}{\partial e^2} \cdot de^2; \\
 dy &= \frac{\partial Y}{\partial B} \cdot dB + \frac{\partial Y}{\partial L} \cdot dL + \frac{\partial Y}{\partial H} \cdot dH + \frac{\partial Y}{\partial a} \cdot da + \frac{\partial Y}{\partial e^2} \cdot de^2; \\
 dz &= \frac{\partial Z}{\partial B} \cdot dB + \frac{\partial Z}{\partial L} \cdot dL + \frac{\partial Z}{\partial H} \cdot dH + \frac{\partial Z}{\partial a} \cdot da + \frac{\partial Z}{\partial e^2} \cdot de^2,
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

which we will place in the table 1.

Table 1. – The complete differentials of the equations of connection between geodetic coordinates and geocentric Cartesian coordinates

derivatives by elements coordinates	$B$	$L$	$H$	$a$	$e^2$
$x = (N + H) \cdot \cos(B) \cdot \cos(L)$	$-(M + H) \cdot \sin(B) \cdot \cos(L)$	$-(N + H) \cdot \cos(B) \cdot \sin(L)$	$\cos(B) \cdot \cos(L)$	$\frac{N}{a} \cdot \cos(B) \cdot \cos(L)$	$k \cdot \cos(B) \cdot \cos(L)$
$y = (N + H) \cdot \cos(B) \cdot \sin(L)$	$-(M + H) \cdot \sin(B) \cdot \sin(L)$	$(N + H) \cdot \cos(B) \cdot \cos(L)$	$\cos(B) \cdot \sin(L)$	$\frac{N}{a} \cdot \cos(B) \cdot \sin(L)$	$k \cdot \cos(B) \cdot \sin(L)$
$z = (N \cdot (1 - e^2) + H) \cdot \sin(B)$	$(M + H) \cdot \cos(B)$	0	$\sin(B)$	$\frac{N}{a} \cdot (1 - e^2) \cdot \sin(B)$	$(k \cdot (1 - e^2) - N) \cdot \sin(B)$

Matrix A
Matrix B

$$k = \left( \frac{N^2}{a^2} - 1 \right) \cdot \frac{N}{2 \cdot e^2}$$

Considering the smallness of the measurements, we replace the differentials  $d$  with finite increments  $\Delta$ . Then the general form of the change in Cartesian coordinates  $\Delta D$  in matrix form will be

$$\Delta D = A \cdot \Delta G + B \cdot \Delta E, \quad (16)$$

where  $\Delta D = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$  – small changes in Cartesian rectangular coordinates;

$\Delta G = \begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta L \\ \Delta H \end{bmatrix}$  – small changes in geodetic coordinates;

$\Delta E = \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta e^2 \end{bmatrix}$  – small changes in the semi-major axis  $a$  of the ellipsoid and the second eccentricity  $e^2$  when moving from ellipsoid 1 to ellipsoid 2;

$$\Delta a = a_2 - a_1;$$

$$\Delta e^2 = e_2^2 - e_1^2.$$

Matrices  $A$  and  $B$  are from the table of derivatives of communication equations. It is sometimes convenient to represent matrix  $A$  in one of the following forms

$$A = \begin{bmatrix} -\sin(B) \cdot \cos(L) & -\sin(L) & \cos(B) \cdot \cos(L) \\ -\sin(B) \cdot \sin(L) & \cos(L) & \cos(B) \cdot \sin(L) \\ \cos(B) & 0 & \sin(B) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M + H & 0 & 0 \\ 0 & (N + H) \cdot \cos(B) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= R3z(\pi - L) \cdot R2y(\pi / 2 - B) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot T = A_0 \cdot T.$$

Now, let's equate the increments of coordinates, or their change  $\Delta D$  obtained on the basis of formulas (13) and (16). As a result, we have

$$\Delta D = A \cdot \Delta G + B \cdot \Delta E = (m \cdot R_1 - E) \cdot K_A + t, \quad (17)$$

a generalized system of equations, which includes all known transformations as special cases, and a number of new cases. To use it, you simply need to calculate the values of matrices  $A$  and  $B$  from (15) and table 1, and the value of matrix  $R_1$  from formula (9).

Let us consider the most used special cases of formula (17).

1. The classical Molodensky transformation (14) from CS  $A$  on ellipsoid 1 to CS  $B$  on ellipsoid 2 in geodetic coordinates can be represented as

$$\Delta G = A^{-1} \cdot (\Delta D - B \cdot \Delta E), \quad (18)$$

if the change in the ellipsoid  $\Delta E$  and the change in Cartesian coordinates are known  $\Delta D$ ;

$$\Delta G = A^{-1} \cdot ((m \cdot R_1 - E) \cdot K_A + t - B \cdot \Delta E), \quad (19)$$

if the change in the ellipsoid  $\Delta E$  and 7 Helmert parameters are known;

$$\Delta G = A^{-1} \cdot \Delta D, \quad (20)$$

if there is no transition to another ellipsoid and the change in Cartesian coordinates is known  $\Delta D$ ;

$$\Delta G = A^{-1} \cdot ((m \cdot R_1 - E) \cdot K_A + t), \quad (21)$$

if there is no transition to another ellipsoid and 7 Helmert parameters are known;

$$\Delta G = -A^{-1} \cdot B \cdot \Delta E, \quad (22)$$

unless there is a transition to another ellipsoid.

2. The change in Cartesian rectangular coordinates with known changes in geodetic coordinates on one ellipsoid will have the form

$$\Delta D = A \cdot \Delta G, \quad (23)$$

and when moving to another ellipsoid

$$\Delta D = B \cdot \Delta E. \quad (24)$$

It should be considered that changes in Cartesian coordinates must be on the order of ten meters, and in angular coordinates - on the order of 1–2 seconds, so that the formulas produce a fairly accurate result, since in essence they are differential. In satellite positioning practice, these conditions are generally met. If the changes are large enough, then you need to use a sequence of actions based on coordinate transformation to solve the problem.

It is not difficult to notice that the coefficient matrices in (17) are Jacobian matrices, which makes it possible to use the resulting formulas when adjusting geodetic constructions in different coordinate systems and when assessing the accuracy of transformation.

**Conclusion.** General formulas are obtained that makes it possible to obtain small changes in the parameters of one system when moving to another coordinate system in matrix form. Formulas can be used to calculate small shifts in a coordinate system, compile correction equations for adjustment, and evaluate accuracy when moving from one coordinate system to another.

#### REFERENCE

1. Morozov, V.P. (1979). *Kurs sferoidicheskoi geodezii (Izd. 2, pererab. i dop.)*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
2. Soler, T. (1976). On differential transformations between Cartesian and curvilinear (geodetic) coordinates. *Report number: Department of Geodetic Science*, (236).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии. – Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Недра, 1979. – 296 с.
2. Soler T. On differential transformations between Cartesian and curvilinear (geodetic) coordinates // Report number: Department of Geodetic Science. – January 1976. – Rep. № 236.

Поступила 06.05.2024

### МАТРИЧНОЕ ОБОБЩЕНИЕ ЗАДАЧИ 3D ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ КООРДИНАТ В СПУТНИКОВЫХ ПОСТРОЕНИЯХ

канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ, Е.В. ДЕГТЯРЕВА, М.В. ВОЛОШИНА  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье рассмотрена задача обобщения 3D трансформирования Гельмерта по 7 параметрам и дифференциальных уравнений 1 и 2 рода сфероидической геодезии. Получена формула в матричном виде, включающая в себя как частные случаи практически все виды трансформирования координат, используемые в спутниковой геодезии, а также несколько новых видов.

**Ключевые слова:** сфероидическая геодезия, 7 параметрическое преобразование Гельмерта, дифференциальные уравнения 1 и 2 рода.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОДКРАНОВЫХ ПУТЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРЯМЫМИ

канд. техн. наук К.И. МАРКОВИЧ,  
канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ,  
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*В статье представлены исследования по определению пространственного положения подкрановых путей мостовых кранов с использованием новейших геодезических электронных приборов вместо традиционных устройств, рекомендованных нормативными документами. Рассмотрены геометрические требования к кранам и подкрановым путям, факторы износа подкрановых рельсов, назначение допусков и их величина, геодезические работы при эксплуатации подкрановых путей. Рассмотрены методы получения оптимальных параметров геометрических систем для подкрановых путей мостовых кранов путем минимизации суммы квадратов смещений осей рельсов относительно двух параллельных прямых с дополнительным условием.*

**Ключевые слова:** мостовой кран, подкрановые пути, рельсы, ширина колеи, оптимальные параллельные прямые, метод наименьших квадратов.

**Введение.** Развитие мировой промышленности и ее глобальная диверсификация требуют совершенствования соответствующих технологий производственных процедур и процессов. Мостовые краны являются одним из наиболее распространенных средств перемещения элементов оборудования и продукции на промышленных предприятиях. Они предназначены для подъема и перемещения грузов в заданной зоне (пространстве) как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Под постоянным воздействием статических и динамических нагрузок, неравномерной осадки оснований, деформаций подкрановых конструкций и других факторов геометрия подкрановых путей нарушается. Поэтому для обеспечения безопасной и нормальной работы крана необходим систематический контроль геометрических параметров его ходовой части и подкрановых путей. Иначе это может приводить к остановке производства и экономическим потерям.

Для обеспечения безопасных условий эксплуатации кранов и подкрановых конструкций геометрическая форма подкрановых путей должна удовлетворять следующим требованиям:

- подкрановые балки должны быть параллельны и горизонтальны;
- рельсы должны быть параллельны, горизонтальны, прямолинейны и принадлежать одной плоскости;
- расстояние между осями рельсов (ширина колеи) должно соответствовать номинальному расстоянию между вертикальными осями ходовых колес крана, т.е. длине пролета крана [1].

Также при эксплуатации подкрановых путей в результате усилий от воздействия элементов крана на подкрановые конструкции и действия ряда других неблагоприятных факторов происходит износ рельсовых путей, ослабление крепежных узлов и деформации подкрановых конструкций, приводящие к отклонениям их геометрических параметров от проектного значения. Эти отклонения нарушают нормальную работу кранов и подкрановых конструкций. При движении крана по рельсовым путям, имеющим непараллельность и непрямолинейность рельсов, а также отклонения ширины колеи от проектного значения, изменяется направление движения крана. Реборды ходовых колес крана «набегают» на рельсы, вызывая боковые усилия, создающие сопротивление движению крана. Силовые воздействия ходовых колес крана, передаваемые через подкрановые балки на основные конструкции здания, снижают его эксплуатационные качества. При этом ускоряется износ рельсов и колес кранов, что вызывает дополнительные затраты на ремонтные работы. Существенные отклонения ширины колеи от номинального значения и непрямолинейность рельсов иногда являются причиной схода кранов с рельсов.

Отклонение геометрической формы подкрановых путей от идеальной задано допусками на их строительство, монтаж и эксплуатацию. Если во время эксплуатации превышает указанное значение этих допусков, необходимо выполнить рихтовку рельсов подкранового пути.

Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов<sup>1</sup> установлены предельные значения допустимых отклонений геометрических параметров подкрановых путей от проектных, не вызывающие существенных нарушений условий работы кранов и мало влияющие на траекторию их движения. Такие допуски указаны в таблице 1.

<sup>1</sup> Правила по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов (с изм. 2021) / М-во по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь. – Минск: Энергопресс, 2021. – 330 с.

Таблица 1. – Предельные величины отклонений рельсовых путей (в плане и профиле) от проектного

№ п/п	Допуски	Допустимое отклонение от проектного, мм
1	Разность отметок рельсов в одном поперечном сечении на опорах	40
2	Разность отметок рельсов на соседних колоннах	10
3	Сужение или уширение колеи рельсового пути	15
4	Взаимное смещение торцов стыкуемых рельсов в плане и по высоте	2
5	Зазоры в стыках рельсов (при температуре 0 °С и длине 12,5 м)	6

Для проверки соответствия геометрических параметров мостовых кранов и подкрановых путей требованиям «Правил...» должен быть предусмотрен систематический геодезический контроль планово-высотного положения рельсовых путей, геометрии моста и ходовых колес крана. Такой контроль производится путем специальных геодезических измерений, которые приходится выполнять в особенных условиях, присущих действующим цехам промышленных предприятий. Эти условия характеризуются высокой плотностью технологического оборудования, плохой освещенностью, вибрацией, большими перепадами температуры, сильными конвекционными потоками воздуха, расположением путей на высоте, наличием токопроводов вблизи рельсов и др.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на выбор и возможность осуществления той или иной методики геодезической съемки подкрановых путей, является их доступность для непосредственных измерений.

Геодезические работы на подкрановых путях включают следующие измерения [1; 2]:

- определение высотного положения подкрановых рельсов;
- определение планового положения осей рельсов;
- измерение смещения оси рельса с оси подкрановой балки и расстояния от оси рельсов до граней колонн;
- измерение расстояния между осями рельсов подкранового пути и осями колес мостовых кранов.

Помимо этого, следует производить дополнительные измерения, определяющие:

- размеры существующих подкладок и подливок под подкрановые балки;
- фактический пролет крана и величину перекоса крана;
- отклонение колонн от вертикали на уровне подкранового пути.

Необходимая точность измеряемых элементов требует совершенствования используемых методов и технологий. В настоящее время классический метод определения прямолинейности и нивелирования заменяется трехмерным полярным методом, основанным на использовании точных тахеометров. Применение полярного метода сокращает продолжительность необходимых операционных перерывов, но не устраняет их, а также не устраняет перемещение измерительного персонала по подкрановому пути.

Выбор системы отсчета, ее форма и положение по отношению к рельсам определяются отношениями в цехе (окружающей средой), где установлен кран (ограничения, связанные с производством, несущей конструкцией крана и т.д.). Обычно координаты точек, соответствующих элементам конструкции мостового крана, определяются в местной системе координат тахеометра с произвольно ориентированной осью  $x$ , от которой отсчитывается дирекционный угол  $\alpha$ . Эту систему координат можно рассматривать как внешнюю систему координат.

Перед выполнением измерений на подкрановых путях рельсы делятся на участки, определяются точки измерения, которые отмечают на верхней части рельса – в его центре – с помощью специального устройства типа «ножниц» и центрального пунсона [3] (рисунок 1).



Рисунок 1. – Устройство типа «ножниц» для разметки центра рельса на их верхней части (головке)

Также возможно использование специального устройства с круглым уровнем, магнитами для установки на рельс и резьбой для крепления отражателя (рисунок 2).



**Рисунок 2. – Специальное устройство с круглым уровнем и магнитами для установки и центрирования на рельсе отражателя**

Расстояние между точками измерения выбирается в соответствии с типом и конструкцией кранового пути, а также с учетом требований, сформулированных в соответствующих нормативных документах. В случае мостовых кранов положение измерительных точек выбирается по вертикальным осям колонн, поддерживающих рельсовый путь, и, при необходимости, посередине между ними.

Измерительный прибор закрепляют непосредственно на рельсе с помощью специального зажима (фиксатора) или вне рельса, используя классический штатив. Во время проведения измерений кран фиксируется в крайнем положении. Таким образом, невозможно произвести измерение по всей длине рельсового пути.

Обработка данных измерений по рельсам, определение боковых и вертикальных отклонений точек измерения выполняются в соответствии с используемой методикой измерений. Требования к точности определения отклонений задаются нормативными документами, сформулированными в общем виде в форме пределов (допусков), которые отражают эксплуатационную нагрузку и геометрические параметры (длина, пролет рельсов) кранового пути и крана. Общепринято, что контроль и оценка крана должны производиться на основе стандартов, которые применялись при их проектировании.

Кран, не отвечающий основным требованиям по геометрии, должен быть выведен из эксплуатации, и необходимо произвести его исправление – рихтовку. Для рихтовки определяют значения, которые должны применяться при выпрямлении рельсов и крана, в каждом поперечном сечении, как в боковом, так и в вертикальном направлении.

Ранее для определения значений рихтовки в плановом положении обычно использовались графические процедуры. Они начинались с графического представления отклонений и допусков интервалов в виде полос. Затем производился поиск оптимального положения рельса внутри полосы допуска отдельно для обоих рельсов. Такое определение значений выпрямления приводило к двум линиям, которые не могли быть параллельными, и поэтому необходимо было проверить пролет рельса (допуск) в каждом сечении.

В противовес этому методу мы предлагаем использовать аналитические процедуры, приводящие к строгому решению. В большинстве этих процедур используется классический метод наименьших квадратов (МНК), который «генерирует» положение осей рельсов в оптимальном прямолинейном и параллельном положениях.

**Основная часть.** Выбор параметров объекта, удовлетворяющих определенным геометрическим требованиям к точности положения его конструктивных элементов, является задачей оптимизации положения. Она предполагает выбор такого варианта управления положением объекта, при котором достигается минимальное или максимальное значение некоторого критерия, характеризующего качество управления. Выделяют безусловные и условные методы оптимизации.

Исходя из требований, предъявляемых к подкрановым путям, таким критерием является степень геометричности (прямолинейность, плоскостность, горизонтальность и т.п.) элементов.

Возникает задача нахождения выровненного положения линий, плоскостей и поверхностей сооружений с целью исправления (рихтовки) деформированных элементов сооружений с минимальными затратами средств, труда и времени. Проектная идеальная форма объекта задается проектными координатами, а реальная – фактическими. Методы решения таких задач рассматривались в [4; 5].

При разработке методов геодезического обеспечения оптимальных параметров геометрических систем целесообразно рассматривать такие общие методологические особенности применения аппарата исследований операций, как:

- выбор критерия и построение математической модели исследуемого объекта;
- отыскание оптимального решения с помощью методов математического программирования.



При этом необходимо учитывать степень постоянства исходных и искоемых параметров системы, их взаимосвязь и обусловленность, возможность применения доступных алгоритмов решения задач и характер использования результатов.

Математическая процедура поиска наилучшей подходящей прямой для заданного набора точек выполняется путем минимизации суммы квадратов смещений («остатков») точек относительно прямой. Вместо абсолютных значений смещений используется сумма квадратов смещений, поскольку это позволяет рассматривать остатки как непрерывную дифференцируемую величину. Однако, поскольку используются квадраты смещений, удаленные точки могут оказывать непропорциональное влияние на решение, свойство, которое может быть желательным или нежелательным в зависимости от решаемой проблемы.

При оптимизации положения рельсов по сути должны выполняться два условия:

- оси рельса 1 и рельса 2 должны быть параллельны;
- расстояние между осями рельсов должно равняться какой-либо проектной величине  $d$ .

Решение поставленной задачи можно выполнить, используя модели двух видов.

1. Для оптимизации, учитывающей только изменение значений координат по оси  $y$ , используется модель вида

$$y = a \cdot x + b + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  являются коэффициентами функции регрессии;

$x, y$  – измеренные значения;

$\varepsilon$  – случайные погрешности измеряемых значений.

До недавнего времени такая модель использовалась наиболее часто и стала традиционной. Обусловлено это тем, что она позволяет легко учитывать неопределенности точек данных вдоль осей, а также обеспечивает гораздо более простую аналитическую форму для расчета параметров.

2. В последнее время в связи с развитием вычислительной техники получает все большее распространение модель, которая вносит корректировки в координаты по обеим осям и минимизирует квадраты остатков  $r$ , которые нормальны к модельной линии, вида

$$a \cdot x + b \cdot y + c - r = 0. \quad (2)$$

Предварительные исследования вопроса показали, что моделирование отдельно первой и второй линии, а также моделирование без использования проектных условий не целесообразно, так как в большинстве случаев приводит к недопустимым значениям в параллельности и расстоянии между линиями. Таким образом, будем использовать модель (2), которая для двух параллельных линий 1 и 2 и при заданном по нормали проектном расстоянии  $d$  между ними будет иметь вид

$$\begin{aligned} a \cdot x_{(1)} + b \cdot y_{(1)} + c_1 &= r_1; \\ a \cdot x_{(2)} + b \cdot y_{(2)} + c_2 &= r_2 \end{aligned} \quad (3)$$

при условиях

$$\begin{aligned} r^T \cdot r &\rightarrow \min; \\ a^2 + b^2 &= 1; \\ c_2 - c_1 &= d. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $(x_{(1)}, y_{(1)})$ ,  $(x_{(2)}, y_{(2)})$  – вектора координат 1 и 2 линии, вектор-столбец  $r = [r_1 \quad r_2]^T$  – вектор остатков по нормали от текущей точки до модельной линии. Остатки  $r$  будут оптимальны по первому условию (4), нормальные – при соблюдении второго условия (4), равенство коэффициентов  $a$  и  $b$  при координатах позволит получить две параллельные линии, а третье условие (4) гарантирует, что расстояние между ними будет равно проектному значению  $d$ .

Систему (3) целесообразнее представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} x_{(1)} & y_{(1)} & e_n & z_n \\ x_{(2)} & y_{(2)} & z_n & e_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} \rightarrow A \cdot x = r, \quad (5)$$

где  $e_n$  – вектор-столбец из единиц размерности  $n$ ;

$z_n$  – вектор-столбец из нулей размерности  $n$ .

Задача (5) в общем виде решается на основе условной минимизации Лагранжа. Для записи целевой минимизируемой функции Лагранжа  $\Phi_L$  в матричном виде введем матрицу  $E_2$  и  $f$

$$E_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, f = [0 \quad 0 \quad -1 \quad 1].$$

Тогда минимизируемую функцию можно записать как

$$\Phi_L = x^T \cdot R \cdot x - \lambda_1 \cdot (x^T \cdot E_2 \cdot x - 1) - 2 \cdot \lambda_2 \cdot (f \cdot x - 16,5). \quad (6)$$

Здесь  $r^T \cdot r = (x^T \cdot A^T) \cdot (A \cdot x) = x^T \cdot R \cdot x$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – неопределенные множители Лагранжа, проектное значение  $d$  было принято равным 16,5 м. Минимум функции в точке  $x$  можно найти или любым численным методом, или выполнив аналитически обычную процедуру поиска условного минимума, получив нелинейную систему уравнений вида

$$\begin{bmatrix} R & -E_2 \cdot x & -f \\ x^T \cdot E_2 & 0 & 0 \\ f & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_4 \\ 1 \\ 16,5 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Система (7) решается любым численным итерационным методом.

Для апробации предлагаемого алгоритма выполним расчет коэффициентов уравнения прямых по координатам точек, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Координаты центров рельсов подкрановых путей

Левый рельс				Правый рельс			
№	x, м	y, м	r, мм	№	x, м	y, м	r, мм
1	0,000	0,000	4,2	51	-10,602	12,635	-10,4
2	3,622	3,028	14,1	52	-6,993	15,678	-0,4
3	8,193	6,872	9,1	53	-2,422	19,523	5,3
4	12,793	10,732	10,6	54	2,179	23,381	1,7
5	17,384	14,600	0,1	55	6,769	27,251	14,3
6	21,991	18,468	-0,1	56	11,381	31,112	5,6
7	26,577	22,319	-0,7	57	15,965	34,967	10,9
8	31,182	26,180	3,1	58	20,571	38,826	4,9
9	35,758	30,018	6,0	59	25,143	42,668	7,6
10	40,364	33,886	5,2	60	29,749	46,536	8,5
11	44,975	37,775	-8,5	61	34,362	50,422	18,6
12	49,576	41,628	-1,0	62	38,963	54,276	11,9
13	54,121	45,452	-7,4	63	43,517	58,089	4,0
14	58,741	49,319	1,6	64	48,129	61,966	7,9
15	63,342	53,169	11,3	65	52,731	65,814	-4,1
16	66,759	56,018	26,4	66	56,144	68,668	-12,7

Для данных, приведенных в таблице 2, решение задачи будет следующее:

$$\begin{aligned} a &= -0,642986099978838; \\ b &= 0,765877846156946; \\ c_1 &= -0,00424 \text{ м}; \\ c_2 &= -16,50424 \text{ м}; \\ \lambda_1 &= -1,2223; \\ \lambda_2 &= -0,1477. \end{aligned}$$

Первое (нелинейное) условие оказывает большее влияние, чем второе (линейное) практически на порядок.

Значения целевой функции  $r^T \cdot r = 0,002835$ , а остатки  $r_i$  в мм для выполнения рихтовки. Знаки уклонений от прямой  $r_i$  приняты таким образом, что смещение внутрь пролета имеет знак «-», а наружу – знак «+».

Реализация алгоритма не совсем проста, но возможны упрощения. Во-первых, можно отдельно, используя, например, регрессию Деминга для модели (2), получить угол наклона линии при учете сдвига по обеим осям координат. Во-вторых, если собрать координаты двух линий в один массив, то получим линию, проходящую через центр тяжести из координат для двух линий. В-третьих, зная проектное расстояние  $d$ , развести линии относительно центра тяжести на величину  $d/2$ , получив таким образом две линии с выполненными условиями параллельности и расстояния.

Регрессия Деминга находит прямую наилучшего сглаживания для двумерного набора данных и отличается от простой линейной регрессии тем, что она принимает во внимание ошибки в наблюдении как по оси  $x$ , так и по оси  $y$ . Регрессия является более общим случаем метода полных наименьших квадратов, которая имеет более сложную структуру модели ошибок [6].

Для набора точек, как показано на рисунке 3, линия регрессии проходит через центр тяжести скопления точек – точку со средними значениями  $u$  и  $x$  (средние из всех точек – для двух линий).

Для регрессии Деминга используется ранее представленная модель (1). Ее коэффициенты можно получить на основе корреляционной матрицы  $K$ , составленной для совместных векторов  $[x \ y]$ , или, не учитывая степени свободы  $t$ , по матрице девиат  $S$  вида

$$S = \begin{bmatrix} s_x^2 & s_{xy} \\ s_{xy} & s_y^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} s_x^2 &= \sum (x_i - \bar{x})^2; \\ s_y^2 &= \sum (y_i - \bar{y})^2; \\ s_{x,y} &= \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}). \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициент  $a$  определяют по формуле:

$$a = \frac{s_y^2 - s_x^2 + \sqrt{(s_x^2 - s_y^2)^2 + 4s_{x,y}^2}}{2s_{x,y}}. \quad (10)$$

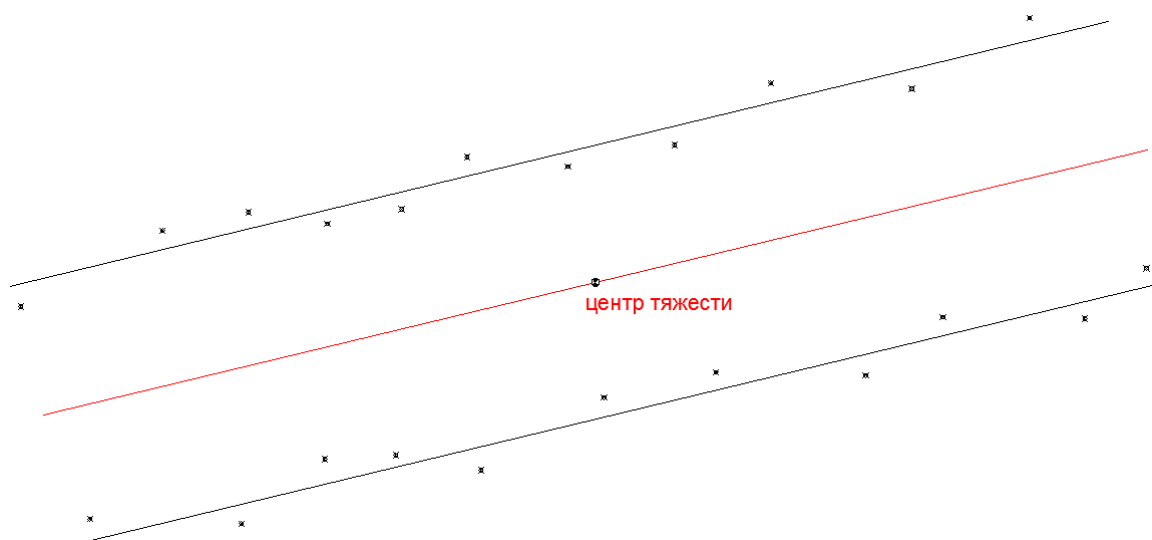


Рисунок 3. – Линия, проходящая через центр тяжести из координат для двух подкрановых рельс

Коэффициент  $b$  (для красной линии на рисунке 3) по стандартной формуле будет равен

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x}. \quad (11)$$

Коэффициенты получены для совместной линии, проходящей через центр тяжести (см. рисунок 3, красная линия). Для учета условия на проектное расстояние  $d$  находим

$$|\beta_{01} - \beta_{02}| = d\sqrt{\beta_1^2 + 1} \quad (12)$$

и вычисляем коэффициенты сдвига для линии 1 и 2 как

$$\beta_0 \pm \frac{1}{2}|\beta_{01} - \beta_{02}|. \quad (13)$$

Для апробации предлагаемого алгоритма был выполнен расчет коэффициентов уравнения прямых по координатам точек, которые приведены в таблице 2. В результате вычислений по формулам (10)–(13) было получено:

$$a = 0,839541299924135;$$

$$b_0 = 10,7774847579735;$$

$$b_1 = 0,00553209095127;$$

$$b_2 = 21,5494374249957.$$

Значение  $d$  было принято 16,5 м. По уравнениям прямых и координатам точек, приведенным в таблице 2, были вычислены отклонения точек от прямой по формуле:

$$r_i = \frac{(y_i - a \cdot x_i - b_0)}{\sqrt{a^2 + 1}}. \quad (14)$$

Полученные значения с точностью до 0,1 мм совпали с предыдущим вариантом решения ( $r_i$ ) в таблице 2. По многолетнему опыту в основном визуализируется фактическое положение подкранового пути в обоих направлениях. Чертеж заполняется числовыми значениями отклонений, а также значениями ширины колеи [7; 8]. Пример возможной визуализации результатов приведен на рисунке 4. Здесь отклонения рельсов от прямой показаны для случая, когда прямые проходят через начальную и конечную точки.

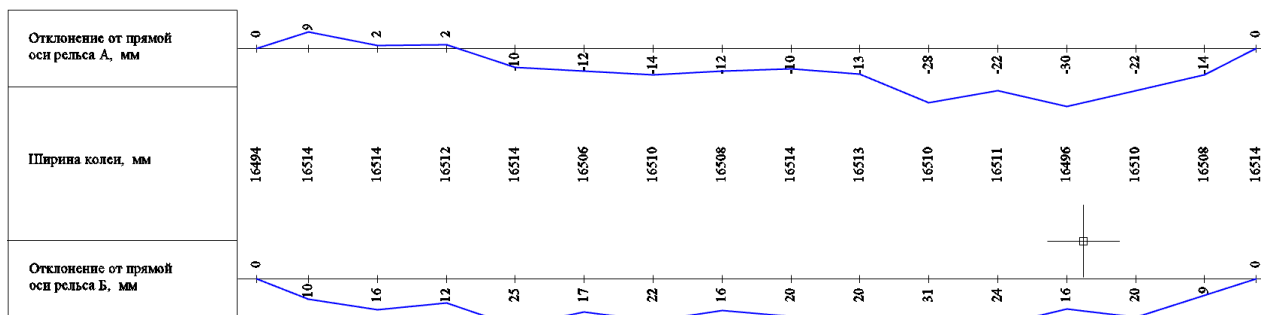


Рисунок 4. – Пример визуализации результатов фактического положения подкрановых путей

Для рассмотренного варианта оптимизации данных графическое представление приведено на рисунке 5.

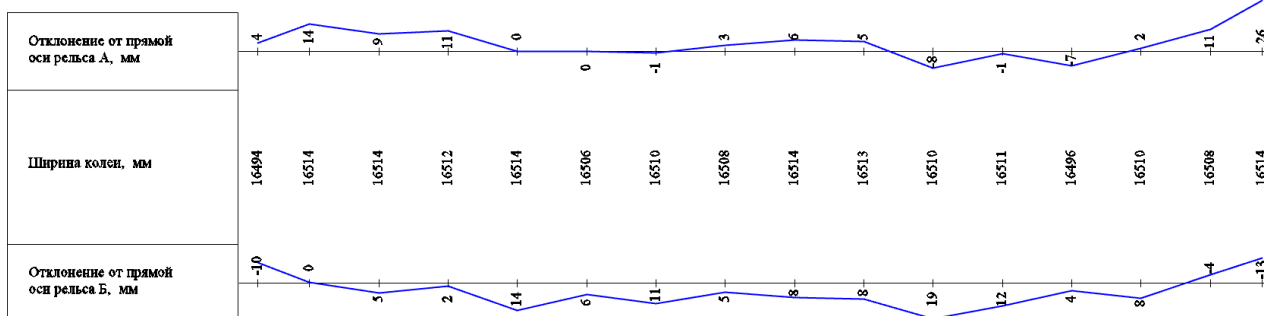


Рисунок 5. – Графическое представление данных для рихтовки подкрановых путей по варианту с использованием регрессии Деминга

Для сравнения результатов, полученных по строгому алгоритму на основе (6), (7) по модели (2), пересчитаем коэффициенты  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  для модели (1) в коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  из модели (2). Для этого просто нормируем коэффициенты модели (1) знаменателем из формулы (14). Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Пересчитанные коэффициенты для модели (2)

$a' =$	-0,642986090
$b' =$	0,765877855
$c_1' =$	-0,00424
$c_2' =$	-16,50424

Расхождения с точным методом для модели (2): коэффициент  $a$  в 9 знаке,  $b$  в 8 знаке, что соответствует примерно тысячным долям угловой секунды; коэффициенты сдвига одинаковы до десятых долей миллиметра.

**Заключение.** Анализ нормативной и технической литературы, рассмотренные алгоритмы получения оптимальных прямых и полученные численные результаты при камеральной обработке плановой съемки подкрановых путей позволяют сделать следующие выводы:

- результаты обработки плановой съемки подкрановых путей являются исходными данными для составления проекта рихтовочных работ;
- достоверность результатов плановой съемки подкрановых путей зависит не только от точности измерений, но и от корректности интерпретации результатов измерений и их графического представления;
- предлагаемый авторами метод расчета коэффициентов уравнений прямых на основе регрессии Деминга и параллельного сдвига прямых дает результаты, сопоставимые со строгим методом, основанным на стандартных процедурах оптимизации, но является намного более простым с вычислительной точки зрения;
- вычисленные параметры оптимальных прямых позволяют получить представление о реальной форме рельсовых путей в целом, что упрощает составление проекта рихтовки рельсовых путей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черников В.Ф. Контроль подкрановых путей геодезическими методами // Тр. НИИГАиК. – 1969. – Т. 19. – С. 153–160.
2. Ганьшин В.Н., Репалов М. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации подкрановых путей. – М.: Недра, 1980. – 117 с.
3. Koráčík A., Erdélyi J. & Kyrinovič P. *Engineering Surveys for Industry*. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-48309-8.
4. Баран П.И. Геодезические работы при монтаже и эксплуатации оборудования. – М.: Недра, 1990. – 233 с.
5. Дегтярев А.М., Ялтыхов В.В. Использование методов оптимизации для решения инженерно-геодезических задач // Вестн. СГУГиТ. – 2015. – № 1(29). – С. 24–33.
6. Deming W.E. *Statistical Adjustment of Data*. – New York: John Wiley and Sons Inc., 1943. – (Dover Publications Edition, 1985).
7. Шеховцов Г.А. Современные методы геодезического контроля ходовой части и путей мостовых кранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – 185 с.
8. Михайлов В.И., Скребков Г.В. О методике геодезического контроля подкрановых путей электронным тахеометром // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2011. – № 3. – С. 27–29.

#### REFERENCES

1. Chernikov, V.F. (1966). Kontrol' podkranovykh putei geodezicheskimi metodami. *Tr. NIIGAiK*, (19), (153–160). (In Russ.).
2. Gan'shin, V.N. & Repalov, I.M. (1980). *Geodezicheskie raboty pri stroitel'stve i ekspluatatsii podkranovykh putei*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
3. Koráčík, A., Erdélyi, J. & Kyrinovič, P. (2020). *Engineering Surveys for Industry*. Cham: Springer Nature Switzerland AG. DOI: 10.1007/978-3-030-48309-8.
4. Baran, P.I. (1990). *Geodezicheskie raboty pri montazhe i ekspluatatsii oborudovaniya*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
5. Degtyarev, A.M. & Yaltykhov, V.V. (2015). Ispol'zovanie metodov optimizatsii dlya resheniya inzhenerno-geodezicheskikh zadach [Optimization Methods for Engineering Geodesy Problems Solution]. *Vestn. SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(29), 24–33. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Deming, W.E. (1943). *Statistical Adjustment of Data*. New York: John Wiley and Sons Inc. (Dover Publications Edition, 1985).
7. Shekhovtsov, G.A. (2018). *Sovremennyye metody geodezicheskogo kontrolya khodovoi chasti i putei mostovykh kranov, 2-e izd., pererab. i dop.* Nizhny Novgorod: NNGASU. (In Russ.).
8. Mikhailov, V.I. & Skrebkov, G.V. (2011). O metodike geodezicheskogo kontrolya podkranovykh putei elektronnyim takheometrom. *Vestn. Belarus. nats. tekhn. un-ta*, (3), 27–29. (In Russ.).

Поступила 16.04.2024

**IMPROVEMENT OF THE ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE PLANNED POSITION  
OF CRANE TRACKS BY PAR-ALLEL STRAIGHT LINES**

**K. MARKOVICH, V. YALTYKHOV, A. DEGTJAREV**  
*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*The article presents research on determining the spatial position of crane tracks of overhead cranes using the latest geodetic electronic devices instead of traditional devices recommended by regulatory documents. The geometric requirements for cranes and crane tracks, wear factors of crane rails, the purpose of tolerances and their values, geodetic work during the operation of crane tracks are considered. Methods for obtaining optimal parameters of geometric systems for crane tracks of bridge cranes by minimizing the sum of squared displacements of rail axes relative to two parallel straight lines with an additional condition are considered.*

**Keywords:** *overhead crane, crane tracks, rails, track gauge, optimal parallel lines, least squares method.*

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 628.544

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-87-95

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ДЕЗИНФЕКЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ ОЗОНА И ГИПОХЛОРИТА НАТРИЯ

*А.В. ПОСПЕЛОВ<sup>1)</sup>, М.А. КОМАРОВ<sup>2)</sup>, Н.Г. КОРОБ<sup>3)</sup>, А.Н. ХОТЬКО<sup>4)</sup>  
(<sup>1-3)</sup> Белорусский государственный технологический университет, Минск,  
<sup>4)</sup> филиал БГТУ «Белорусский государственный колледж промышленности  
и строительных материалов», Минск)*

*Водные растворы озона представляют перспективную альтернативу хлорсодержащим дезинфицирующим веществам, что подтверждено предыдущими исследованиями. Дезинфекция поверхностей остается малоизученной областью. В статье рассматриваются технические аспекты использования озона и гипохлоритов, включая генерацию озона, растворение в воде, контроль параметров, деструкцию озона, эффективность инактивации микроорганизмов и безопасность. Результаты исследования указывают на преимущества использования озона. Важно также формирование микро- и нанопузырьков при дезинфекции озоном. Период полураспада озона в 20 минут обеспечивает высокую эффективность инактивации микроорганизмов и отсутствие необходимости последующей деструкции остаточного озона. Сравнение с гипохлоритами показывает существенное превосходство озона в инактивации микроорганизмов на различных поверхностях. Это позволяет сократить время дезинфекции и уменьшить коррозию материалов. Экономические показатели использования озона сравнимы с хлорсодержащими реагентами, при этом экологические характеристики озона значительно лучше. Исследование подчеркивает техническую и экологическую целесообразность применения озона для дезинфекции поверхностей, предоставляя важные данные для разработки соответствующих технологий.*

**Ключевые слова:** *дезинфекция поверхности, технические аспекты, растворение озона, деструкция озона, инактивация.*

**Введение.** В ходе анализа литературных источников было выявлено, что большинство работ посвящено изучению инактивации различных микроорганизмов в объеме. При этом исследований об эффективности инактивации микроорганизмов на поверхностях очень мало, а тем более сравнительного анализа инактивации на поверхности различных материалов. Также только единичные работы позволяют сравнительно оценить эффективность дезинфекции поверхностей с использованием различных веществ. В опубликованных ранее исследованиях было показано, что водные растворы озона являются перспективной альтернативой хлорсодержащим дезинфицирующим веществам. Использование таких веществ может вызвать негативные последствия для экосистемы на всех этапах жизненного цикла [1–4]. С технической точки зрения использование озона в качестве дезинфицирующего средства обладает рядом преимуществ [8–11]. Также быстрая и эффективная инактивация микроорганизмов снижает разрушительное воздействие на материал обрабатываемых поверхностей [12–17].

Разработка технологических подходов к использованию озона для дезинфекции поверхностей состоит из нескольких ключевых этапов, которые необходимо учитывать [18–22]. Эти этапы включают в себя вопросы генерации озона (из воздуха или кислорода) и растворения озона в воде (многочисленные аспекты массопереноса из газовой фазы в жидкую); контроль параметров (температура, pH, концентрация озона); деструкцию озона в воде; эффективность инактивации микроорганизмов (вирусы, бактерии, грибы, время обработки для достижения требуемого эффекта инактивации); безопасность и ряд других.

В настоящей статье приведены данные, суммирующие предыдущие исследования в этой области, сопровождаемые новыми результатами, полученными авторами. Цель исследования заключалась в анализе технических аспектов дезинфекции поверхностей водными растворами озона и гипохлоритами.

**Методология исследований.** Для исследований по насыщению озоном водопроводной воды, а также изучению кинетики деструкции озона в воде использовали водонапорную колонну высотой 3 м и диаметром 20 см. Насыщение озоном проводили при помощи озонатора с расходом озono-воздушной среды на выходе 13,2 л/мин и концентрацией озона в газовой смеси 2,7 г/м<sup>3</sup>. Концентрация озона в воде определялась по ГОСТ 18301-72.

Основные выводы по сравнительной эффективности инактивации микроорганизмов различных видов на металлических и полимерных поверхностях были сделаны на основании неопубликованных работ, выполненных авторами.

Основные выводы по коррозии поверхностей сделаны на основании опубликованных работ авторов. Дополнительный сравнительный анализ влияния озона и гипохлорит иона на коррозию низкоуглеродистой стали выполнен на атомно-силовом микроскопе с анализом шероховатости и потенциала поверхности.

**Основная часть.** Озон имеет высокий окислительно-восстановительный потенциал равный 2,07 В (для сравнения у  $\text{Cl}_2 - 1,36$  В, у  $\text{O}_2 - 1,23$  В), что является главной причиной его активности по отношению к различного рода загрязнениям воды, включая широкий спектр вирусов (SARS-CoV-1, MCoV, HSV-1 и BoHV, HAV, Poliovirus Type 1), бактерий (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus hirae*, *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Aerococcus* и др.), грибов (*Microsporum canis*, *Microsporum gypseum*, *Trichophyton rubrum*, *Trichophyton interdigitale*, *Candida albicans*, *Aspergillus brasiliensis*).

В работе [23] было показано, что уровень остаточного озона 0,4 мг/л и воздействие в течение 4–6 мин являются достаточной гарантией для инактивации полиовирусов. Кроме того, в данной работе было введено понятие «С·Т» – критерия, который входит в так называемый закон Ватсона [23]:

$$\log_{10} (N_0/N) = k \cdot C \cdot t / 2,303,$$

где  $N_0$  и  $N$  – концентрация микрофлоры в начальный (0) и текущий (t) момент времени;

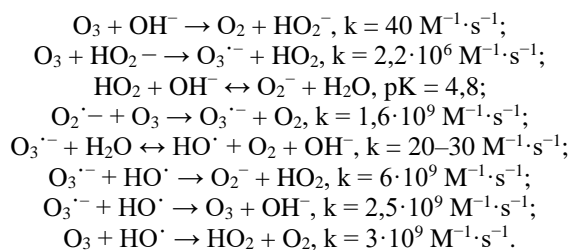
$C$  – концентрация озона в дезинфицирующем растворе;

$t$  – время обработки, мин;

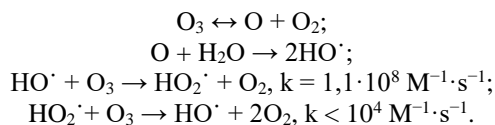
$k$  – константа скорости псевдопервого порядка инактивации микроорганизма озоном, л/(мг·мин).

Ниже представлены реакции озона, происходящие в щелочной и кислотной среде.

В щелочной среде:



В кислотной среде:



В настоящее время критерий С·Т является общепризнанным. Конечно, недостатками озонирования является отсутствие консервирующего эффекта и, следовательно, опасность последующего инфицирования объема воды. Однако для быстрой и эффективной дезинфекции поверхности озон представляет прекрасную альтернативу хлорсодержащим и органическим дезинфицирующим веществам.

Перед проектированием установки дезинфекции с использованием озона необходимо выделить целевые микроорганизмы, которые требуется инактивировать на поверхностях, а также оценить их чувствительность к озону, чтобы определить необходимые концентрации и время обработки. Все исследования показывают высокую эффективность озона в сравнении с хлорсодержащими дезинфицирующими веществами.

Необходимо выбрать генератор озона, который может создавать достаточное количество озона для эффективной дезинфекции. Генераторы озона могут быть классифицированы по разным критериям, включая принцип работы, назначение и тип применения. При использовании озона для насыщения воды с целью последующей дезинфекции по принципу работы озонатор должен генерировать озон методом коронный. Этот тип генераторов создает озон путем применения электрического разряда кислорода в воздухе или чистом кислороде. Генераторы, работающие на кислороде, дают большую концентрацию озона в газовой смеси на выходе. В нашей работе мы показали, что концентрации озона в воде 0,5 мг/л достаточно для проведения эффективной дезинфекции. При этом могут использоваться как промышленные, так и небольшие генераторы, в зависимости от объемов насыщаемой воды. Также это могут быть как стационарные системы, так и мобильные, например, для дезинфекции водозаборных скважин и т.п.

При проектировании установок по насыщению воды озоном необходимо обеспечить максимальное его поглощение или повторное использование озоновооздушной смеси с целью максимально-эффективного использования озона, так как он относится к веществам первого класса опасности.

Как видно на рисунке 1, в процессе насыщения пузырьки, содержащие озono-газовую смесь, имеют разные свойства в зависимости от их размера. В частности, крупные пузырьки, известные как макропузырьки, быстро поднимаются прямо к поверхности жидкости, где они лопаются. По сравнению с обычными большими пузырьками, микропузырьки обладают несколькими интересными особенностями, такими как более долгое нахождение в водных растворах из-за низкой скорости подъема и большей площади границы раздела газ-жидкость и, что наиболее важно, образование гидроксильных радикалов при их коллапсе, что обеспечивает окислительную способность и делает растворение проще. В частности, данное свойство микропузырьков – высокая площадь поверхности на единицу объема – использовалось для разложения органических загрязнителей и дезинфекции воды. Тем



не менее, было обнаружено, что они нестабильны в течение определенного периода времени (~мин), медленно поднимаясь к поверхности жидкости. Пузырьки меньшего размера, чем микропузырьки, классифицируемые как нанопузырьки, демонстрируют примечательную стабильность, приводящую к долгому времени нахождения в воде. Нанопузырьки могут оставаться стабильными в водном растворе в течение длительного периода времени (недель) из-за их незначительной плавучести и превосходной устойчивости к коалесценции. Учитывая их уникальные характеристики, они улучшают массоперенос и окислительную способность, потому что площадь контакта газ/жидкость увеличивается. Более того, растворимость газа и химические реакции на границе раздела газ-жидкость значительно улучшаются. Подытоживая, можно сказать, что с уменьшением размера пузырьков увеличивается массоперенос, уменьшается скорость подъема пузырьков, увеличиваются устойчивость и энергия схлопывания пузырька.

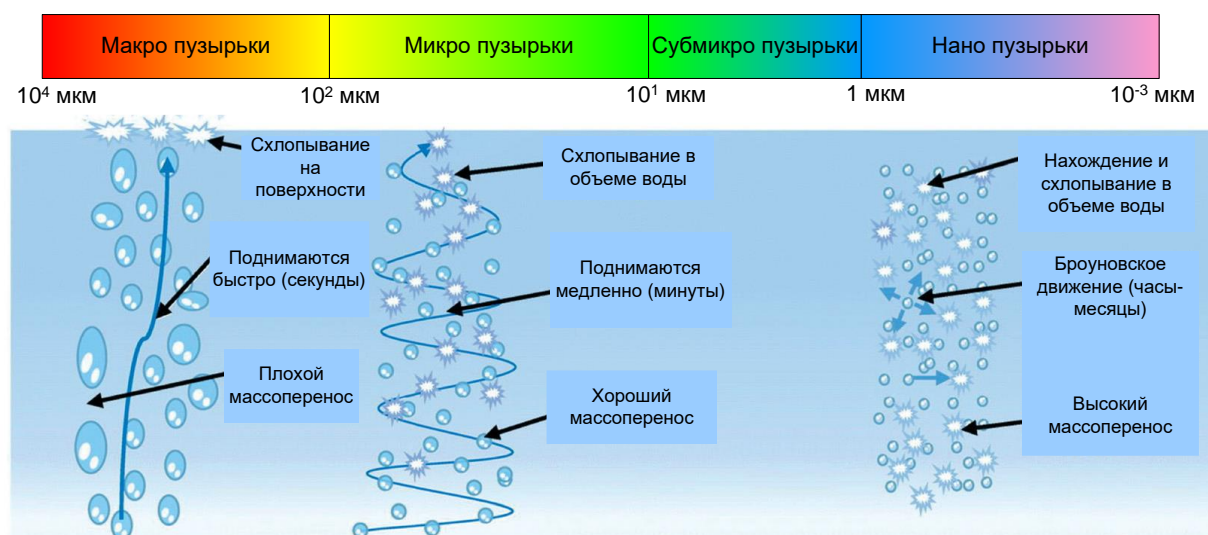


Рисунок 1. – Влияние размеров газовых пузырьков на их свойства в жидкости

Размеры пузырьков газа, образующихся при использовании керамических аэраторов, составляют до 5 мм, и в случае поднятия роя пузырьков при размерах до 3 мм скорость всплытия составляет до 20 см/с, и при размерах 3–5 мм остается 20 см/с. Тогда можно представить график зависимости времени поднятия пузырьков газа по высоте столба жидкости (рисунок 2).

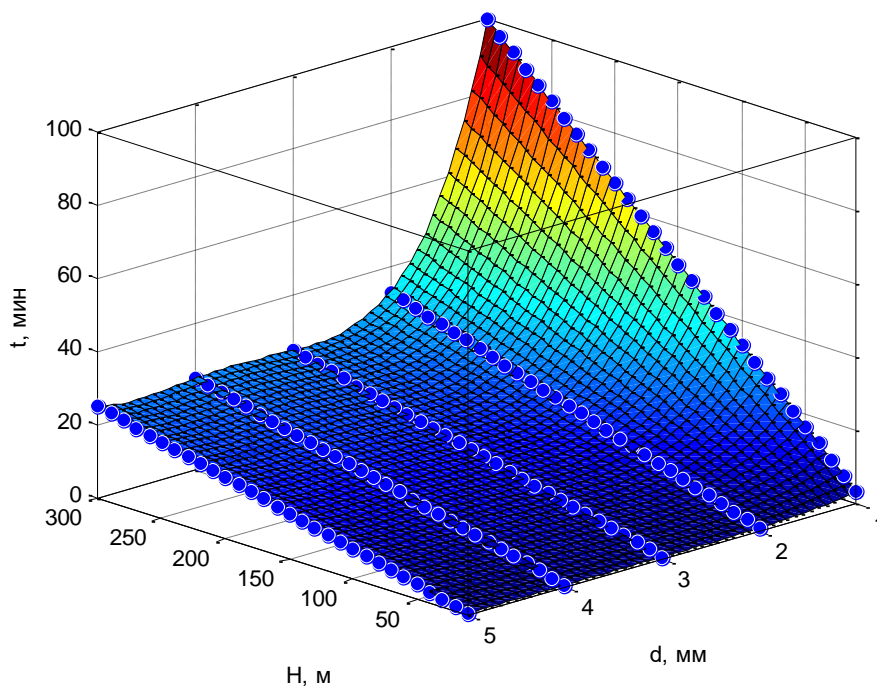


Рисунок 2. – Расчетное время поднятия пузырьков газа в зависимости от их размера и высоты слоя жидкости

График показывает, что при обработке воды в скважине ограничивающим фактором по времени является время поднятия пузырьков газовой смеси диаметром менее 2,5 мм. Для пузырьков этого размера и высоты слоя жидкости более 150 м полное разложение озона происходит до того, как газовые пузырьки достигнут поверхности. В таких случаях предлагается проводить обработку в два этапа, разделяя высоту столба жидкости на две части и начиная обработку с нижней части, затем переходя к обработке верхней части. Например, при высоте слоя жидкости 200 м рекомендуется обработать скважину сначала в фильтровой зоне, а затем на глубине 100 м от статического уровня. В обоих случаях после прекращения подачи озона в скважину рекомендуется выдерживать ее закрытой не менее 20 минут для полной деструкции озона и обеспечения дезинфекции от статического уровня до оголовка.

Также важным аспектом является тот, что деструкция озона в воде происходит достаточно быстро. Период его полураспада зависит от температуры и составляет около 20 мин при температуре воды 20 °С. С точки зрения работы с веществом первого класса опасности это является положительным фактором, так как достаточно продержат его в системе около 30–40 мин, чтобы обеспечить полную деструкцию. С другой стороны, это значительно ограничивает его использование, например, в случае дезинфекции трубопроводов. Однако известно, что можно продлить период полураспада до 1–2 часов, подкисляя воду, к примеру, углекислым газом. На рисунке 3 представлена зависимость деструкции озона от времени при 20 °С в колонне высотой 3 м (насыщение воды озоном проводилось в стационарном режиме с нижней части колонны, вода подавалась из водозаборной скважины).

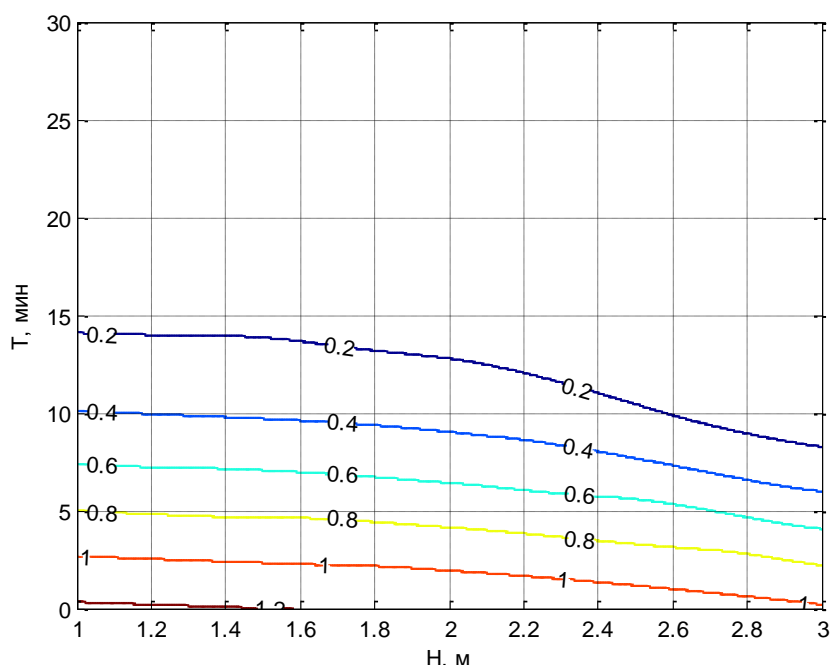


Рисунок 3. – Деструкция растворенного озона в воде по высоте столба жидкости

Уравнение кинетики деструкции первого порядка имеет вид

$$C = C_0 \cdot e^{-kt},$$

где  $C$  – концентрация озона по истечении времени  $t$ , мг/л;

$C_0$  – начальная концентрация озона, мг/л;

$k$  – константа реакции первого порядка.

Период полураспада растворенного озона  $t_{1/2}$  определяется как

$$t_{1/2} = 0,693/k.$$

Используя  $t_{1/2} = 8,75$  мин и найдя значение  $k = 0,0792$  мин<sup>-1</sup>, получим окончательное уравнение, имеющее вид:

$$C = C_0 \cdot e^{-0,0792 \cdot t}.$$

Разложение газообразного озона в растворенной форме зависит от нескольких факторов, включая ХПК, наличие неорганических ионов, природу обрабатываемой среды/поверхности, температуру и pH воды, и характеризуется сложными реакциями, возникающими спонтанно, что может значительно затруднять оценку механизма деструкции растворенного в воде озона.

В ходе выполнения исследований показано, что при дезинфекции низкоуглеродистой стали она активно корродировала во всех растворах с pH 7,5 и выше, однако наиболее сильная коррозия наблюдалась в растворах

гипохлорита с самой высокой концентрацией. Обработка озоном вызвала значительно меньшую коррозию по сравнению с обработкой гипохлоритом натрия или кальция с концентрацией активного хлора выше 50 мг/л. Хлорсодержащие соединения задерживаются в продуктах коррозии, дефектах и трещинах после дезинфекционной обработки поверхности гипохлоритом и, как было показано, влияют на pH и потенциал воды после промывки. Захваченные хлорсодержащие соединения могут влиять на коррозию стали после дезинфекции. Количество выделившегося и растворимого железа в растворах водопроводной воды было существенно ниже (около 1%) по сравнению с общей окисленной массой железа в данных условиях эксперимента, что хорошо согласуется с химическим моделированием. Оценка воздействия на жизненный цикл показала, что использование озона оказывает наименьшее негативное воздействие на окружающую среду, тогда как гипохлорит кальция – наибольшее.

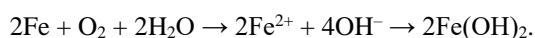
При проведении дезинфекции углеродистых сталей с одинаковой концентрацией активного хлора в исходных дезинфицирующих растворах электрохимические измерения показывают, что наибольшее коррозионное воздействие наблюдается при использовании растворов гипохлорита натрия. Тем не менее, весовые измерения демонстрируют, что наибольшая потеря массы происходит в растворах гипохлорита кальция, что, возможно, связано с более высокими значениями pH раствора гипохлорита натрия и некоторой пассивацией поверхности сталей.

Для нержавеющей стали с одинаковой концентрацией активного хлора в исходных дезинфицирующих растворах наибольшее коррозионное воздействие тоже проявляется при использовании растворов гипохлорита натрия и гипохлорита кальция, а также хлорной извести. Наибольшее вымывание элементов и наибольшие показатели шероховатости вызывают растворы гипохлорита кальция. Эффективность насыщенного раствора озона, измеренная электрохимическими показателями, приближается к питьевой воде, при этом токи коррозии в растворе озона оказываются ниже, чем в воде. Для нержавеющей стали использование насыщенной озонной воды не приводит к вымыванию элементов, что определено оптико-эмиссионной спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой и делает растворенный озон в воде перспективным дезинфицирующим веществом.

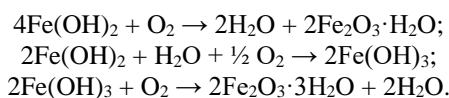
Полученные результаты электрохимических исследований подтверждают, что в процессе дезинфекции озон оказывает меньшее коррозионное воздействие по сравнению с растворами гипохлоритов. Это объясняется тем, что озон образует очень тонкий и плотный слой продуктов коррозии, что в свою очередь способствует снижению коррозии стали по сравнению с растворами гипохлоритов.

Традиционный механизм коррозии стали может быть продемонстрирован следующими реакциями.

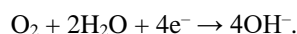
Анодная реакция:



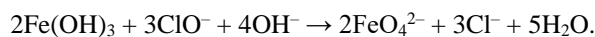
Таким образом, могут образовываться различные виды железосодержащих осадков:



Катодная реакция:

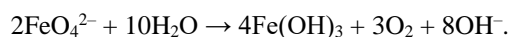


Образование ржавчины (окислей железа) на поверхности стали может создать слой, который частично препятствует диффузии окислителя к поверхности металла, таким образом ограничивая процесс коррозии. Однако в щелочных средах ионы гипохлорита могут взаимодействовать с образовавшимся слоем ржавчины и способствовать его растворению. Это явление часто называется «активацией коррозии» или «растворением ржавчины» и происходит в результате образования комплексов с ионами металла в щелочной среде

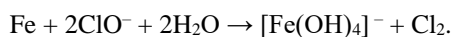


Следовательно, в контексте дезинфекции использование растворов гипохлоритов может сопровождаться активацией коррозии, воздействуя на защитный слой ржавчины и способствуя его растворению. Это одна из причин, по которой озон, создающий тонкий и плотный слой продуктов коррозии, может предпочтительно использоваться для дезинфекции с целью минимизации коррозионных эффектов.

В нейтральной среде ферраты медленно разлагаются



Также может быть предложена прямая реакция железа с ионами гипохлорита:

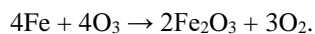


Качественный анализ присутствия ионов железа в растворах после обработки был подтвержден атомно-абсорбционной спектроскопией жидкой фазы.

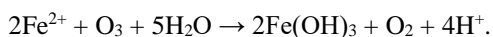
Также следует отметить, что при pH выше, чем нейтральная,  $\text{Fe}^{3+}$  в растворах может находиться в форме моно- и дигидрокомплексов  $[(\text{H}_2\text{O})_5\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$  и  $[(\text{H}_2\text{O})_4\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$ . При концентрациях  $\text{Fe}^{3+}$  более чем  $10^{-3}$  моль·л<sup>-1</sup> могут образовываться такие продукты как  $[(\text{H}_2\text{O})_4\text{Fe}-(\text{OH})_2-\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4]^{4+}$  и  $[(\text{H}_2\text{O})_5\text{Fe}-(\text{OH})_2-\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5]^{4+}$ .

По информации о воздействии озона, его молекулы абсорбируются на поверхности стали, после чего происходит их разложение на молекулу кислорода и кислородный радикал. Этот процесс приводит к формированию тонкой пленки ржавчины. Это отличается от механизма действия гипохлоритов, которые, как упоминалось ранее, могут вызывать растворение слоя ржавчины.

Прямое окисление железа непосредственно до  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ :

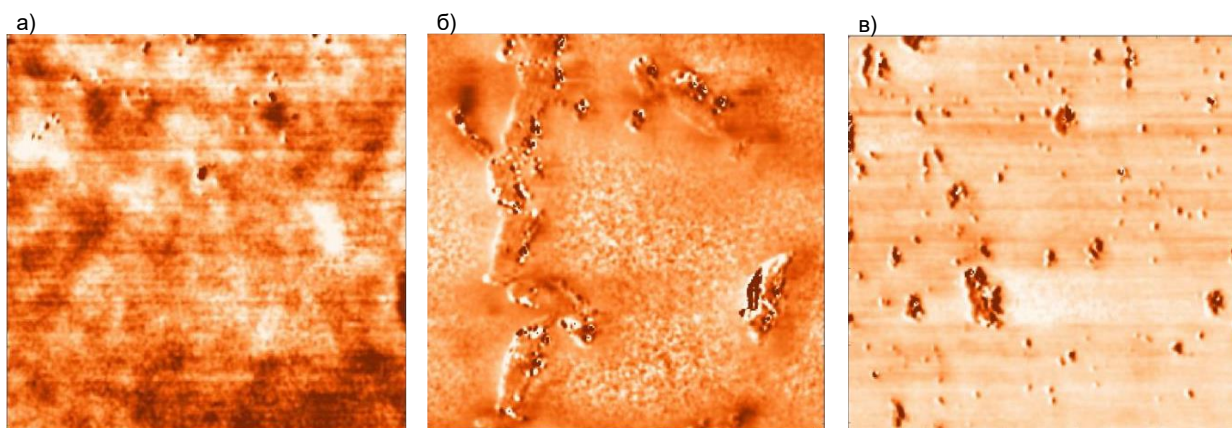


Или участие озона при окислении  $\text{Fe}^{2+}$ :



Ряд проведенных нами исследований при использовании различных типов стали показывает, что использование озона для дезинфекции поверхностей вызывает в 3,5 и более раз меньше коррозии в сравнении с растворами гипохлоритов.

В качестве наглядного примера представим изменение шероховатости поверхности низкоуглеродистой стали при 20-минутной обработке раствором озона в воде концентрацией 1 мг/л и 1-минутной обработке раствором гипохлорита натрия с концентрацией 150 мг/л по активному хлору (рисунок 4, таблица 1). Результаты получены на атомно-силовом микроскопе.



а) – 20 минут в водопроводной воде; б) – 1 минута в растворе гипохлорита натрия (150 мг/л);  
в) – 20 минут в насыщенной (1 мг/л) озоном воде. Размер изображения 1×1 мкм

Рисунок 4. – Изменение шероховатости поверхности низкоуглеродистой стали при обработке

Таблица 1. – Изменение шероховатости поверхности низкоуглеродистой стали при обработке: 20 минут в водопроводной воде, 1 минута в растворе гипохлорита натрия (150 мг/л) и 20 минут в насыщенной (1 мг/л) озоном воде

Параметр	Сталь	$\text{ClO}^-$	$\text{aqO}_3$
Потенциал, мВ	$-425 \pm 2$	$-69 \pm 8$	$-223 \pm 3$
Шероховатость, нм	1,65	25,4	2,7

В работе [24] показано, что среди проанализированных дезинфицирующих веществ интегральная оценка воздействия на окружающую среду уменьшается в ряду гипохлорит кальция > хлорная известь > гипохлорит натрия > раствор озона в воде. На стадии получения дезинфицирующих веществ наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают производства гипохлорита кальция и хлорной извести. Основным недостатком всех хлорсодержащих дезинфицирующих веществ является необходимость обеззараживания отработанных растворов и проведения нескольких промывок обрабатываемых поверхностей. Если полностью учитывать рекомендации по процедуре дезинфекции сооружений водоснабжения, то использование озона имеет сравнимые затраты с хлорсодержащими дезинфицирующими веществами.

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

- для подготовки водных растворов озона достаточно использования генераторов озона, работающих на воздухе;
- при использовании озона для дезинфекции желательнее получение микро- и нанопузырьков;
- период полураспада озона составляет около 20 мин, что достаточно для близкой к 100% эффективности инактивации и последующей полной самодеструкции остаточного озона, что исключает необходимость его дополнительного разложения (термического или каталитического);
- эффективность озона для инактивации микроорганизмов на металлических и полимерных поверхностях в сотни раз выше, чем при использовании гипохлоритов;

– за счет высокой эффективности инактивации микроорганизмов на поверхностях требуемое время дезинфекции сильно снижается, что приводит к значительно меньшему коррозионному воздействию на материалы поверхностей (от 3,5 раз и выше);

– экономические показатели использования озона сравнимы с использованием хлорсодержащих реагентов, но при этом экологические показатели использования озона значительно ниже.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия», задания 2.1.02 «Сорбционные, каталитические и мембранные материалы для водоочистки и водоподготовки», НИР 5 «Физико-химические основы коррозии материалов в дезинфицирующих средах и разработка экологичных и высокоэффективных способов дезинфекции» (2021–2023 гг.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дезинфекция озоном водозаборных скважин и трубопроводов систем питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, Ю.Н. Чайка и др. // Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в. – 2013. – № 3(159). – С. 55–60.
2. Ozone disinfection of water intake wells and pipelines of drinking water supply systems / V.I. Romanouski, A.D. Gurinovich, Yu.N. Chaika et al. // Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances. – 2013. – № 3(159). – P. 51–56.
3. Hurynovich A.D., Romanouski V.I., Wawrzeniuk P. Analiza efektywności kaskadowego generatora ozonu // *Economia i środowisko*. – 2013. – № 1(44). – S. 156–164.
4. Исследование технических характеристик турбоозонатора с высокочастотным резонансным электроионизационным генератором озона / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, И.Д. Куницкая и др. // *Водоочистка*. – 2014. – № 3. – С. 66–69.
5. Романовский В.И., Жилинский В.В., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ коррозионной устойчивости углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам электрохимическим методом // *Вестн. БрГТУ. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2016. – № 2(98). – С. 126–129.
6. Романовский В.И., Чайка Ю.Н. Коррозионная устойчивость углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2014. – № 3(167). – С. 47–50.
7. Romanovski V.I., Chaika Yu.N. Carbon steels corrosion resistance to disinfectants // *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*. – 2014. – № 3(167). – P. 40–43.
8. Романовский В.И., Жилинский В.В. Коррозионная устойчивость стали 15 к дезинфицирующим растворам // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2015. – № 3(176). – С. 29–34.
9. Коррозия нержавеющей стали в дезинфицирующих растворах / А.В. Поспелов, И.В. Мацукевич, А.А. Касач и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки*. – 2023. – № 1(33). – С. 90–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93.
10. Коррозия углеродистых сталей в дезинфицирующих растворах / А.В. Поспелов, И.В. Мацукевич, А.А. Касач и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки*. – 2022. – № 14(32). – С. 89–93.
11. Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones / V. Zand, A. Salem-Milani, S. Shahi et al. // *Medicina oral, patologia oral y cirugia bucal*. – 2012. – № 17(2). – P. e352. DOI: 10.4317/medoral.17467.
12. The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants / B.W M. Cook, T.A. Cutts, A.M. Nikipforuk et al. // *Sci. Rep.* – 2016. – № 6. – P. 38293. DOI: 10.1038/srep38293.
13. Gallandat K., Wolfe M.K., Lantagne D. Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using *Escherichia coli* and the Ebola surrogate Phi6 // *Environmental science & technology*. – 2017. – № 51(8). – P. 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
14. Романовский В.И., Гуринович А.Д., Вавженюк П. Эффективность использования озона в технологии водоподготовки // *Водоочистка*. – 2014. – № 2. – С. 66–70.
15. Романовский В.И., Лихавицкий В.В., Гуринович А.Д. Исследование растворимости озона в воде по высоте столба жидкости // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2015. – № 3(176). – С. 113–118.
16. Технические аспекты использования озона в водоподготовке / В.И. Романовский, А.Д. Гуринович, Ю.Н. Бессонова и др. // *Вода magazine*. – 2016. – № 2(102). – С. 36–41.
17. Анализ эффективности дезинфекции сооружений питьевого водоснабжения с использованием хлорсодержащих дезинфицирующих средств и озона / В.И. Романовский, М.В. Рымовская, Ю.Н. Бессонова и др. // *Вестн. БрГТУ. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2015. – № 2(92). – С. 68–71.
18. Романовский В.И., Рымовская И.В., Янь Фэн С. Сравнительный анализ эффективности дезинфекции сооружений водоснабжения дезинфицирующими растворами // *Вода magazine*. – 2015. – № 10(98). – С. 18–21.
19. Определение основных параметров дезинфекции и обеззараживания озоном сооружений питьевого водоснабжения / В.И. Романовский, В.В. Лихавицкий, М.В. Рымовская и др. // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2015. – № 3(176). – С. 108–112.
20. Гуринович А.Д., Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Эффективность дезинфекции озоном сооружений систем водоснабжения // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2016. – № 10. – С. 48–51.
21. Романовский В.И., Бессонова Ю.Н. Сравнительный анализ способов дезинфекции водозаборных скважин и сооружений водоснабжения // *Перспективы развития и организационно-экономические проблемы управления производством: материалы междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: Право и экономика, 2015. – Т. 1. – С. 211–226.*
22. Рымовская М.В., Романовский В.И. Воздействие отработанных растворов дезинфекции сооружений водоснабжения на почву // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорган. в-в*. – 2016. – № 4(186). – С. 214–219.
23. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Самойлович В.Г. Озонирование в процессах очистки воды / под ред. В.Л. Драгинского. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 400 с.
24. Romanovski V., Claesson P.M., Hedberg Y.S. Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – № 27(11). – P. 12704–12716.

## REFERENCES

1. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Yu.N. & Vavzhenyuk, P. (2013). Dezinfektsiya ozonom vodozabornyykh skvazhin i truboprovodov sistem pit'evogo vodosnabzheniya [Disinfection with ozone of water wells and pipelines of drinking water supply systems]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(159), 55–60. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Chaika, Yu.N. & Wawzhenyuk, P. (2013). Disinfection with ozone of water wells and pipelines of drinking water supply systems. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 3(159), 55–60.
3. Hurynovich, A.D., Romanowski, V.I. & Wawrzenuk, P. (2013). Analiza efektywnosci kaskadowego generatora ozonu. *Economia i srodowisko*, 1(44), 156–164. (In Polish).
4. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Kunitskaya, I.D. & Likhavitskii, V.V. (2014). Issledovanie tekhnicheskikh kharakteristik turboozonatora s vysokochastotnym rezonansnym elektro-ionizatsionnym generatorom ozona [Study of the technical characteristics of a turbo ozonizer with a high-frequency resonant electroionization ozone generator]. *Vodoochistka [Water treatment]*, (3), 66–69. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Romanovskii, V.I., Zhilinskii, V.V. & Bessonova, Yu.N. (2016). Sravnitel'nyi analiz korrozionnoi ustoichivosti uglerodistykh staley k dezinfitsiruyushchim rastvoram elektrokhimicheskim metodom [The comparative analysis of corrosion stability carbonaceous stalya to the elektrokhimicheskim disinfecting solutions by method]. *Vestn. BrGTU. Vodokhoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrSTU. Water management construction, heat power engineering and geoecology]*, 2(98), 126–129. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Korrozionnaya ustoichivost' uglerodistykh staley k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of carbon steels to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(167), 47–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Romanovskii, V.I. & Chaika, Yu.N. (2014). Carbon steels corrosion resistance to disinfectants. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 3(167), 40–43.
8. Romanovskii, V.I. & Zhilinskii, V.V. (2015). Korrozionnaya ustoichivost' stali 15 k dezinfitsiruyushchim rastvoram [Corrosion resistance of steel 15 to disinfectant solutions]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 29–34. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Pospelov, A.V., Matsukevich, I.V., Kasach, A.A., Komarov, M.A. & Rozhko, S.N. (2023). Korroziya nerzhavayushchikh staley v dezinfitsiruyushchikh rastvorakh [Corrosion of stainless steels in disinfectant solutions]. *Vestn. Polotsk gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 1(33), 90–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-90-93. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Pospelov, A.V., Matsukevich, I.V., Kasach, A.A., Komarov, M.A. & Rozhko, S.N. (2022). Korroziya uglerodistykh staley v dezinfitsiruyushchikh rastvorakh [Corrosion of carbon steels in disinfectant solutions]. *Vestn. Polotsk gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 14(32), 89–93. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-89-93. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Zand, V., Salem-Milani, A., Shahi, S., Akhi, M.T. & Vazifekah, S. (2012). Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine in disinfection of contaminated Resilon cones. *Medicina oral, patologia oral y cirugia bucal*, 17(2), e352. DOI: 10.4317/medoral.17467.
12. Cook, B.W.M., Cutts, T.A., Nikiforuk, A.M., Leung, A., Kobasa, D. & Theriault, S.S. (2016). The Disinfection Characteristics of Ebola Virus Outbreak Variants. *Sci. Rep.*, 6, 38293. DOI: 10.1038/srep38293.
13. Gallandat, K., Wolfe, M.K. & Lantagne, D. (2017). Surface cleaning and disinfection: Efficacy assessment of four chlorine types using *Escherichia coli* and the Ebola surrogate Phi6. *Environmental science & technology*, 51(8), 4624–4631. DOI: 10.1021/acs.est.6b06014.
14. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D. & Vavzhenyuk, P. (2014). Effektivnost' ispol'zovaniya ozona v tekhnologii vodopodgotovki [Efficiency of ozone use in water treatment technology]. *Vodoochistka [Water treatment]*, (2), 66–70. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Issledovanie rastvorimosti ozona v vode po vysote stolba zhidkosti [Study of ozone solubility in water based on the height of the liquid column]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 113–118. (In Russ., abstr. in Engl.).
16. Romanovskii, V.I., Gurinovich, A.D., Bessonova, Yu.N. & Kryshilovich, E.V. (2016). Tekhnicheskie aspekty ispol'zovaniya ozona v vodopodgotovke [Technical aspects of the use of ozone in water treatment]. *Voda magazine [Water magazine]*, 2(102), 36–41. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, M.V., Bessonova, Yu.N., Kovalevskaya, A.M. & Likhavitskii, V.V. (2015). Analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya s ispol'zovaniem khlorso-derzhashchikh dezinfitsiruyushchikh sredstv i ozona [Analysis of the effectiveness of disinfection of drinking water supply structures using chlorine-containing disinfectants and ozone]. *Vestn. BrGTU. Vodokhoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya [Bulletin of BrSTU. Water management construction, heat power engineering and geoecology]*, 2(92), 68–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
18. Romanovskii, V.I., Rymovskaya, I.V. & Yan' Fen, S. (2015). Sravnitel'nyi analiz effektivnosti dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya dezinfitsiruyushchimi rastvorami [Comparative analysis of the effectiveness of disinfection of water supply facilities with disinfectant solutions]. *Voda magazine [Water magazine]*, 10(98), 18–21. (In Russ., abstr. in Engl.).
19. Romanovskii, V.I., Likhavitskii, V.V., Rymovskaya, I.V. & Gurinovich, A.D. (2015). Opredelenie osnovnykh parametrov dezinfektsii i obezrazhivaniya ozonom sooruzhenii pit'evogo vodosnabzheniya [Determination of the main parameters of disinfection and ozone disinfection of drinking water supply structures]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances]*, 3(176), 108–112. (In Russ., abstr. in Engl.).
20. Gurinovich, A.D., Romanovskii, V.I. & Bessonova, Yu.N. (2016). Effektivnost' dezinfektsii ozonom sooruzhenii sistem vodosnabzheniya [Efficiency of ozone disinfection of water supply system structures]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie [Vodoochistka. Water treatment. Water supply]*, (10), 48–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
21. Romanovskii, V.I. & Bessonova, Yu.N. (2015). Sravnitel'nyi analiz sposobov dezinfektsii vodozabornyykh skvazhin i sooruzhenii vodosnabzheniya. *Perspektivy razvitiya i organizatsionno-ekonomicheskie problemy upravleniya proizvodstvom: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. V 2 t. T. 1 (211–226)*. Minsk: Pravo i ekonomika. (In Russ.).

22. Rymovskaya, M.V. & Romanovskii, V.I. (2016). Vozdeistvie otrabotannykh rastvorov dezinfektsii sooruzhenii vodosnabzheniya na pochvu [Impact of spent disinfection solutions of water supply structures on soil]. *Tr. BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorgan. v-v* [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances], 4(186), 214–219. (In Russ., abstr. in Engl.).
23. Draginskii, V.L., Alekseeva, L.P. & Samoilovich, V.G. (2007). *Ozonirovanie v protsessakh ochistki vody*. Moscow: DeLi print. (In Russ.).
24. Romanovski, V., Claesson, P.M. & Hedberg, Y.S. (2020). Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12704–12716.

Поступила 27.12.2023

#### ANALYSIS OF TECHNICAL ASPECTS OF DISINFECTION OF SURFACES WITH AQUEOUS SOLUTIONS OF OZONE AND SODIUM HYPOCHLORITE

A. POSPELOV<sup>1)</sup>, M. KOMAROV<sup>2)</sup>, N. KOROB<sup>3)</sup>, A. KHOTKO<sup>4)</sup>

<sup>(1)-3)</sup> Belarusian State Technological University, Minsk,

<sup>4)</sup> Belarusian State College of Construction Materials Industry,  
Branch of the educational institution «Belarusian State Technological University», Minsk)

*Aqueous solutions of ozone represent a promising alternative to chlorine-containing disinfectants, which has been confirmed by previous studies. Disinfection of surfaces, unlike bulk water, remains a poorly understood area. The article discusses the technical aspects of the use of ozone and hypochlorites, including ozone generation, dissolution in water, parameter control, ozone destruction, microbial inactivation efficiency and safety. The study results point to the benefits of using ozone. The formation of micro and nanobubbles during disinfection with ozone is also important. The ozone half-life of 20 minutes ensures high efficiency of inactivation of microorganisms and no need for subsequent destruction of residual ozone. Comparison with hypochlorites shows the significant superiority of ozone in inactivating microorganisms on various surfaces. This allows you to reduce disinfection time and reduce corrosion of materials. The economic indicators of using ozone are comparable to chlorine-containing reagents, while the environmental characteristics of ozone are much better. The study highlights the technical and environmental feasibility of using ozone to disinfect surfaces, providing important data for the development of appropriate technologies.*

**Keywords:** surface disinfection, technical aspects, ozone dissolution, ozone destruction, inactivation.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Гуринович В.Ю., Леонович С.Н., Поздняков Д.А.</i> Организационно-технологические решения развития производственной базы индустриального домостроения .....	2
<i>Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Хаткевич А.М., Гиль А.И., Чапаранганда Э.</i> Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов .....	9
<i>Бакатович А.А., Обромпальский Р.Л.</i> Оценка эффективности березовой коры по физическим показателям в качестве сырьевого источника для производства тепловой изоляции.....	24
<i>Кожарский С.Г., Капустина О.В., Булавка Ю.А.</i> Формирование культуры безопасности при строительстве атомной электростанции в Арабской Республике Египет .....	31
<i>Колосовская А.Н., Ожешковская И.Н.</i> Архетипы в сакральных сооружениях: христианские храмы и мечети ...	36
<i>Надольский В.В.</i> Верификация и валидация компьютерной вычислительной модели для проектирования строительных конструкций.....	42
<i>Невейков А.Н., Дедок В.Н.</i> Практическая реализация метода вертикального армирования слабого основания для устройства сплошной фундаментной плиты здания .....	51
<i>Нияковский А.М., Коршун А.А., Милочкина А.Д.</i> Влияние изменений удельной теплоемкости и теплопроводности бетона на точность разработки математических моделей его твердения в теплотехнологических установках .....	59
<i>Рашкевич Е.И.</i> Определение основных расчетных параметров процесса внутрислоевого обработки подземных вод и оценка их эффективности для малых населенных пунктов .....	64

### ГЕОДЕЗИЯ

<i>Degtjarev A., Degtjareva E., Valoshyna M.</i> Matrix generalization of the problem of 3D coordinate transformation in satellite constructions .....	72
<i>Маркович К.И., Дегтярев А.М., Ялтыхов В.В.</i> Совершенствование алгоритма оптимизации планового положения подкрановых путей параллельными прямыми.....	78

### ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Поспелов А.В., Комаров М.А., Короб Н.Г., Хотько А.Н.</i> Анализ технических аспектов дезинфекции поверхностей водными растворами озона и гипохлорита натрия.....	87
---	----