

MIESIĘCZNIK

№ 3(42), 2025

POŁOCKI.

Tom I.

Rok 1818.

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

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия F. Строительство. Прикладные науки

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

---

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСІТЭТА  
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзуванне 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. Нияковский.

Редактор А.А. Прадидова.

Подписано к печати 26.11.2025. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1/8</sup>. Ризография.  
Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 7,85. Тираж 50 экз. Заказ 456.

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.011.1:624.046.5

DOI 10.52928/2070-1683-2025-42-3-2-7

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ В ВИДЕ БЕТОННЫХ ШПОНOK В ДЕРЕВОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. А.И. ГИЛЬ<sup>2)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. А.М. ХАТКЕВИЧ<sup>3)</sup>, Г.О. ЦИПАН<sup>4)</sup>*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*<sup>1)</sup>d.lazovski@psu.by, <sup>2)</sup>a.hil@psu.by, <sup>3)</sup>a.khatkevich@psu.by, <sup>4)</sup>tsipan.grisha@bk.ru*

*Рассмотрены основные механические соединения древесины и бетона в деревобетонных конструкциях, предложен вид соединения посредством бетонных шпонок, образованных при бетонировании деревянного элемента с выверленным отверстием. Разработана методика проведения экспериментальных исследований и специальный испытательный стенд для определения прочности и деформативности образцов при сдвиге, позволяющий моделировать работу деревобетонного элемента при изгибе. Изготовлены и испытаны образцы деревобетонных конструкций. Разрушение образца (полный сдвиг бетона относительно древесины) происходило по хрупкой схеме из-за среза бетонной шпонки по линии контакта древесины и бетона. Анализ результатов показал, что существенное влияние на прочность рассматриваемого вида соединения оказывает прочность бетона и геометрические размеры поперечного сечения бетонных шпонок. Предложена методика расчета прочности деревобетонных изгибаемых элементов при сдвиге по контакту древесины и бетона, основанная на положениях деформационной расчетной модели. Проведенные исследования позволили сделать вывод об эффективности применения механического соединения бетона и древесины в виде бетонных шпонок круглого поперечного сечения и необходимости проведения дополнительных экспериментально-теоретических исследований в составных деревобетонных изгибаемых элементах.*

**Ключевые слова:** деревобетонные конструкции, сдвиг, экспериментальные исследования, испытательный стенд, деформационная расчетная модель.

**Введение.** В настоящее время в строительной отрасли находят применения деревобетонные конструкции с учетом обеспечения их совместной работы, которые соединяют в себе преимущества обоих материалов. Преимуществами деревобетонных конструкций являются [1]: более низкий вес по сравнению с традиционными железобетонными, повышенная жесткость по сравнению с деревянными, высокие звукоизоляционные свойства, технологичность (отсутствие необходимости в устройстве опалубки, тяжелых подъемных механизмах), экологичность.

В настоящее время проводятся обширные исследования совместной работы бетона и древесины в составе деревобетонных конструкций<sup>1</sup> [2]. Следует отметить, что исследования направлены на изучение не только механических связей, но и клеевых. Причем клеевое соединение бетона и древесины из-за меньшей деформативности контакта предпочтительнее механическому<sup>2</sup> [2–5]. Однако клеевое соединение в основном эффективно при усилении существующих зданий, где не рекомендуется нарушать целостность деревянного настила (например, путем просверливания новых отверстий или установкой специальных стержней либо винтов) [2]. В то же время клеевое соединение (особенно в условиях монтажа данных конструкций на строительной площадке) требует высококачественной подготовки поверхности древесины, соблюдения температурно-влажностного режима, соблюдения требований к клею с точки зрения долговечности, высыхания. Кроме того, из недостатков клеевого соединения отмечают трудности в определении жесткости соединения ввиду большого разброса результатов экспериментальных исследований [6]. Таким образом, клеевое соединение находит свое применение при производстве сборных элементов, а наиболее эффективным соединением при устройстве деревобетонных конструкций на строительной площадке являются различные виды механических связей<sup>3,4</sup> [1].

Основными механическими соединениями древесины и бетона являются гибкие связи в виде различных стержней, шпилек, винтов (в том числе наклонных). Жесткими связями применительно к контакту древесины и бетона считаются пазовые соединения, которые создаются путем вырезания участков древесины на некоторую глубину по длине и последующего бетонирования [7; 8]. При этом несущая способность контакта при сдвиге определяется размерами выемки (паза) в древесине и прочностью бетона, так как разрушение происходит от среза бетонного паза. Одним из решений пазового механического соединения является использование бетонных шпонок,

<sup>1</sup> Yeoh D.E.C. Behaviour and design of timber-concrete composite floor system. PhD Thesis. – New Zealand: University of Canterbury, 2010. DOI: 10.26021/1992.

<sup>2</sup> См. сноску 1.

<sup>3</sup> См. сноску 1.

<sup>4</sup> Dias A.M.P.G. Mechanical behaviour of timberconcrete joints. PhD thesis. – The Netherlands: Delft University of Technology, 2005. – 293 p.

образованных путем высверливания отверстий в деревянном элементе и его последующем бетонировании. Совместная работа деревянной и бетонной части конструкции осуществляется за счет механического зацепления бетонной шпонки, возникающих сил трения между материалами и склеивания бетона и древесины.

Для предварительной оценки влияния бетонной шпонки на жесткость и прочность соединения были проведены поисковые натурные испытания образцов деревобетона, в которых рассматривался вариант соединения бетона и древесины на бетонных шпонках различного диаметра, определены предпосылки для расчета прочности данного вида соединения бетона и древесины.

**Методика проведения экспериментальных исследований.** Испытания проводились на деревобетонных образцах (рисунок 1), которые подвергались сдвигу при изгибе.

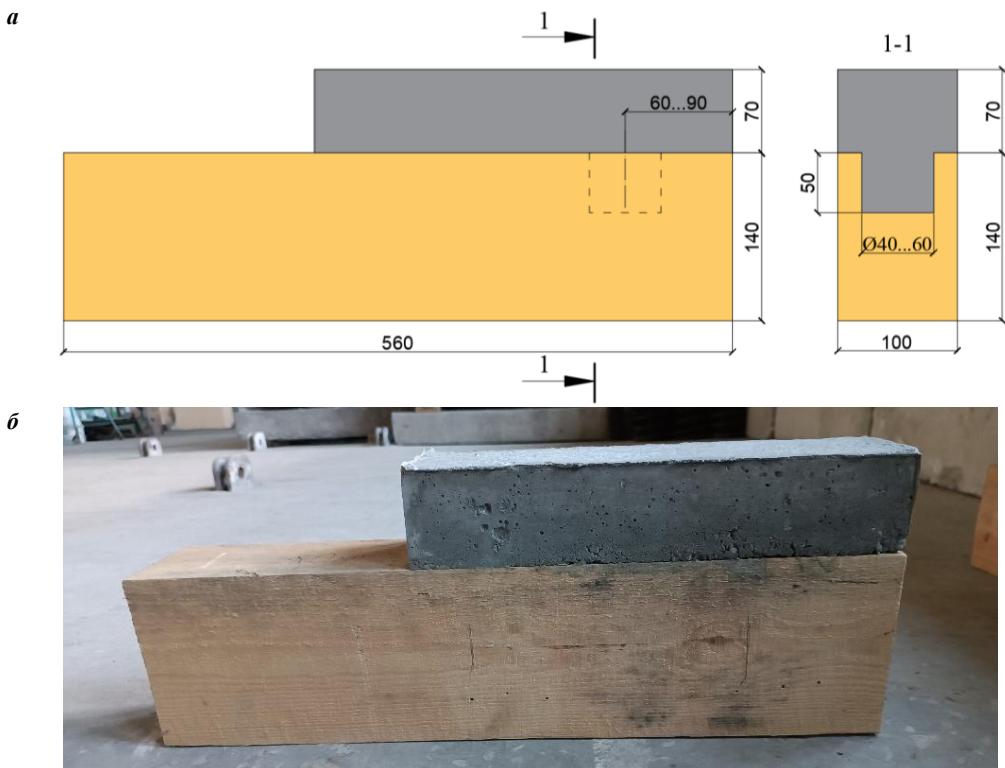


Рисунок 1. – Схема (а) и общий вид (б) экспериментальных деревобетонных образцов

Древобетонные образцы представляли собой две призмы, соединенные между собой бетонной шпонкой. В деревянной части высверливалось круглое отверстие на глубину 50 мм. Варьируемыми факторами при исследованиях были диаметр отверстия для шпонки и его расстояние от свободного торца образца.

Изготовление опытных образцов осуществлялось в испытательной лаборатории Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. В подготовленном деревянном образце высверливалось отверстие под шпонку, устанавливалась опалубка и заполнялась бетонной смесью, уплотнение производилось вибрированием. В период бетонирования влажность деревянной части образца составляла 9,6%. Твердение бетона проходило в нормальных условиях при температуре окружающего воздуха 22 °C, относительной влажности 67% в течение 28 суток. Для определения физико-механических характеристик бетона одновременно с бетонированием образцов формировались призмы размером 100×100×400 мм и кубы размером 100×100×100 мм, которые твердели в тех же условиях. Образцы бетона испытывались при сжатии и скальвании (для определения прочности при растяжении) по методике<sup>5,6</sup>. Для определения прочности деревянной части образца из древесины той же партии изготавливались призмы размером 100×100×600 мм и образцы «восьмерки», которые испытывались соответственно при сжатии и растяжении, по методике<sup>7</sup> [9].

На предварительном этапе исследований было изготовлено 2 опытных деревобетонных образца. Результаты определения физико-механических характеристик материалов и параметры опытных деревобетонных образцов представлены в таблице 1.

<sup>5</sup> СТБ EN 12390-3-2012. Методы испытаний бетона. Часть 3. Определение прочности на сжатие испытываемых образцов. – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. – 10 с.

<sup>6</sup> СТБ EN 12390-6-2012. Методы испытаний бетона. Часть 6. Определение прочности испытываемых образцов на растяжение при раскалывании. – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. – 19 с.

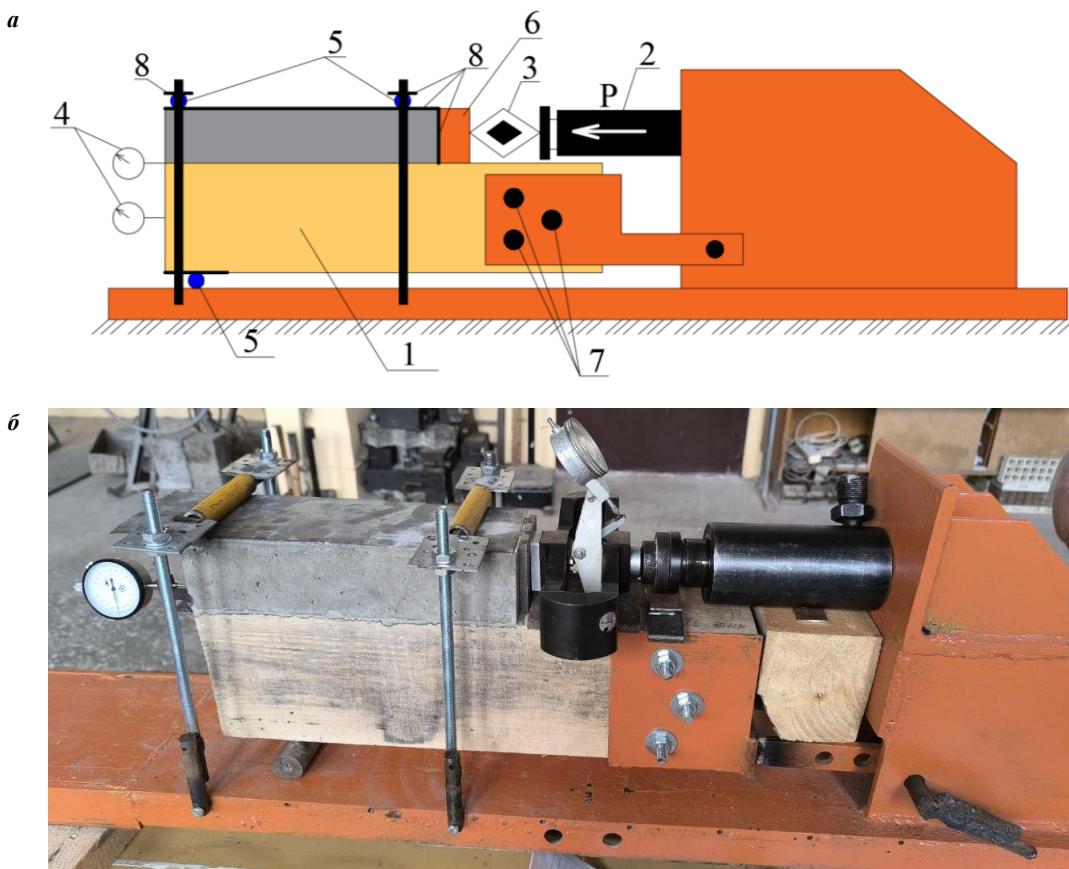
<sup>7</sup> СТБ EN 384-2011. Древесина конструкционная. Определение характеристических значений механических свойств и плотности. – Введ. 01.01.2012. – Минск: Госстандарт, 2012. – 16 с.

Таблица 1. – Параметры опытных деревобетонных образцов

№ образца	Диаметр шпонки, мм	Расстояние центра шпонки от свободного торца, мм	Древесина		Бетон	
			Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении, МПа
1	40	60	47,2	55,2	39,4	3,9
2	60	60	47,2	55,2	8,4	0,97

При испытании деревобетонный образец помещался в специальный стенд (рисунок 2), к бетонной части образца горизонтально прикладывалась нагрузка от домкрата, усилие которого контролировалось образцовым динамометром ДОР-20. Деревянная часть образца шпильками прикреплялась к стенду, что обеспечивало ее неподвижность при испытании. Для исключения перемещения бетона относительно дерева по вертикали и моделирования реальной совместной работы бетона и дерева при изгибе, сверху образец прижимался двумя шарнирными опорами, которые обеспечивали свободный ход бетонной части без трения об верхнюю упорную пластину, при этом исключался отрыв бетонной части от деревянной по вертикали.

На каждой стадии загружения фиксировались показания приложенной нагрузки и перемещения бетонной части образца относительно деревянной.



1 – опытный образец; 2 – домкрат; 3 – образцовый динамометр; 4 – индикатор часового типа; 5 – шарнирная опора; 6 – упорная пластина; 7 – болты крепления деревянной части образца к стенду; 8 – упругая пластина

Рисунок 2. – Схема (а) и общий вид (б) стенд для испытания образцов на сдвиг

**Анализ результатов исследований.** В результате проведенных экспериментальных исследований получена общая картина совместной работы бетона и древесины. На начальных этапах нагружения практически сразу происходило отслаивание бетона от древесины. На последующих этапах происходил прямо пропорциональный приложенной нагрузке сдвиг бетона относительно древесины с линейным распределением перемещений. При этом отмечено, что на стадиях линейного сдвига нарушения целостности шпонки и древесины вблизи нее практически не наблюдалось. Разрушение образца (полный сдвиг бетона относительно древесины) происходило по хрупкой схеме из-за среза бетонной шпонки по линии контакта древесины и бетона. На образцах отмечены следы пластического деформирования древесины в виде местного смятия в области шпонки (рисунки 3, 4). Разрушение образца 1 произошло при сдвигающем усилии равном 25 кН, образца 2 – 7,5 кН. Расхождение между результатами свидетельствует, что существенное влияние в прочности данного вида соединения оказывают физико-механические характеристики бетона.

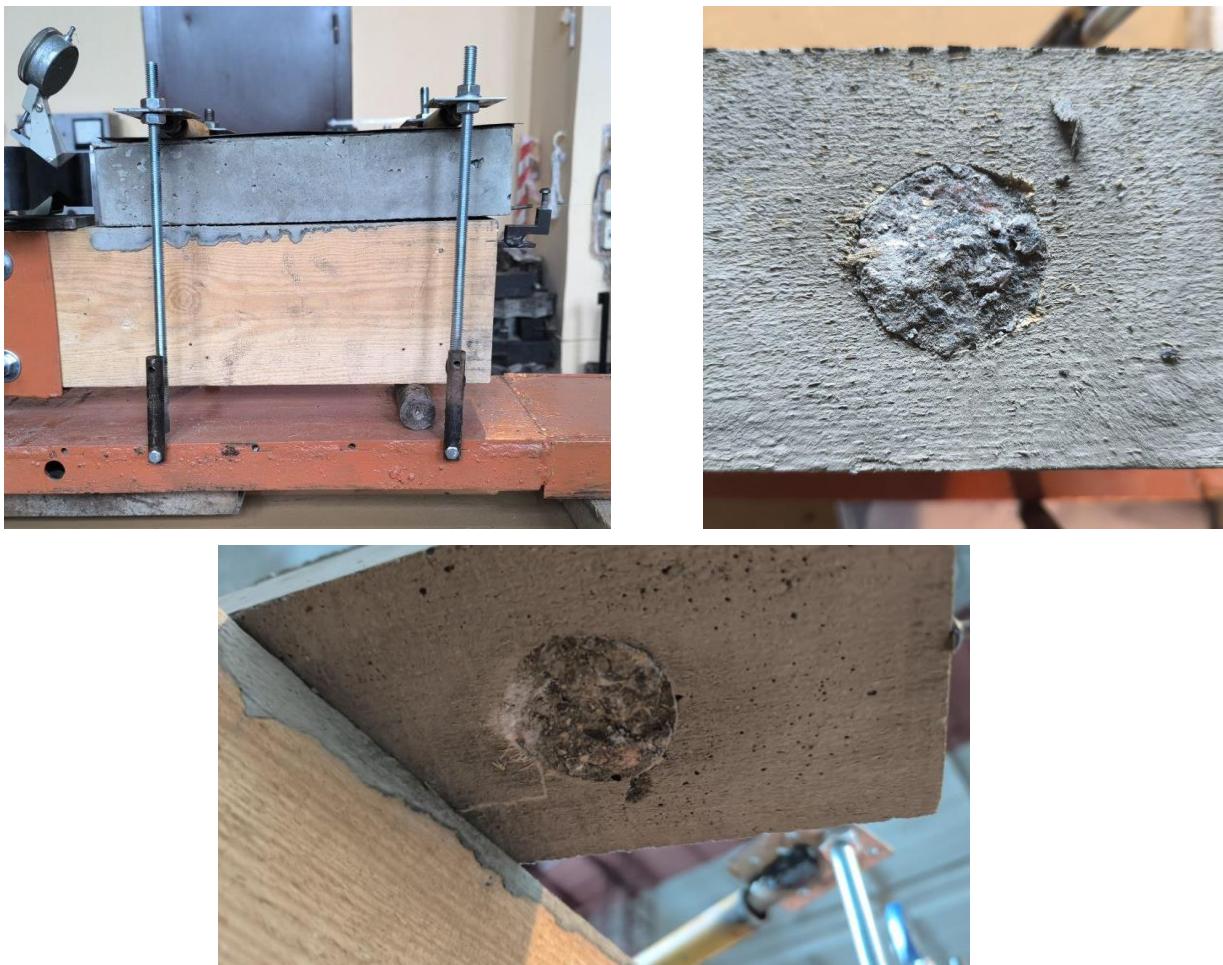


Рисунок 3. – Общий вид образца 1 после разрушения



Рисунок 4. – Общий вид образца 2 после разрушения

Предварительные экспериментальные исследования позволили сделать вывод об эффективности рассматриваемого вида соединения. Разрушение бетонной шпонки при срезе оказалось определяющим фактором при оценке прочности соединения, что позволяет использовать основные предпосылки методики оценки прочности при изгибе с учетом сдвига деревянных конструкций [10].

Разработанная методика [10] предполагает проводить оценку возникающего при изгибе сдвигающего усилия в контактной зоне бетона и древесины, рассматривая опасные поперечные сечения (в данном случае сечения с бетонными шпонками) по длине элемента. Нормальные напряжения при сжатии и растяжении в любых точках деревобетонной конструкции по длине определяются по деформационной модели [11; 12].

Исходя из вышесказанного, применительно к деревобетонным изгибающим конструкциям учет сдвига может быть осуществлен следующим образом: при известном распределении нормальных напряжений по высоте рассматриваемого поперечного сечения определяются сдвигающие усилия при заданном загружении  $T_E$ , Н:

$$T_E = \sum (\sigma_{w,i} \cdot h_{w,i} + \sigma_{c,i} \cdot h_{c,i}) \cdot b, \quad (1)$$

где  $\sigma_{w,i}, \sigma_{c,i}$  – нормальные напряжения сжатия в середине  $i$ -й элементарной площадки рассматриваемого поперечного сечения элемента соответственно из древесины и бетона;

$h_{w,i}, h_{c,i}$  – линейный размер  $i$ -й элементарной площадки по высоте поперечного сечения соответственно из древесины и бетона;

$b$  – ширина элемента в рассматриваемом поперечном сечении.

Сдвигающее усилие сопротивления, воспринимаемое одной бетонной шпонкой в рассматриваемом поперечном сечении  $T_{R,i}$ :

$$T_{R,i} = \frac{\pi \cdot d_{sh}^2}{4} \cdot \tau_{Rd}, \quad (2)$$

где  $d_{sh}$  – диаметр бетонной шпонки;

$\tau_{Rd}$  – расчетное сопротивление бетона срезу.

Проверка прочности на сдвиг в рассматриваемом поперечном сечении изгибающего деревянного элемента при заданном загружении производится из условия (3), при этом при рассмотрении участков, на которых задействовано несколько бетонных шпонок, сдвигающее усилие  $T_R$  в рассматриваемом сечении определяется суммой всех сдвигающих усилий, воспринимаемых бетонными шпонками на данном участке:

$$T_E \leq T_R. \quad (3)$$

Невыполнение условия (3) для одного из поперечных сечений свидетельствует о разрушении элемента при сдвиге (т.е. срезе одной или нескольких бетонных шпонок).

**Заключение.** Проведенные исследования позволили сделать вывод об эффективности применения механического соединения бетона и древесины в виде бетонных шпонок круглого поперечного сечения. Апробированная методика экспериментальных исследований позволяет получить данные о прочности и деформативности соединения. Данные результатов исследования прочности контакта деревобетонных изгибающихся элементов позволяют применить методику расчета прочности деревобетонных изгибающихся элементов при сдвиге по контакту древесины и бетона на основе деформационной расчетной модели поперечных сечений, изложенную в [10].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ceccotti A. Composite concrete-timber structures // Progress in Structural Engineering and Materials. – 2002. – Vol. 4, iss. 3. – P. 264–275. DOI: 10.1002/pse.126.
2. Experimental study and numerical simulation of adhesively bonded timber-concrete composite panels: bending behavior, adhesive shear and peel stress distributions / A.N. Giv, Q. Fu, Z. Chen et al. // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 307. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117872.
3. Behavior of adhesively bonded engineered wood – wood chip concrete composite decks: Experimental and analytical studies / Q. Fu, L. Yan, T. Ning et al. // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118578.
4. Effects of concrete type, concrete surface conditions and wood species on interfacial properties of adhesively-bonded timber – concrete composite joints / Q. Fu, L. Yan, N.A. Thielker et al. // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2021. – Vol. 107. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102859.
5. Frohnmüller J, Fischer J, Seim W. Full-scale testing of adhesively bonded timberconcrete composite beams // Materials and Structures. – 2021. – Vol. 54. DOI: 10.1617/s11527-021-01766-y.
6. Push-out tests of wet-process adhesive-bonded beech timber-concrete and timber-polymer-concrete composite connections / M. Füchslin, P. Grönquist, S. Stucki et al. // WCTE. – 2023. – P. 3241–3247. DOI: 10.52202/069179-0422.
7. О развитии и совершенствовании деревобетонных мостов / В.А. Уткин, П.Н. Кобзев, Е.Е. Басич и др. // Вестник СибАДИ. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 296–318. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318.
8. Design and analysis of timber-concrete-based civil structures and its applications: a brief review / M. Hosseini, M. Gaff, J. Lair et al. // Advanced Materials Science. – 2023. – Vol. 62, iss. 1. DOI: 10.1515/rams-2022-0321.
9. Гиль А.И., Лазовский Д.Н. Моделирование диаграмм деформирования древесины при одноосном кратковременном сжатии и растяжении // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: сб. материалов IX междунар. науч.-практ. конф., приуроченной к 120-летию со дня рождения К.А. Артемьева, Омск, 21–22 ноября 2024 г. / СибАДИ; редкол.: А.П. Жигадло (отв. ред.) и др. – Омск: СибАДИ, 2024. – С. 466–471.
10. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов с учетом сдвига // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20, № 8. – С. 1187–1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198.

11. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Диаграммный подход при расчете деревянных конструкций по СП 5.05.01-2021. – Вестник БГТУ. – 2024. – № 2(134). – С. 66–72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72.
12. Lazovskiy D.N., Hil A.I., Genina E.E. Modeling of the Stress-strain State of Bent Concrete Elements with Composite Rod Reinforcement // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2025. – № 3(67). – P. 6–15. DOI: 10.36622/2542-0526.2025.67.3.001.

## REFERENCES

1. Ceccotti, A. (2002). Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 264–275. DOI: 10.1002/pse.126.
2. Giv A.N. et al. Experimental study and numerical simulation of adhesively bonded timber-concrete composite panels: bending behavior, adhesive shear and peel stress distributions // *Engineering Structures*. – 2024. – Vol. 307. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117872.
3. Fu, Q., Yan, L., Ning, T., Wang, B., & Kasal, B. Behavior of adhesively bonded engineered wood – wood chip concrete composite decks: Experimental and analytical studies // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118578.
4. Fu, Q., Yan, L., Thielker, N.A., & Kasal, B. Effects of concrete type, concrete surface conditions and wood species on interfacial properties of adhesively-bonded timber – concrete composite joints // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2021. – Vol. 107. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102859.
5. Frohnmüller, J., Fischer, J., Seim, W. Full-scale testing of adhesively bonded timberconcrete composite beams // *Materials and Structures*. – 2021. – Vol. 54. DOI: 10.1617/s11527-021-01766-y.
6. Füchslin, M., Grönquist, P., Stucki, S., Mamie, T., Kelch, S., Burgert, I., & Andrea Frangi, A. Push-out tests of wet-process adhesive-bonded beech timber-concrete and timber-polymer-concrete composite connections // *WCTE*. – 2023. – P. 3241–3247. DOI: 10.5220/069179-0422.
7. Utkin, V.A., Kobzev, P.N., Basich, E.E., & Skiba, V.V. O razvitiu i sovershenstvovanii derevobetonnyx mostov // *Vestnik SibADI*. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 296–318. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Hosseini, M., Gaff, M., Lair, J., Hui, D., Haitao, L., Hosseini, A., Ghosh, P., & Jian, B. Design and analysis of timber-concrete-based civil structures and its applications: a brief review // *Advanced Materials Science*. – 2023. – Vol. 62, iss. 1. DOI: 10.1515/rams-2022-0321.
9. Gil', A.I., & Lazovskij D.N. Modelirovanie diagramm deformirovaniya drevesiny pri odnoosnom kratkovremennom szhatii i rastyazhenii // *Arxitekturno-stroitel'nyj i dorozhno-transportnyj kompleksy: problemy, perspektivy, innovacii [E'lektronnyj resurs]*: sb. materialov IX mezhdunar. nauch.-prakt. konf., priurochennoj k 120-letiyu so dnya rozhdeniya K.A. Artem'eva, Omsk, 21–22 noyabrya 2024 g. / SibADI; redkol.: A.P. Zhigadlo (otv. red.) i dr. – Omsk: SiBADI, 2024. – S. 466–471. (In Russ.).
10. Lazovskij, D.N., Gil', A.I., & Gluxov, D.O. Deformacionnyj podxod k raschetu prochnosti pri poperechnom izgibe derevyannyx elementov c uchetom sdviga // *Vestnik MGSU*. – 2025. – Т. 20, № 8. – С. 1187–1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Lazovskij, D.N., Gil', A.I., & Gluxov, D.O. Diagramnyj podxod pri raschete derevyannyx konstrukcij po SP 5.05.01-2021 // *Vestnik BrGTU*. – 2024. – № 2(134). – С. 66–72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Lazovskiy, D.N., Hil, A.I., & Genina, E.E. Modeling of the Stress-strain State of Bent Concrete Elements with Composite Rod Reinforcement // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. – 2025. – № 3(67). – P. 6–15. DOI: 10.36622/2542-0526.2025.67.3.001.

Поступила 01.09.2025

## PROSPECTS FOR THE USE OF MECHANICAL JOINTS IN THE FORM OF CONCRETE DOWELS IN WOOD-CONCRETE STRUCTURES

**D. LAZOUSKI, A. HIL, A. KHATKEVICH, G. TSIPAN**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The main mechanical joints of wood and concrete in wood-concrete structures are considered, and a type of connection is proposed by means of concrete dowels formed during concreting of a wooden element with a drilled hole. A methodology for conducting experimental studies and a special test bench for determining the strength and deformability of samples during shear has been developed, which makes it possible to simulate the operation of a wood-concrete element during bending. Samples of wood-concrete structures have been manufactured and tested. The destruction of the sample (complete displacement of concrete relative to wood) occurred according to a brittle pattern due to the cut of the concrete dowel along the contact line of wood and concrete. The analysis of the results showed that the strength of concrete and the geometric dimensions of the cross-section of concrete dowels have a significant effect on the strength of the considered type of joint. A method for calculating the strength of wood-concrete bendable elements during shear along the contact of wood and concrete, based on the positions of the deformation calculation model, is proposed. The conducted studies have led to the conclusion about the effectiveness of the mechanical connection of concrete and wood in the form of concrete dowels of circular cross-section and the need for additional experimental and theoretical studies in composite wood-concrete bendable elements.

**Keywords:** wood-concrete structures, shear, experimental studies, test bench, deformation model.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ  
ОБРУШЕНИЮ ЗДАНИЯ 10-ЭТАЖНОГО ПАНЕЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА  
С УВЕЛИЧЕННЫМ ШАГОМ ПОПЕРЕЧНЫХ НЕСУЩИХ СТЕН**

д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ<sup>1)</sup>,

канд. техн. наук, доц. А.М. ХАТКЕВИЧ<sup>2)</sup>, А.Л. МАТЛАХОВ<sup>3)</sup>

<sup>(1), 2)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

<sup>3)</sup> УП «Институт Витебскгражданпроект»)

<sup>1)</sup> d.lazovski@psu.by, <sup>2)</sup> a.khatkevich@psu.by, <sup>3)</sup> vit@vgp.by

*Представлены результаты практического применения метода «локальной» прочности при линейном статическом расчете внутренних усилий конструктивных элементов при измененной расчетной схеме и нелинейном анализе поперечных сечений конструктивных элементов панельного здания жилого дома с увеличенным шагом поперечных стен и петлевыми соединениями смежных плит перекрытий в местах платформенных стыков.*

*Проведенное исследование конструктивной системы здания 10-этажного 2-секционного многоквартирного жилого дома с шагом несущих стен 6,4 м показывает соответствие требованиям нормативных документов по прочности и устойчивости в обычной расчетной ситуации и против прогрессирующего обрушения в особой расчетной ситуации.*

**Ключевые слова:** прогрессирующее обрушение, линейный статический расчет внутренних усилий, нелинейный анализ поперечных сечений, исходная расчетная схема, модифицированная расчетная схема.

**Введение.** Термин «прогрессирующее обрушение» впервые появился и стал широко использоваться в инженерной и строительной практике после 1968 года. Это было связано с расследованием причин обрушения 22-этажного жилого здания Ронан Пойнт (Ronan Point) в Лондоне. Взрыв бытового газа на 18-м этаже этого панельного дома привел к разрушению несущих стеновых панелей и плит перекрытия. Это вызвало цепную реакцию, в результате которой обрушилась вся угловая часть здания – с 18-го по 4-й этажи. Последующее официальное расследование этой катастрофы и ввело в обиход термин «прогрессирующее обрушение» для описания механизма последовательного разрушения, когда выход из строя одного элемента приводит к лавинообразному разрушению других [1–3].

Прогрессирующее обрушение жилых зданий может быть вызвано многими факторами:

- взрывы бытового газа или взрывчатки;
- удары транспортных средств или летающих аппаратов;
- землетрясения;
- ошибки проектирования или строительства.

При дальнейшем рассмотрении этой проблематики в части определения критериев нормирования уровня устойчивости зданий и сооружений при возникновении подобных ситуаций был введен термин «непропорциональное разрушение» (disproportionate collapse) и его характеристика – объем сооружения или площадь здания, которые могут разрушиться при разрушении или выходе из строя (любого) каждого отдельного несущего элемента. В настоящее время именно величина непропорционального разрушения в виде допустимой суммарной площади участков этажей рядом с местом локального разрушения элемента нормируется в европейских странах – в ЕвроКоде и соответствующих ему национальных стандартах, строительных законах и строительных нормах<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> BS EN 1990:2002 Eurocode. Basis of structural design. (ЕвроКод. Общие положения проектирования конструкций).

СТБ ЕН 1990-2007. ЕвроКод. Основы проектирования несущих конструкций.

BS EN 1991-1-7:2006. Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Accidental actions. (ЕвроКод 1. Нагрузки на конструкции. Основные нагрузки. Случайные воздействия).

DIN 1055-100. Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Grundlagen der Tragwerkspannung Sicherheitskonzept und Bemessungsressen. (Воздействия на несущие конструкции. Часть 100: Основы расчета, концепции безопасности и правила определения размеров). – DIN, 2001.

Building regulations 2000 (England and Wales). Approved document A. Structure. (Строительные нормы Англии и Уэльса. Свод правил А. Конструкции).

International Code Council Performance Code for Buildings and Facilities. (Функциональные нормы для зданий и сооружений Совета по международным нормам). – ICC, 2009.

В российской и белорусской практике в нормативной и методической литературе в основном используется только термин «защита от прогрессирующего обрушения» и не приводятся другие возможные подходы к обеспечению надежности зданий и сооружений<sup>2,3,4,5,6,7</sup>.

Конструктивная система жилых панельных зданий должна быть защищена от прогрессирующего обрушения в случае локального разрушения ее несущих конструктивных элементов при аварийных воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации зданий, с целью обеспечения безопасности людей и сохранности их имущества<sup>8</sup>. Это требование означает, что в случае аварийных воздействий для панельных зданий полное или частичное разрушение отдельных стен в пределах одного этажа и двух смежных осей здания не должно приводить к обрушению или к разрушению конструкций, на которые передается нагрузка, ранее воспринимавшаяся элементами, поврежденными аварийным воздействием.

Панельные здания, как правило, имеют недостаточную связность элементов и низкую пластичность соединений, отсутствие совместной работы плит перекрытий смежных пролетов в месте платформенных стыков со стенами, что увеличивает риск прогрессирующего обрушения. Наиболее опасными зонами являются наружные и внутренние стены, ослабленные проемами (балконы, лоджии, дверные проемы, лестничные клетки), плиты перекрытия с разрезной схемой работы, не связанные между собой и со стенами, отдельно стоящие стены и перекрытия лоджий, не имеющие достаточных связей с несущими конструкциями здания.

Современные нормативные документы<sup>9</sup> требуют обеспечения устойчивости зданий к прогрессирующему обрушению через: рациональное конструктивно-планировочное решение (избегание изолированных пилонондов, обеспечение непрерывности арматуры и связей между элементами); конструктивные меры (усиление связей между панелями, использование пластичных соединений, способных перераспределять нагрузки при локальных разрушениях, размещение периметрических связей); расчет на особое сочетание воздействий (включение кроме действующих нагрузок также гипотетического локального разрушения несущих элементов с изменением расчетной схемы здания).

Для расчетов конструкций используются следующие методы<sup>10</sup>:

- проверка «локальной» прочности (обеспечение сопротивления отдельного конструктивного элемента локальному разрушению при особом воздействии);
- разработка альтернативных путей передачи усилий на другие конструктивные элементы после внезапного динамического разрушения отдельного конструктивного элемента.

Внутренние усилия в конструкциях здания после выключения локального конструктивного элемента определяются следующими методами:

- линейным статическим анализом при особом сочетании воздействий с применением нагрузочного повышающего коэффициента  $LIF$ , учитывающего динамические и нелинейные эффекты, возникающие при внезапном приложении выше расположенных гравитационных нагрузок, включая собственный вес разрушенного локального элемента;
- нелинейным статическим анализом с врезкой пластических шарниров в сечениях конструктивных элементов;
- нелинейным динамическим анализом с заданием истории нагружения и коэффициентов демпфирования с учетом характеристик материалов конструктивных элементов здания при динамических воздействиях.

Имеется значительное количество исследований устойчивости к прогрессирующему обрушению зданий и сооружений с различными конструктивными схемами с применением разных методов расчета [5–11].

Цель настоящего исследования – на конкретном примере продемонстрировать применимость метода «локальной» прочности при линейном статическом расчете внутренних усилий конструктивных элементов при измененной расчетной схеме и нелинейном анализе поперечных сечений конструктивных элементов панельного здания жилого дома с увеличенным шагом поперечных стен и петлевыми соединениями смежных плит перекрытий в местах платформенных стыков.

<sup>2</sup> Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Методическое пособие // М-во стр-ва и жил.-коммун. хоз-ва РФ. – М., 2018. – 157 с.

<sup>3</sup> СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения // М-во стр-ва и жил.-коммун. хоз-ва РФ. – М., 2021. – 29 с.

<sup>4</sup> СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

<sup>5</sup> Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. – М., 1999. – 35 с.

<sup>6</sup> ТКП EN 1991-1-7-2009. Воздействия на конструкции. Еврокод 1. Часть 1–7. Общие воздействия. Особые воздействия. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 58 с.

<sup>7</sup> СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 61 с.

<sup>8</sup> См. сноску 4.

<sup>9</sup> См. сноски 3–5.

<sup>10</sup> См. сноску 4.

**Конструктивная система здания и его конечно-элементная модель.** По конструктивному исполнению здание двухсекционного 10-этажного жилого дома является крупнопанельным с несущими поперечными стеновыми панелями высотой 2560 мм, сборными многопустотными плитами перекрытия шириной 1500 мм длиной 3200 мм и 6400 мм, продольными наружными стенами и перегородками из мелкоразмерных элементов в виде ячеистобетонных блоков с опиранием на плиты перекрытия с платформенным стыком (защемлением плит перекрытий в местах опирания и обеспечением неразрезности) (рисунок 1).

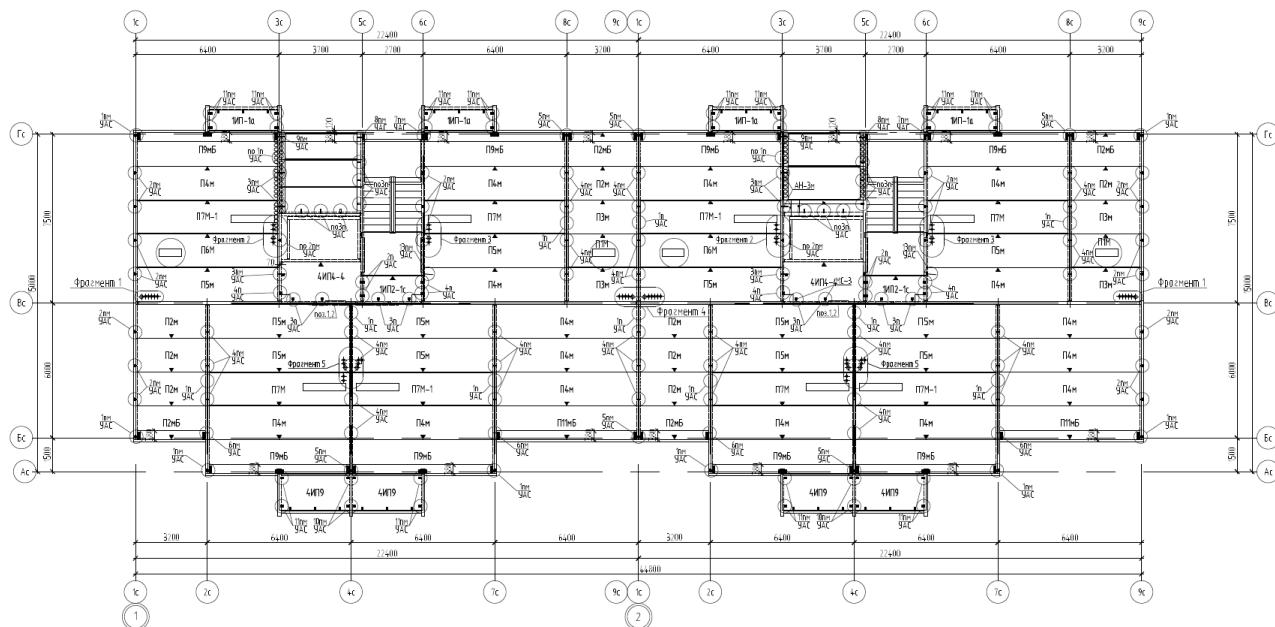


Рисунок 1. – Схема перекрытий типового этажа 10-этажного здания жилого дома

Неразрезность плит перекрытия на опорах шириной 160 мм (толщина стеновой панели), согласно принятой конструктивной схеме, обеспечивается устройством петлевого стыка верхней и нижней надопорной арматуры с продольным арматурным стержнем, установленным в петли плит на крайней опоре и смежных плит на средней опоре (рисунок 2).

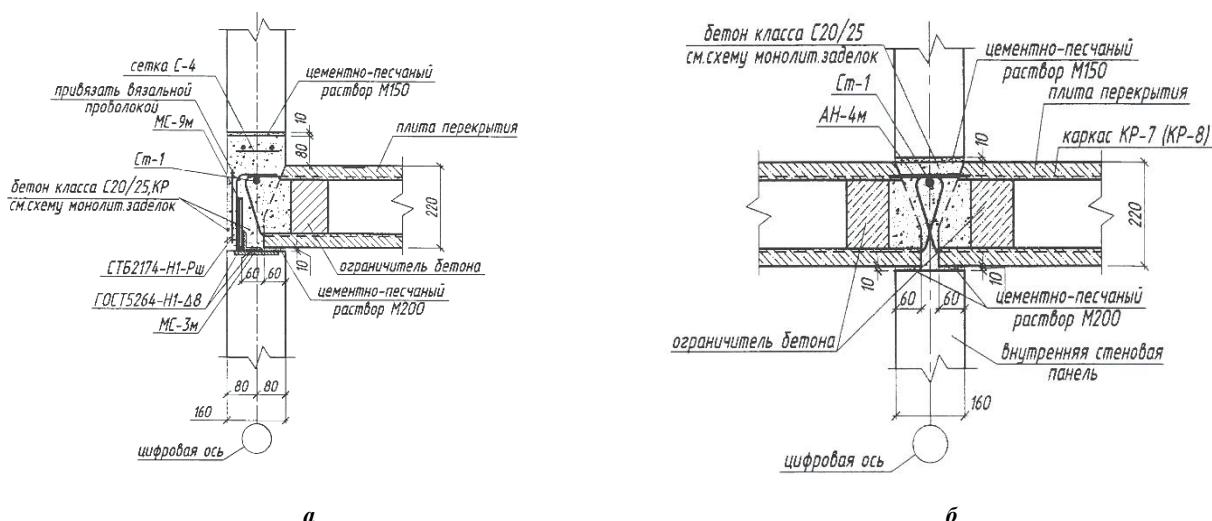


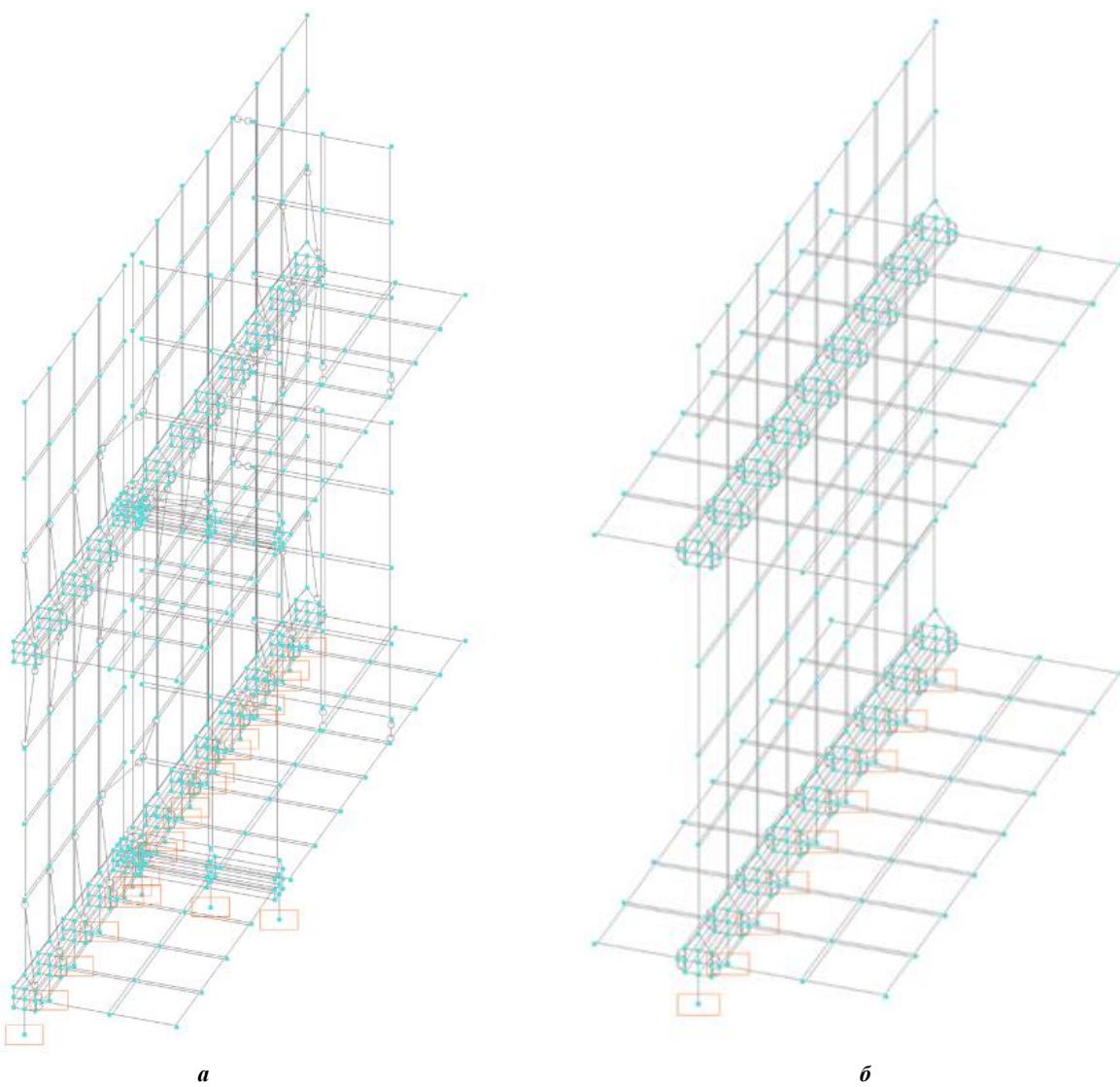
Рисунок 2. – Петлевое соединение плит перекрытия на крайней (а) и средней (б) опорах

Петлевые стыки арматуры известны как стыки растянутых элементов сборных железобетонных ферм академика Г.П. Передерия. В дальнейшем подобный тип стыка был применен для соединения растянутой арматуры изгибающихся железобетонных элементов<sup>11</sup>, сборных панелей крупнопанельных зданий [12–15].

<sup>11</sup> ГОСТ Р 70447-2022. Железобетонные конструкции с петлевыми стыками арматуры для объектов использования атомной энергии. Требования к конструированию и расчету // Национальный стандарт Российской Федерации. – М., 2022. – 23 с.

Петлевой стык арматуры железобетонных конструкций представляет собой соединение двух или более стыкуемых арматурных каркасов путем пересечения встречных петель стержневой арматуры, как правило, круглого очертания, между петлями которых образуется бетонное ядро, передающее усилия с одной части элемента на другую или с одного элемента железобетонной конструкции на другой. Особенностью рассматриваемой конструкции петлевого стыка является его треугольное очертание по технологическим условиям, уменьшающее площадь поперечного сечения бетонного ядра, в сравнении с круглым очертанием. Для усиления треугольного петлевого стыка предусмотрено размещение в уменьшенном бетонном ядре продольного арматурного стержня.

В конечно-элементной модели здания жилого дома поперечные наружные и внутренние железобетонные стеновые панели, а также перекрытия из железобетонных многопустотных плит моделируем плоскими конечными элементами, жестко соединенными в узлах опирания с железобетонной монолитной заделкой по длине стыка, шириной, равной толщине стеновой панели. Железобетонную монолитную заделку в расчетной модели здания принимаем в виде объемных конечных элементов (рисунок 3).



**Рисунок 3. – Модель стыкового соединения плит перекрытий со стеновыми панелями на крайней (а) и средней (б) опорах**

В исследуемой конструктивной схеме здания отдельно стоящие стеновые пилоны лоджий связаны между собой плитами перекрытий и балконными экранами в виде жесткой связи между вертикальными пилонами лоджий, соединенными с ними в углах экранов. Кроме того, предусмотрены не менее двух гибких связей по длине плит перекрытий лоджий с плитами перекрытий этажей здания. При этом закладные детали экранов лоджий соединены сваркой с продольной арматурой экрана. Пространственная конечно-элементная модель 10-этажного здания жилого дома представлена на рисунке 4.

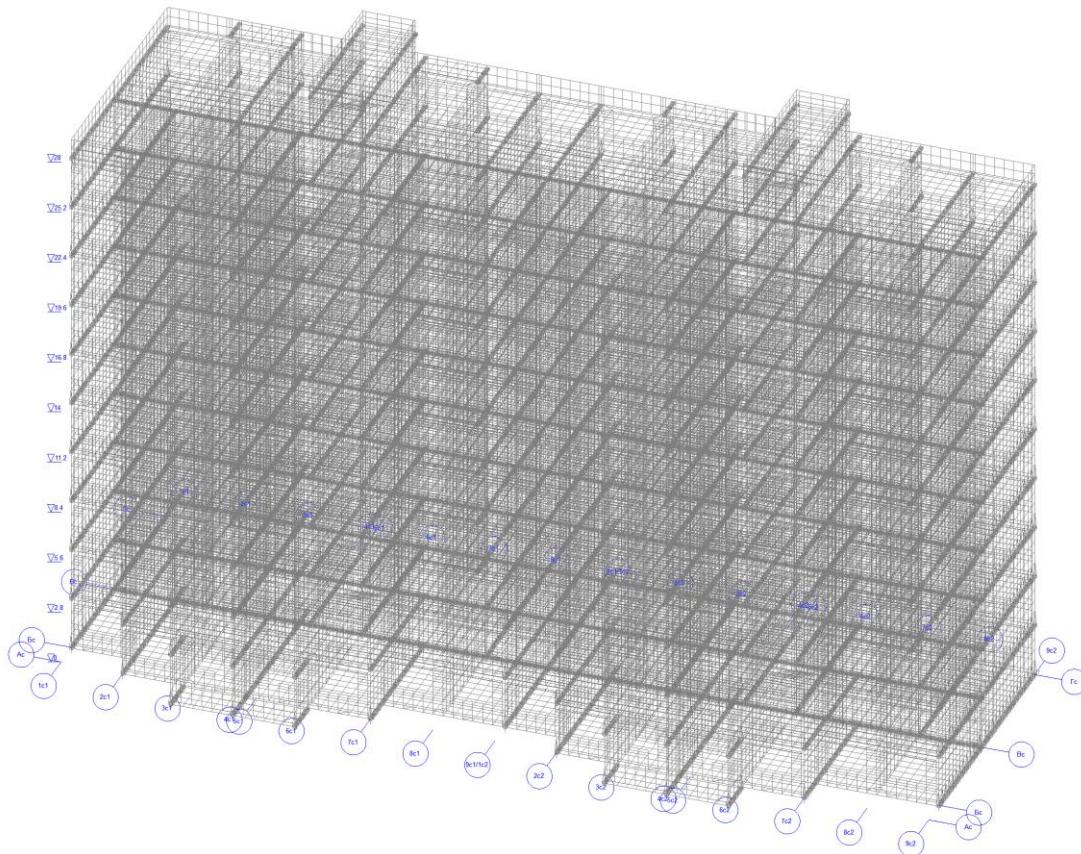


Рисунок 4. – Общий вид пространственной конечно-элементной модели здания 10-этажного жилого дома

**Методика расчета на устойчивость к прогрессирующему обрушению.** Конструктивная система жилых панельных зданий должна быть защищена от прогрессирующего обрушения в случае локального разрушения ее несущих конструкций при аварийных воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации зданий (взрывы, пожары, ударные воздействия транспортных средств и т.п.)<sup>12</sup>. Это требование означает, что в случае аварийных воздействий допускаются локальные разрушения несущих конструкций (полное или частичное разрушение отдельных стен в пределах одного этажа и двух смежных осей здания), но эти первичные разрушения не должны приводить к обрушению или к разрушению конструкций, на которые передается нагрузка, ранее воспринимавшаяся элементами, поврежденными аварийным воздействием.

Конструктивная система здания должна обеспечивать его прочность и устойчивость в случае локального разрушения несущих конструкций, как минимум на время, необходимое для эвакуации людей. Перемещение конструкций и раскрытие в них трещин в рассматриваемой чрезвычайной ситуации не ограничивается.

Стратегия устойчивости к прогрессирующему обрушению определяется классом здания жилого дома по последствиям обрушения<sup>13</sup>: 3 класс (многоквартирные жилые здания высотой более 4-х этажей). Коэффициент риска: для многоквартирного здания ( $N=1$ ); высотой от 10 до 30 м, расположенного в небольшом городе (г. Орша Витебской области) ( $E=0,3$ ); более 3-х этажей, с возможным большим скоплением людей ( $S=3$ ); в здании жилого дома, оборудованном природным газом, люди находятся более 18 ч/сут ( $C=0$ ); при обычном (нормальном) характере разрушения слабейшего элемента (несущей стеновой панели) ( $D=0$ ):

$$RF=N+E+S-C-D=1+0,3+3-0-0=\mathbf{4,3>4}.$$

Стратегия проверки устойчивости конструктивной системы рассматриваемого здания жилого дома к прогрессирующему обрушению состоит в следующем:

- 1) проверка предельных состояний несущей способности элементов конструктивной системы здания на восприятие воздействий *в обычной расчетной ситуации*;
- 2) проверка конструктивной системы здания расчетом на вынужденное удаление ключевого элемента (KE) (поддерживающей стеновой панели или любого другого фрагмента несущей стены (единовременно удаление только одного элемента для каждого этажа здания)) и сохранение живучести модифицированной конструктивной системы (несущая способность и общая устойчивость) *в особой расчетной ситуации*;

<sup>12</sup> См. сноска 5.

<sup>13</sup> См. сноска 6.

3) проверка (КЕ) предельного состояния несущей способности, в том числе при действии *особой нагрузки*  $A_d = 34 \text{ кПа}$  (по всем направлениям) или  $34 \text{ кН/м}$  – для конструктивного элемента;

4) анализ рисков для здания жилого дома, включая идентификацию явных и неявных угроз и рекомендации по выполнению узлов сопряжения элементов.

Расчетные сочетания воздействий при проверке предельных состояний несущей способности элементов конструктивной системы здания на восприятие воздействий в *обычной расчетной ситуации* составляются с учетом частных коэффициентов безопасности и коэффициентов сочетания воздействий<sup>14</sup>. При этом к материалам элементов конструктивной системы здания вводятся соответствующие виду проверки частные коэффициенты безопасности.

Расчетные сочетания воздействий проверки критериев обеспечения несущей способности и общей устойчивости конструктивной системы здания при расчете на прогрессирующее обрушение составляются с частными коэффициентами безопасности и коэффициентами сочетания воздействий в соответствии с приложением Ж СП 5.03.01-2020<sup>15</sup>. При этом при выполнении проверки устойчивости к прогрессирующему обрушению к материалам элементов конструктивной системы здания вводятся модифицированные частные коэффициенты безопасности.

Расчетные сочетания при проверке критериев обеспечения несущей способности отдельной конструкции (КЕ), непосредственно воспринимающей особое воздействие, составляются с частными коэффициентами безопасности и коэффициентами сочетания воздействий.

Проверку предельных состояний несущей способности элементов конструктивной системы здания на восприятие воздействий в *обычной расчетной ситуации* выполняем, используя пространственную расчетную модель в линейной постановке для статического расчета усилий в конструктивных элементах и проверке несущей способности на основе нелинейной деформационной расчетной модели (НДМ) поперечных сечений.

Для расчета модифицированных конструктивных систем с удаленными элементами (КЕ) используют пространственные расчетные модели с линейным статическим анализом усилий традиционным методом с врезкой дискретных пластических шарниров в сечениях, где изгибающие моменты достигают предельных значений. Полная расчетная нагрузка для особого сочетания воздействий прикладывается одновременно ко всем элементам модифицированной конструктивной системы с удаленным вертикальным несущим элементом. Полученные внутренние усилия из рассмотрения модифицированной расчетной схемы сравниваются с модифицированной предельной несущей способностью поперечных сечений конструктивных элементов, полученной из НДМ с модифицированными расчетными сопротивлениями материалов конструктивных элементов здания (повышающие коэффициенты к прочности бетона ( $1,25 \cdot f_{cd}$ ) и арматуры ( $1,25 \cdot f_{yd}$ )). Расчетные сопротивления прокатной стали принимают с коэффициентом условий работы для пластичных сталей<sup>16</sup> ( $1,1 \cdot f_{yd}$ ).

В модифицированной расчетной схеме к участкам перекрытия (покрытия), находящимся над удаляемым элементом, прикладывают квазистатическую повышенную нагрузку в соответствии с особым сочетанием умножением на нагрузочный повышающий коэффициент  $LIF$ , учитывающим динамические (инерционные) и нелинейные эффекты, возникающие при внезапном приложении гравитационной нагрузки. Значения нагрузочного повышающего коэффициента  $LIF$  определяют по соответствующим диаграммам «усилие – перемещение» (при линейном статическом расчете внутренних усилий приняли  $LIF=2$ ).

При анализе модифицированной конструктивной системы производят удаление участка стен длиной  $2H$  или равной расстоянию в свету между элементами, раскрепляющими ее и ограничивающими ее перемещение в поперечном направлении. Для каждого установленного на плане положения удаляемого конструктивного элемента отдельный расчет конструктивной системы выполняют, рассматривая следующие модифицированные расчетные схемы с удаленным элементом: на нижнем этаже; на верхнем этаже (под покрытием); на этаже, расположеннем в середине высоты здания.

Расчетные значения воздействий при проверках предельных состояний STR определены в соответствии с таблицей А.3 СН 2.01.01-2022<sup>17</sup>. Для постоянных воздействий коэффициент  $\gamma_{Gj.sup}$  принят 1,3 и 1,2. Для переменных воздействий коэффициент  $\gamma_Q$  принят: ветровых – 1,5; снеговых – 1,5; функциональных – 1,4. Коэффициент сочетания  $\psi_0$ : для функциональной нагрузки – 0,7; для снеговой и ветровой – 0,6. Все частные коэффициенты сочетаний воздействий учитываются при составлении комбинаций загружений: первое основное сочетание (STR); второе основное сочетание (STR); для проверок предельных состояний (GEO); для проверок предельных состояний (SLS) и прогрессирующего обрушения.

**Результаты проверки на устойчивость к прогрессирующему обрушению.** Проверка предельных состояний несущей способности, деформаций и трещиностойкости элементов конструктивной системы здания на восприятие воздействий в *обычной расчетной ситуации* выполнена с использованием пространственной расчетной модели в линейной постановке для статического расчета усилий в конструктивных элементах и проверке несущей

<sup>14</sup> См. сноска 7.

<sup>15</sup> См. сноска 4.

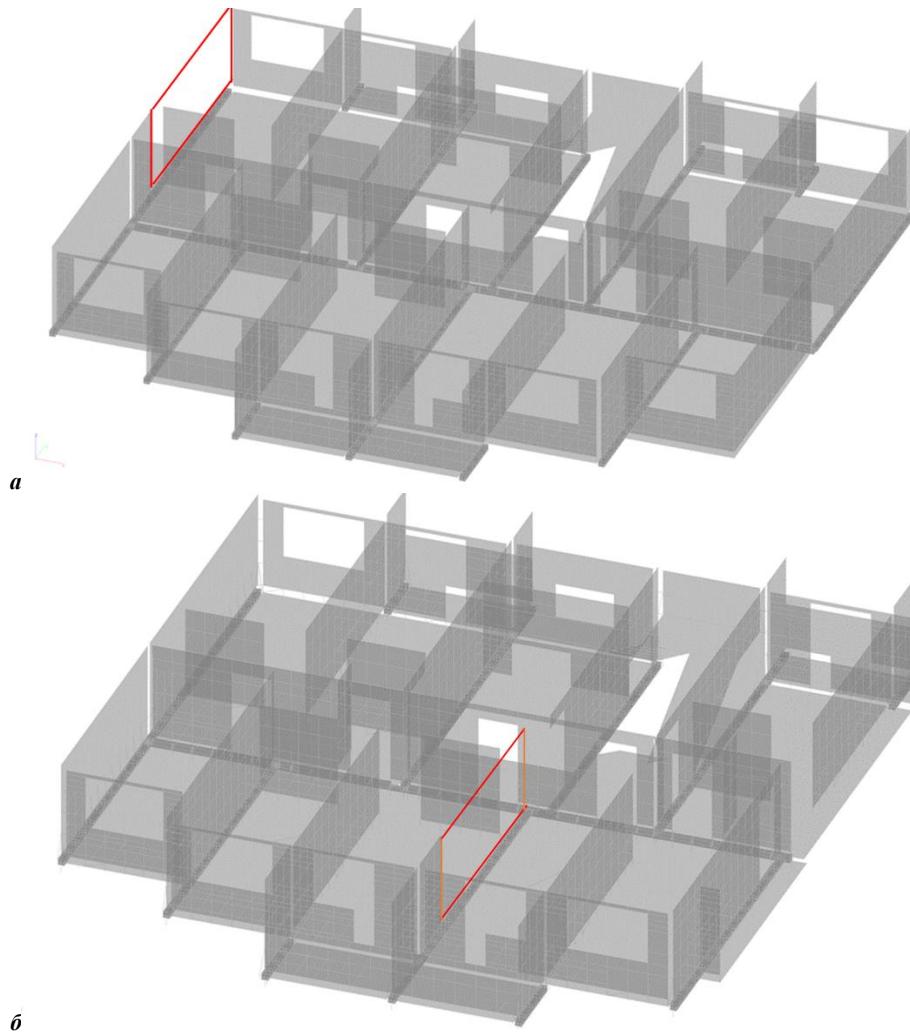
<sup>16</sup> См. сноска 5.

<sup>17</sup> См. сноска 7.

способности на основе: нелинейной деформационной расчетной модели (НДМ) поперечных сечений при действии изгибающих моментов и продольных усилий; ферменной аналогии при действии поперечных усилий. Проверка требований предельных состояний STR и SLS показала соответствие конструктивных элементов здания жилого дома предъявляемым требованиям. Кроме того, были вычислены нагрузки на фундамент от наземной части здания жилого дома для комбинации загружений GEO.

Проверка прочности соединения плит перекрытий над опорами в виде петлевого стыка, в котором петли арматуры создают бетонное ядро с учетом коэффициента повышения прочности бетона ядра стыка, равного 1,5, показала, что предельное усилие среза бетонного ядра  $N_{cl}$  превышает значение предельного усилия, выдерживаемого одним стержнем арматуры петлевого стыка при разрыве  $N_u$ .

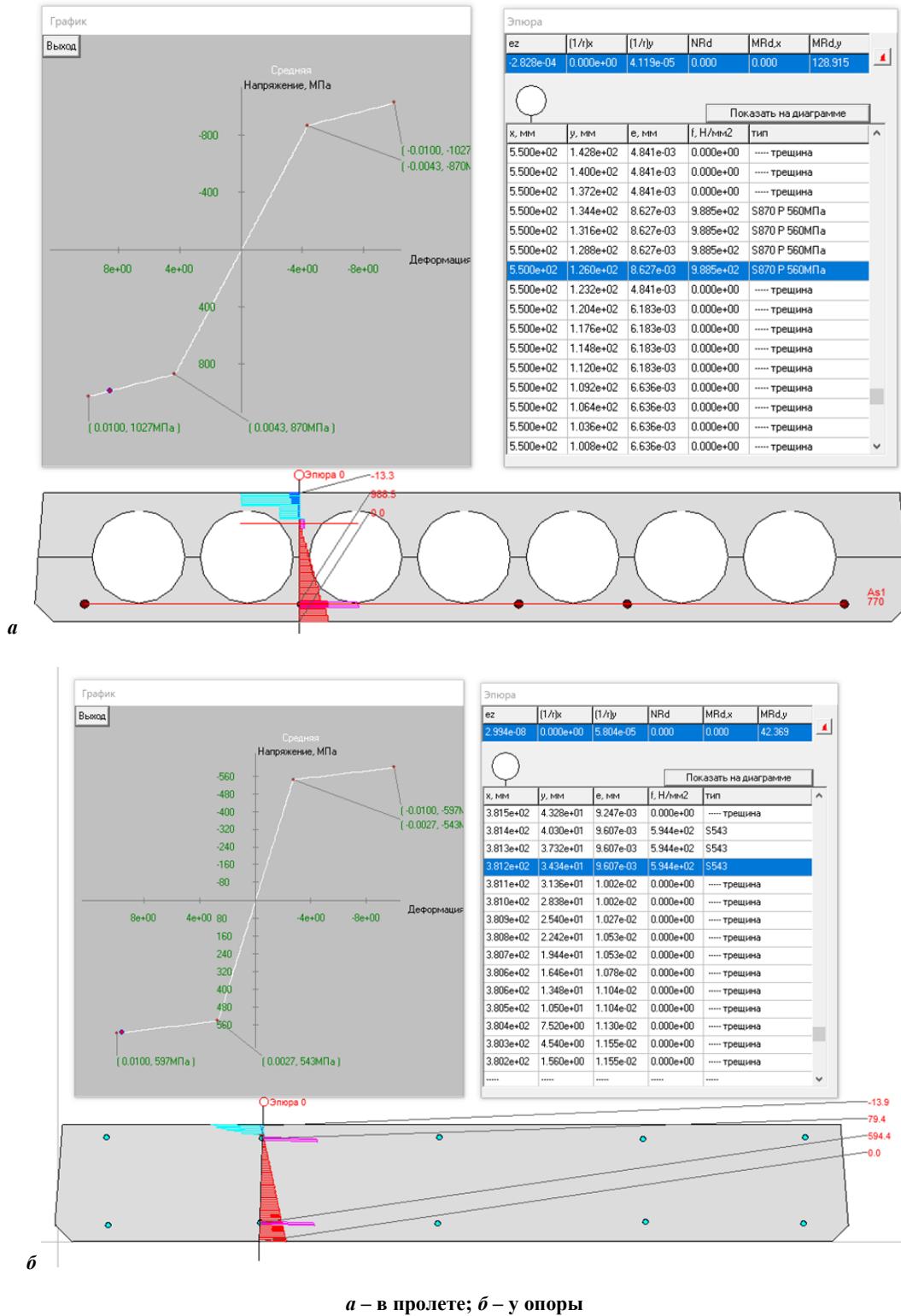
Наиболее нагруженной стеновой панелью обеих секций конструктивной системы жилого дома является: внутренняя панель по осям «4с1» и «4с2»; наружная панель по осям «1с1» и «9с2». Выполняем последовательно удаление участка стеновых панелей длиной 6 м ( $2H=2\cdot2,56=5,32$  м  $< 4\cdot1,5=6$  м (четыре плиты перекрытия шириной 1500 мм) на шести участках здания жилого дома. Для каждого положения удаляемого конструктивного элемента выполняем отдельный расчет конструктивной системы, рассматривая модифицированные расчетные схемы с удаленным элементом наружной и внутренней стены: на нижнем и верхнем этаже (под покрытием) и на этаже, расположенным в середине высоты здания. При этом на сопряжении удаленного участка с соседними плитами не учитываем влияние заполнения продольных швов между плитами перекрытий («клавишная» работа сборных плит перекрытий). Фрагмент модифицированной расчетной схемы здания жилого дома с удаленным участком наружной и внутренней стеновой панели этажей приведен на рисунке 5. При этом неразрезная конструкция плит перекрытия длиной 6,4 м теряет промежуточную опору и увеличивает их свободную длину до 12,8 м. В комбинациях загружений при статическом расчете внутренних усилий в элементах модифицированной расчетной схемы учитываются частные коэффициенты безопасности и сочетаний нагрузки в соответствии с принятой методикой.



*a – наружной по оси «1»; б – внутренней по оси «4с1»*

**Рисунок 5. – Фрагмент модифицированной расчетной схемы здания жилого дома с удаленным участком стеновой панели (выделен красным цветом) (1 этап)**

Полученные внутренние усилия из рассмотрения модифицированной расчетной схемы сравнивали с модифицированной предельной несущей способностью поперечных сечений конструктивных элементов, полученной из НДМ (рисунок 6) с модифицированными расчетными сопротивлениями материалами конструктивных элементов здания (повышающие коэффициенты к прочности бетона ( $1,25 \cdot f_{cd}$ ) и арматуры ( $1,25 \cdot f_{yd}$ )).



a – в пролете; б – опоры

Рисунок 6. – Результаты вычисления параметров напряженно-деформированного состояния плит перекрытий в предельной стадии (цифры на выносных линиях – нормальные напряжения в МПа; синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым – аналогично, нормальных напряжений; графики – диаграмма деформирования арматуры)

Учитывая, что основными усилиями в элементах, воспринимающих увеличенную нагрузку при удалении конструктивного элемента, являются изгибающие моменты, которые контролируются деформацией с учетом проверки способности сечений к пластическому повороту, расчетные усилия сравниваются с расчетным сопротивлением элемента, умноженным на нагрузочный повышающий коэффициент  $LIF$ , учитывающий расчетную деформативность элемента (при линейном расчете внутренних усилий  $LIF=2$ ).

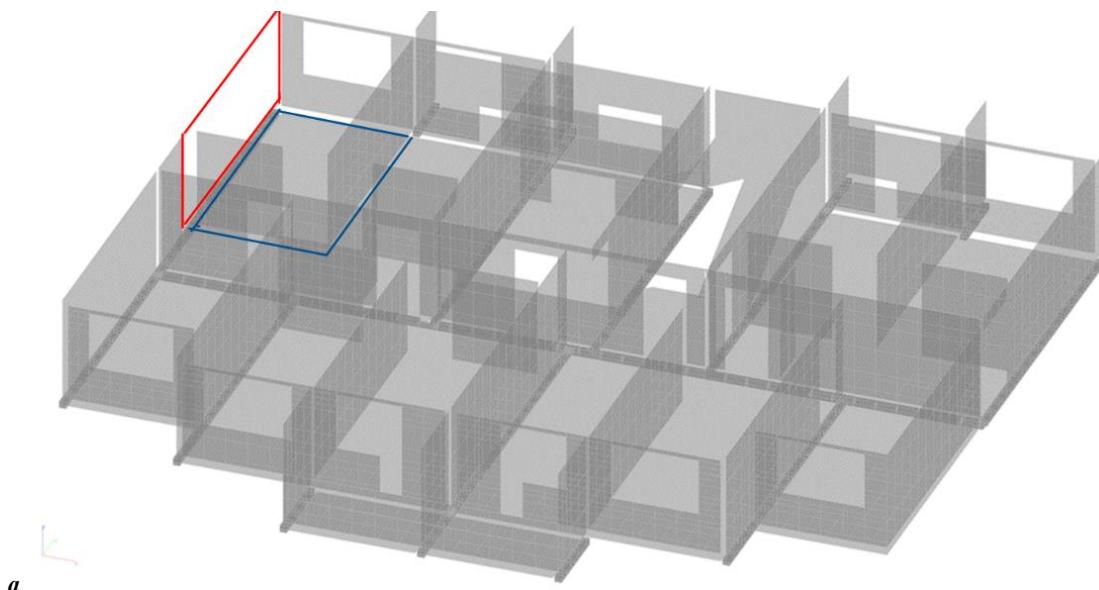
Проверка прочности плит перекрытий в зоне возможного обрушения с учетом пластической работы сечений в пролете ( $sp$ ) и на опорах ( $sup$ ) по всем вариантам удаления несущих элементов стен выполняется из условия пластического перераспределения усилий (угол пластического поворота сечений не превышает допустимого значения):  $M_{E\Sigma}=M_{Esp}+0,5\cdot(M_{Esup1}+M_{Esup2})\leq M_{R\Sigma}=[M_{Rsp}+0,5\cdot(M_{Rsup1}+M_{Rsup2})]/(b\cdot LIF)$ . Условие восприятия действующих усилий плитами перекрытий при обрушении КЕ в зоне обрушения для рассматриваемого здания жилого дома не выполняется.

Проверка прочности участков стеновых панелей в зоне удаления конструктивных элементов проводится сравнением нормальных вертикальных сжимающих напряжений рядом с удаленным участком КЕ и горизонтальных растягивающих напряжений над удаленным участком КЕ с их прочностью бетона соответственно при сжатии и растяжении (без учета их конструктивного продольного и поперечного армирования):  $\sigma_x\leq f_c/LIF$ ;  $\sigma_y\leq f_{cl}/LIF$ . Условие восприятия уменьшенным участком панели сжимающих усилий и отсутствия трещин нормального отрыва в стеновых панелях при удалении КЕ выполняется за исключением внутренних стеновых панелей первого и среднего по высоте здания этажей. При этом растягивающие усилия нижней зоны в стеновых панелях воспринимаются их продольным армированием и не угрожают обрушением.

В результате расчета на первом этапе всех вариантов возможной схемы обрушения конструктивного элемента в виде внутренней или наружной стеновых панелей установлено, что во всех вариантах возможного обрушения КЕ прочность не обеспечена.

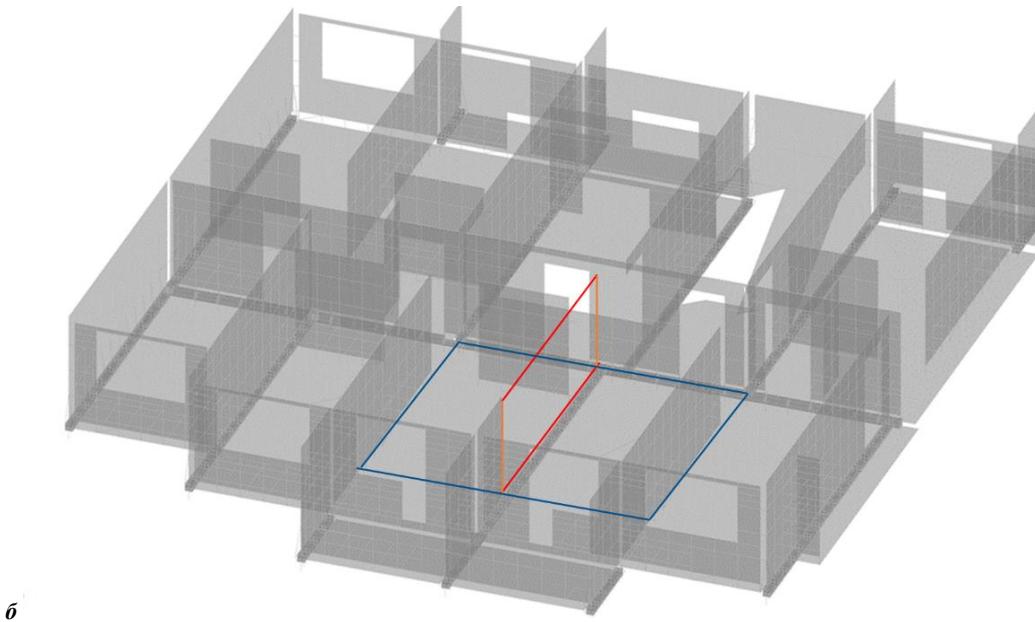
При возможном обрушении участка панелей перекрытия на нижележащий этаж выполнена проверка прочности плит перекрытия нижележащего этажа (в неразрезной конструкции с длиной плит 6,4 м в пролетах) в особой расчетной ситуации на втором этапе. При этом нагрузка от собственного веса, функциональная нагрузка от разрушающего участка передается как дополнительная на нижележащие плиты перекрытия (рисунок 7). Результаты проверки показали, что дальнейшего разрушения конструктивной системы здания жилого дома на вынужденное удаление ключевого элемента (КЕ) не происходит и сохраняется живучесть модифицированной конструктивной системы в особой расчетной ситуации. Повреждения носят локальный характер и ограничиваются разрушением плит перекрытий на участке над удаленным КЕ по всем шести вариантам расчета.

Согласно принятой методике расчета устойчивости к прогрессирующему разрушению выполнена проверка прочности внутренней и наружной стеновых панелей конструктивной системы здания жилого дома при действии **особой нагрузки** 34 кН/м – для конструктивного элемента по направлению: вертикально в плоскости элемента из условия  $\sigma_{Ed}\leq\sigma_{Rd}$  и горизонтально перпендикулярно плоскости КЕ из условия ( $M_{Ed}\leq M_{Rd}$ ).



*a – наружной по оси «1»*

**Рисунок 7. – Фрагмент модифицированной расчетной схемы здания жилого дома с удаленным участком стеновой панели (выделен красным цветом) и участком перекрытия, воспринимающим увеличенную нагрузку от разрушенного участка перекрытия (выделен синим цветом) (2 этап) (начало)**

**б – внутренней по оси «4с1»**

**Рисунок 7. – Фрагмент модифицированной расчетной схемы здания жилого дома с удаленным участком стеновой панели (выделен красным цветом) и участком перекрытия, воспринимающим увеличенную нагрузку от разрушенного участка перекрытия (выделен синим цветом) (2 этап) (окончание)**

**Анализ рисков для здания жилого дома.** В исследуемой конструктивной системе здания жилого дома стратегия управления рисками прогрессирующего обрушения направлена на создание неразрезности перекрытия и конструктивной целостности системы при полном расчете поврежденной конструктивной системы с учетом эффектов, которые не учитываются при традиционном проектировании (мембранные усилия в сборных перекрытиях с учетом заделки межплитных швов, большие углы поворота сечений и перемещения в результате пластического деформирования плит перекрытий в пролете и на опорах для полного перераспределения усилий и т.д.). Пластичность работы конструктивных элементов перекрытий в пролете и в зоне петлевого стыка данного объекта в предельной стадии обеспечивается применением арматуры класса деформативности не ниже В (таблица 6.7 СП 5.03.01-2020<sup>18</sup>).

Учитывая конструктивное исполнение петлевого стыка плит перекрытий смежных пролетов исследуемого объекта, исходя из конструктивных соображений, в бетонном ядре петлевого стыка арматуры предусмотрена установка дополнительной продольной арматуры. Дополнительная продольная арматура, устанавливаемая в бетонном ядре петлевых стыков арматуры, у открытых торцевых поверхностей, должна быть заанкерена за крайнюю продольную арматуру.

В исследуемой конструктивной системе стенные пилоны лоджий скреплены плитами перекрытий и балконными экранами посредством жесткой связи между вертикальными пилонами лоджий, соединенными с ними в углах экранов. Кроме того, предусмотрены не менее двух гибких связей по длине плит перекрытий лоджий с плитами перекрытий этажей здания. При этом закладные детали экранов лоджий следует соединять сваркой с продольной арматурой экрана. В проекте следует указать на недопустимость демонтажа балконных экранов в процессе эксплуатации зданий (например, при устройстве балконного остекления «в пол»). Названные мероприятия обеспечивают устойчивость конструкции лоджий при обычной и особой расчетной ситуации.

Для исследуемой конструктивной системы здания жилого дома нет необходимости применять сложные конструктивные решения, которые в свою очередь ведут к удорожанию объекта. Согласно проведенному исследованию увеличения прочности конструктивных элементов также не требуется.

**Заключение.** Проведенное исследование конструктивной системы здания 10-этажного 2-секционного много квартирного жилого дома с шагом несущих стен 6,4 м показывает соответствие требованиям по прочности и устойчивости в обычной расчетной ситуации и против прогрессирующего обрушения в особой расчетной ситуации.

На примере многоэтажного крупнопанельного здания жилого дома с увеличенным шагом поперечных стен и петлевыми соединениями смежных плит перекрытий в местах платформенных стыков продемонстрирована применимость метода «локальной» прочности при линейном статическом расчете внутренних усилий конструктивных элементов при измененной расчетной схеме и нелинейном анализе поперечных сечений конструктивных элементов панельного здания жилого дома.

<sup>18</sup> См. сноску 4.

## ЛИТЕРАТУРА

- Сергеев Д.Д. Краткий обзор отчета об аварии 22-этажного жилого дома в Лондоне. Обзорная информация № 2. – М.: ГлавАПУ, 1969. – 120 с.
- Тур В.В., Марковский Д.М., Тур А.В. Стратегия управления рисками прогрессирующего обрушения при проектировании зданий и сооружений // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2008. – № 1. – С. 185–190.
- Тур В.В. Оценка рисков конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 6. – С. 2–14.
- Краснощеков Ю.В. Расчет каркасного здания на прогрессирующее обрушение при аварийном отказе колонны // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – № 1(270). – С. 54–58.
- Краснощеков Ю.В. Защита от прогрессирующего обрушения зданий со сборными железобетонными перекрытиями // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 290–299. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299.
- Семашкин А.Д., Туснин А.Р., Бергер М.П. Способы расчета несущих конструкций на устойчивость к прогрессирующему разрушению // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 31–50. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3.
- Кирколуп Е.Р., Харламов И.В. Особенности расчета стальных каркасов одноэтажных производственных зданий на прогрессирующее обрушение квазистатическим методом // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 6. – С. 948–959. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6-948-959.
- Расчет на прогрессирующее обрушение большепролетных металлических конструкций покрытий / Д.Н. Лазовский, А.В. Поправко, Т.М. Пецольд и др. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. Строительство. – 2007. – № 6. – С. 29–35.
- Ефрюшин С.В., Саражинский А.С. Расчетный анализ конструктивных мероприятий по повышению устойчивости каркасного здания к прогрессирующему обрушению // Строительная механика и конструкции. – 2018. – № 2(17). – С. 97–110.
- Каньшина Е.А., Балдин И.В. Расчет блок-секции 9-этажного кирпичного дома с железобетонными сердечниками на прогрессирующее обрушение // Избранные доклады 65-й Юбилейной университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых: сборник докладов, Томск, 25 апреля 2019 года. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 60–63.
- Особенности расчета на прогрессирующее обрушение каркаса уникального здания многофункционального комплекса / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, А.К. Кущенко и др. // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 9(93). – С. 172–181.
- Киреева Э.И. Крупнопанельные здания с петлевыми соединениями конструкций // Жилищное строительство. – 2013. – № 9. – С. 47–51.
- Домасевич Р.В. Крупнопанельные здания с петлевыми соединениями конструкций // VII Международный студенческий строительный форум – 2022: сборник докладов VII Международного студенческого строительного форума, Белгород, 24 ноября 2022 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 120–124.
- Проектирование железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры в соответствии с ГОСТ Р 70447-2022 / К.В. Авдеев, А.Н. Болгов, С.А. Зенин и др. // Бетон и железобетон. – 2023. – Т. 618, № 4. – С. 18–27. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-4(618)-18-27.
- Петлевые стыки стержневой арматуры. История развития, проблемы и актуальность / К.В. Авдеев, А.Н. Мамин, В.В. Бобров и др. // Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. – 2022. – № 6(104). – С. 4–11. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11.

## REFERENCES

- Sergeev, D. (1969). *Kratkii obzor otcheta ob avari 22-etazhnogo zhilogo doma v Londone. Obzornaya informatsiya № 2.* M.: GlavAPU. (In Russ.).
- Tur, V., & Markovskii, D. (2008). Strategiya upravleniya riskami progressiruyushchego obrusheniya pri proektirovaniyu zdaniyu i sooruzheniyu. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, (1), 185–190. (In Russ.).
- Tur, V.V. (2009). Otsenka riskov konstruktivnykh sistem v osobykh raschetnykh situatsiyakh. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, (6), 2–14. (In Russ.).
- Krasnoshchekov, Yu.V. (2017). Raschet karkasnogo zdaniya na progressiruyushchee obrushenie pri avariinom otkaze kolonny. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*, 1(270), 54–58. (In Russ.).
- Krasnoshchekov, Yu.V. (2022). Zashchita ot progressiruyushchego obrusheniya zdaniyu so sbornymi zhelezobetonnymi perekrytiyami. *Vestnik Sibirskego gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 19(2), 290–299. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Semashkin, A.D., Tusnin, A.R., & Berger, M.P. (2023). Sposoby rascheta nesushchikh konstruktsii na ustoichivost' k progressiruyushchemu razrusheniyu. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*, 13(2), 31–50. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Kirkolup, E.R., & Kharlamov, I.V. (2024). Osobennosti rascheta stal'nykh karkasov odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy na progressiruyushchee obrushenie kvazistaticeskim metodom. *Vestnik Sibirskego gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 21(6), 948–959. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6-948-959. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Lazovskii, D.N., Popravko, A.V., Petsol'd, T.M., & Zhuravskii, V.Yu. (2007). Raschet na progressiruyushchee obrushenie bol'sheproletnykh metallicheskikh konstruktsii pokrytii. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*, (6), 29–35. (In Russ.).
- Efryushin, S.V., & Sarazhinskii, A.S. (2018). Raschetnyi analiz konstruktivnykh meropriyatiy po povysheniyu ustoichivosti karkasnogo zdaniya k progressiruyushchemu obrusheniyu. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktsii*, 2(17), 97–110. (In Russ.).
- Kan'shina, E.A., & Baldin, I.V. (2019). Raschet blok-sektsii 9-etazhnogo kirpichnogo doma s zhelezobetonnymi serdechnikami na progressiruyushchee obrushenie. *Izbrannye doklady 65-i Yubileinoi universitetskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh: sbornik dokladov*, Tomsk, 25 aprelya 2019 goda (60–63). Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi arhitekturno-stroitel'nyi universitet. (In Russ.).

11. Kravchenko, G.M., Trufanova, E.V., Kushchenko, A.K., & Bychenko, I.V. (2022). Osobennosti rascheta na progressiruyushchee obrushenie karkasa unikal'nogo zdaniya mnogofunktional'nogo kompleksa. *Inzhenernyi vestnik Doma*, 9(93), 172–181. (In Russ.).
12. Kireeva, E.I. (2013). Krupnopanel'nye zdaniya s petlevymi soedineniyami konstruktii. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, (9), 47–51. (In Russ.).
13. Domasevich, R.V. (2022). Krupnopanel'nye zdaniya s petlevymi soedineniyami konstruktii. VII Mezhdunarodnyi studencheskii stroitel'nyi forum – 2022: sbornik dokladov VII Mezhdunarodnogo studencheskogo stroitel'nogo foruma, Belgorod, 24 noyabrya 2022 goda (120–124). Belgorod: Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova. (In Russ.).
14. Avdeev, K.V., Bolgov, A.N., Zenin, S.A., & Mart'yanov, K.V. (2023). Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruktii s petlevymi stykami armatury v sootvetstvii s GOST R 70447-2022. *Beton i zhelezobeton*, 618(4), 18–27. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-4(618)-18-27. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Avdeev, K.V., Mamin, A.N., Bobrov, V.V., Bammatov, A.A., Mart'yanov, K.V., & Pryakhin, S.N. (2022). Petlevye styki sterzhnevoi armatury. Iстория развития, проблемы и актуал'ност'. *Teoriya inzhenernykh sooruzhenii. Stroitel'nye konstruktsii*, 6(104), 4–11. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11. (In Russ., abstr. in Engl.).

*Поступила 01.09.2025*

## PRACTICAL CALCULATION OF STABILITY TO PROGRESSIVE COLLAPSE OF A 10-STOREY RESIDENTIAL BUILDING WITH INCREASED PITCH OF TRANSVERSE LOAD-BEARING WALLS

**D. LAZOUSKI<sup>1)</sup>, A. KHATKEVICH<sup>2)</sup>, A. MATLAKHOV<sup>3)</sup>**

<sup>(1), 2)</sup> *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*, <sup>3)</sup> *UE "Vitebskgrazhdanproekt"*)

*The article presents the results of practical application of the "local" strength method in the linear static calculation of internal forces of structural elements with a modified calculation scheme and nonlinear analysis of cross-sections of structural elements of a panel residential building with an increased step of transverse walls and loop connections of adjacent floor slabs at platform joints.*

*The conducted study of the structural system of a 10-story 2-section multi-apartment residential building with a step of load-bearing walls of 6.4 m shows compliance with the requirements of regulatory documents for strength and stability in a normal design situation and against progressive collapse in a special design situation.*

**Keywords:** progressive collapse, linear static calculation of internal forces, nonlinear analysis of cross sections, original design scheme, modified design scheme.

## ДЕФОРМАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОЙ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ НА КОМПОЗИЦИОННОМ БИОВЯЖУЩЕМ

*А.А. АФАНАСЕНКО*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1544-745X>*

*П.П. ЯЦЕВИЧ*

*(Белорусский национальный технический университет, филиал БНТУ  
«Научно-исследовательский политехнический институт», Минск)*

*В рамках решения актуальной задачи дорожного материаловедения по поиску альтернатив нефтяным вяжущим исследована деформационная устойчивость щебеноочно-мастичной органоминеральной смеси на основе композиционного биовяжущего. Проблема применения многих известных биовяжущих заключается в их низкой теплостойкости, приводящей к снижению сопротивления пластическим деформациям. Для сравнительной оценки были изготовлены два состава с идентичной зерновой структурой, на нефтяном битуме и на разработанном композиционном биовяжущем. Испытания на сопротивление колеобразованию проводились по методике T 0719-2011 (JTG E20-2011). Установлено, что применение композиционного биовяжущего позволяет снизить глубину колеи на 77,3% по сравнению с контрольным составом. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности разработанного вяжущего в повышении сопротивления пластическим деформациям и открывают перспективы для его применения в конструкциях дорожных одежд, работающих в условиях повышенных температур и интенсивных нагрузок.*

**Ключевые слова:** композиционное биовяжущее, щебеноочно-мастичный асфальтобетон (SMA), деформационная устойчивость, колеобразование, теплостойкость, динамическая стабильность (DS).

**Введение.** Интенсивное развитие дорожной сети является необходимым условием функционирования современной экономики. Однако традиционная технология производства асфальтобетона, основанная на применении нефтяных битумов, сопряжена с рядом проблем. К ним относятся зависимость от невозобновляемых углеводородных ресурсов, волатильность цен на энергоносители и значительная экологическая нагрузка, обусловленная как выбросами в процессе производства при высоких температурах, так и углеродным следом самого вяжущего.

В связи с этим одним из наиболее актуальных направлений в дорожном материаловедении является разработка и исследование биовяжущих – связующих материалов, получаемых из возобновляемого сырья растительного или животного происхождения [1]. Актуальность данного направления подтверждается анализом международных научометрических баз данных: так, процентиль статей, посвященных применению биовяжущих, в базе Scopus превышает 99, что свидетельствует о высокой степени заинтересованности научного сообщества в решении этой задачи.

Подавляющее большинство исследователей направили свои усилия на биовяжущее из бионефтий, полученных в результате пиролиза различной биомассы [2–5; 8; 9]. Зачастую такие компоненты вводятся в состав традиционного битума в качестве частичной замены. Например, в работах [3, с. 520–521; 4, с. 6–7] рассматривается влияние биовяжущего из свиного навоза, которое, действуя как пластификатор, позволяет улучшить низкотемпературные свойства смеси. Подобный пластифицирующий эффект характерен и для растительных масел [5, с. 14; 6, с. 11–13; 7, с. 219–221], однако он имеет и обратную сторону, прогнозируемо приводит к снижению когезионной прочности вяжущего и, как следствие, ухудшению физико-механических свойств асфальтобетона при высоких положительных температурах. Это, в свою очередь, повышает риск интенсивного колеобразования [8, 159–163; 9, с. 585–589].

Для компенсации этого негативного эффекта многие исследователи прибегают к вторичной модификации. В работе [10] предпринята попытка предотвратить ухудшение высокотемпературных свойств путем дополнительного введения в систему органического монтмориллонита. В других исследованиях [11, с. 4; 12, с. 708–711] с этой же целью используют значительные количества синтетических полимеров. Такой подход, хотя и является предсказуемо эффективным с точки зрения улучшения реологии, значительно усложняет технологию и, что более важно, вводит в «зеленый» по своей концепции материал неэкологичные синтетические компоненты. Кроме того, остро встает вопрос термодинамической стабильности подобных сложных композитов. Актуальность проблемы совместимости компонентов подтверждается исландскими исследованиями [13, с. 135–138], где наблюдалось фазовое расслоение системы «битум-рапсовое масло», что приводило к миграции масла на поверхность минерального заполнителя и снижению адгезии.

Отдельным направлением является создание резиносодержащих битумов, модифицированных био-маслами [14]. Однако эффективность таких систем напрямую зависит от степени взаимодействия между компонентами. Без предварительной девулканизации резиновая крошка формирует в вяжущем лишь дисперсную фазу набухшей резины, не вступая в химическое взаимодействие с минеральными заполнителями. В то же время, как показывают исследования [15, с. 5–6], применение специальных агентов, например, гваюловой смолы, может инициировать процесс девулканизации и способствовать миграции компонентов резины в битум, обеспечивая создание более гомогенной и эффективной структуры.

Перспективным представляется использование лигнина [16; 17], который, являясь природным полимером, потенциально способен повысить сдвигустойчивость вяжущего. Тем не менее, его высокая температура размяг-

чения и ограниченная совместимость с битумом, как правило, не позволяют достичь более 30% степени замещения без риска ухудшения низкотемпературной трещиностойкости, и лишь применение вторичной модификации позволяет достичь более высоких степеней замещения [17, с. 7–12]. Вопрос стабильности таких систем при хранении и транспортировании также остается открытым.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что большинство исследований в области биовяжущих сфокусировано на частичной замене нефтяного битума или на компенсаторной модификации биокомпонентов для улучшения их свойств. Ключевой проблемой остается падение сдвигостойчивости при высоких температурах, что вынуждает исследователей вводить в состав синтетические полимеры или другие дорогостоящие добавки, усложняя технологию и снижая экологические преимущества «зеленых» вяжущих. В противовес этому, системный подход, основанный на полной замене битума и изначальном проектировании композиционного биовяжущего из нескольких растительных компонентов, где их свойства взаимно дополняют друг друга для достижения сбалансированных характеристик, остается менее изученным.

**Цель и задачи исследования.** Актуальность проблемы создания экологически безопасных и долговечных дорожных покрытий, выявленные в результате анализа литературы недостатки существующих биовяжущих, а также недостаточная изученность системного подхода к их проектированию определили направление настоящего исследования.

Объектом исследования является щебеночно-мастичная органоминеральная смесь, приготовленная на основе разработанного композиционного биовяжущего. Предметом исследования выступает ее деформационная устойчивость (сопротивление колеобразованию) при высоких температурах в сопоставлении с контрольным составом, приготовленным на стандартном полимерно-модифицированном битуме. Целью настоящей работы является установление влияния полной замены полимерно-модифицированного битума разработанным композиционным биовяжущим на сдвигостойчивость щебеночно-мастичной органоминеральной смеси.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: произведена лабораторная оценка физико-механических свойств исходных материалов, минеральных заполнителей, контрольного полимерно-модифицированного вяжущего и экспериментального композиционного биовяжущего; разработан и обоснован состав щебеночно-мастичной органоминеральной смеси, соответствующий асфальтобетону типа SMA-10; проведены сравнительные лабораторные испытания на колеобразование для смесей на контролльном и экспериментальном вяжущих; осуществлен анализ полученных данных; произведена оценка эффективности применения композиционного биовяжущего и сформулированы научные и практические выводы.

Экспериментальная часть работы была выполнена на научно-технической базе компании «Гаоюань» (Gaouuan), город Синьсян, провинция Хэнань, КНР. Данное исследование стало возможным в рамках программы по обмену научно-техническим опытом, что позволило провести все исследования на современном испытательном оборудовании в строгом соответствии с передовой нормативной базой КНР в области дорожного строительства (JTG E20-2011<sup>1</sup>, JTG F40-2004<sup>2</sup>, JTG E42-2005<sup>3</sup>).

**Материалы.** Для приготовления органоминеральных смесей использовались минеральные материалы, отвечающие требованиям стандарта JTG F40<sup>4</sup> для щебеночно-мастичного асфальтобетона, применяемого в качестве материала верхнего слоя дорожного покрытия с высокой интенсивностью движения. В качестве крупного и мелкого заполнителя применялся кубовидный щебень и отсев дробления из базальтовых горных пород. В качестве наполнителя использовался активированный известняковый порошок. Зерновой состав минеральных материалов представлен в таблице 1, физико-механические свойства приведены в таблице 2.

Таблица 1. – Зерновые составы минеральных материалов

Размер сит, мм	Щебень 5–10 мм, % прохода	Щебень 3–5 мм, % прохода	Отсев 0–3 мм, % прохода	Минеральный порошок, % прохода
13,2	100	100	100	100
9,5	87	100	100	100
4,75	10,8	31,9	97,2	100
2,36	1,6	0,1	65,8	100
1,18	1,2	0,1	47,7	100
0,6	1,1	0,1	31,5	100
0,3	1,1	0,1	20,6	100
0,15	1,1	0,1	14,9	98,0
0,075	1,0	0,1	12,5	92,0

<sup>1</sup> JTG E20-2011. Стандартные методы испытаний битума и битумных смесей для дорожного строительства = Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering = 公路工程沥青及沥青混合料试验规程. – Введ. 01.12.2011. – Пекин : Народные коммуникации, 2011. – 369 с. – Текст: кит., англ.

<sup>2</sup> JTG F40-2004. Технические условия на строительство асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог = Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements = 公路沥青路面施工技术规范. – Введ. 01.10.2004. – Пекин : Народные коммуникации, 2004. – 168 с. – Текст: кит., англ.

<sup>3</sup> JTG E42-2005. Методы испытаний заполнителей для дорожного строительства = Test Methods of Aggregate for Highway Engineering = 公路工程集料试验规程. – Введ. 01.06.2005. – Пекин : Народные коммуникации, 2005. – 285 с. – Текст: кит., англ.

<sup>4</sup> См. сноску 2.

Таблица 2. – Физико-механические свойства минеральных материалов

Показатель	Испытано по JTG E42 <sup>5</sup> , пункт	Требования по JTG F40 <sup>6</sup>	Фактическое значение
Щебень 5–10 мм			
Значение дробимости, %	T 0316	$\leq 12$	10,5
Истираемость (Лос-Анджелес), %	T 0317	$\leq 20$	18,2
Содержание зерен лещадной и игловатой формы, %	T 0312	$\leq 15$	9,5
Содержание частиц < 0,075 мм (отмыккой), %	T 0310	$\leq 1,0$	1,0
Щебень 3–5 мм			
Значение дробимости, %	T 0316	$\leq 12$	11,2
Содержание зерен лещадной и игловатой формы, %	T 0312	$\leq 15$	10,8
Содержание частиц < 0,075 мм (отмыккой), %	T 0310	$\leq 1,0$	0,1
Отсев дробления 0–3 мм			
Содержание глины в комках, %	T 0311	$\leq 0,2$	Отсутствует
Минеральный порошок (активированный)			
Пористость в сухом уплотненном состоянии, %	T 0326	$\leq 35$	31
Гидрофильтрный коэффициент	T 0327	$< 1$	0,8
Влажность, %	T 0103	$\leq 1,0$	0,4

Как следует из представленных данных, все использованные минеральные компоненты полностью соответствуют требованиям JTG F40<sup>7</sup> с существенным запасом по ключевым показателям. Незначительные и ожидаемые вариации в свойствах фракций 5–10 мм и 3–5 мм подтверждают стабильность технологического процесса их получения. Детальная оценка характеристик каждого компонента обеспечила высокую точность при проектировании суммарного зернового состава смеси, что позволило создать прочный минеральный каркас щебеноочномастичной органоминеральной смеси.

В качестве контрольного вяжущего применялся полимерно-модифицированный битум китайского производства. Согласно национальной классификации КНР, изложенной в стандарте JTG F40<sup>8</sup>, данное вяжущее соответствует классу I-D, который предназначен для строительства покрытий дорог с особо тяжелым движением в регионах с жарким климатом. Реологические и эксплуатационные свойства вяжущего, определенные согласно комплексу методик JTG E20<sup>9</sup>, позволяют также классифицировать его по системе Superpave как PG 76-22, что подтверждает его высокую устойчивость к накоплению остаточных деформаций при высоких температурах. Основные физико-механические показатели вяжущего представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Свойства полимерно-модифицированного битумного вяжущего

Показатель	Испытано по JTG E20 <sup>10</sup> , пункт	Требования по JTG F40 <sup>11</sup>	Фактическое значение
Глубина проникания иглы при 25 °C, 0,1 мм	T 0604	40–60	55
Температура размягчения, °C	T 0606	$\geq 75$	78
Растяжимость при 5 °C, см	T 0605	$\geq 30$	42
Эластичность при 25 °C, %	T 0624	$\geq 85$	91
Динамическая вязкость при 135 °C, Па·с	T 0625	$\leq 3,0$	2,1
Показатели после старения в RTFOT			
Остаточная пенетрация, %	T 0610	$\geq 70$	76
Повышение температуры размягчения, °C	T 0610	$\leq 5$	3,5

Исходя из положения обеспечения свойств материала верхних слоев дорожного покрытия требуемой сдвигостойчивостью (принят критерий минимизации образования пластических деформаций), был сформирован экспериментальный состав композиционного биовяжущего, состоящий из набора компонентов природного происхождения (масел, смол, природных полимерных составляющих). Для первичной оценки морфологии и пленкообразующей способности разработанного композиционного биовяжущего был подготовлен образец в виде тонкой пленки, нанесенной на стандартное предметное стекло (рисунок 1).

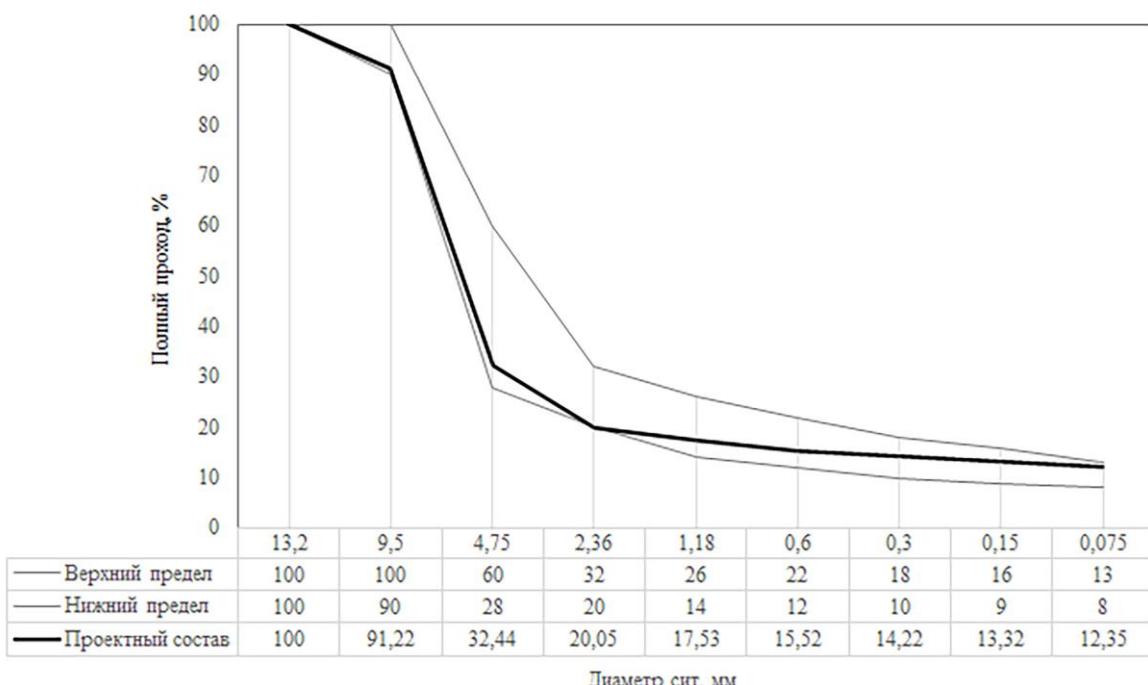
<sup>5</sup> См. сноску 3.<sup>6</sup> См. сноску 2.<sup>7</sup> См. сноску 2.<sup>8</sup> См. сноску 2.<sup>9</sup> См. сноску 1.<sup>10</sup> См. сноску 1.<sup>11</sup> См. сноску 2.



**Рисунок 1. – Внешний вид пленки композиционного биовяжущего на стеклянной подложке**

Пленка вяжущего имеет характерный светло-коричневый оттенок, неравномерный по площади образца, что свидетельствует о гетерогенной, многокомпонентной природе композиции. Материал является полупрозрачным, что позволяет оценить его внутреннюю структуру и создавать из него органоминеральные смеси различной цветовой гаммы. Наиболее выраженной особенностью является наличие многочисленных сферических газовых включений (пузырьков) различного диаметра. Их присутствие может указывать на выделение летучих фракций или побочных газообразных продуктов в процессе термостатирования и полимеризации вяжущего. В нижней части образца наблюдаются локальные области помутнения белесого цвета, что может быть интерпретировано как частичная кристаллизация отдельных компонентов или фазовая сегрегация системы при охлаждении. Несмотря на структурную гетерогенность, вяжущее формирует сплошную пленку без разрывов и трещин. Края пленки имеют неровный характер, что типично для материалов, наносимых в вязко-текучем состоянии. Наблюдается хорошая адгезия к стеклянной подложке по всей площади контакта, отслоений не зафиксировано. В целом, визуальный анализ подтверждает сложный композиционный состав вяжущего и его способность к формированию сплошного адгезионно-прочного слоя.

Для объективной оценки эффективности использования предлагаемого композиционного биовяжущего были запроектированы и приготовлены два состава щебеночно-мастичной органоминеральной смеси, соответствующие составу асфальтобетона типа SMA-10. Выбор данного типа обусловлен его широким применением для устройства верхних слоев на дорогах с высокой интенсивностью движения и тяжелыми нагрузками. Структура SMA с ее жестким каменным каркасом и высоким содержанием вяжущего позволяет наиболее полно оценить влияние свойств именно вяжущего на сдвигостойчивость композита. Проектирование составов проводилось в соответствии с методологией объемного проектирования, регламентированной стандартом JTG F40<sup>12</sup>. Ключевые проектные параметры смесей представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Гранулометрический состав щебеночно-мастичной органоминеральной смеси**

<sup>12</sup> См. сноску 2.

Таким образом, на основе исследования зернового состава минеральных материалов (см. таблицу 1) было запроектировано соотношение компонентов: щебень 5–10 мм – 70%, щебень 3–5 мм – 7%, отсев 0–3 мм – 12%, минеральный порошок – 11%. Данное соотношение позволило получить суммарный зерновой состав, полностью соответствующий нормативному коридору стандарта JTGF40<sup>13</sup> для смесей типа SMA-10 (см. рисунок 2). В качестве стабилизирующей добавки для предотвращения стекания вяжущего щебеноочно-мастичной асфальтобетонной смеси применялось целлюлозное волокно (GranoCell) в количестве 0,42% от массы минеральных материалов. Оптимальное содержание вяжущего для обоих типов (контрольного и экспериментального) было определено по результатам объемного проектирования и составило 6,4% от массы минеральной части. Единственным варьируемым фактором в эксперименте являлся тип вяжущего: первый контрольный состав на полимерно-битумном вяжущем (I-D), второй – на экспериментальном композиционном биовяжущем. Такой подход обеспечил максимальную корректность последующего сравнительного анализа полученных данных.

**Методика исследования.** Оценка устойчивости органоминеральных смесей к колеобразованию проводилась в соответствии с методикой, изложенной в Т 0719, которая является частью отраслевого стандарта JTGE20<sup>14</sup>. Данный метод предназначен для определения способности асфальтобетона противостоять накоплению пластических деформаций при повышенных температурах, что является ключевым показателем для проектирования и контроля качества смесей, предназначенных для эксплуатации в условиях жаркого климата и/или воздействия тяжелых транспортных нагрузок.

Объектом исследования являлись лабораторно сформованные образцы в виде плит с габаритными размерами 300×300×50 мм. Формование плит включало уплотнение на секторном вальцовом уплотнителе до достижения объемной плотности, эквивалентной коэффициенту уплотнения 0,98. Перед началом испытания образцы подвергались термостатированию в климатической камере испытательной установки. Термостатирование проводилось до достижения полной и равномерной температуры внутри образца, которая составила 60,0 ± 0,5 °C. При этом температура воздушной среды в камере поддерживалась на уровне 60,0 ± 1,0 °C. Продолжительность предварительного термостатирования составляла 5 часов.

Испытания проводились на автоматизированной установке для определения колеустойчивости. Нагружение образца осуществлялось посредством прокатывания по его поверхности колеса, оснащенного цельнолитой резиновой шиной. Контактное давление колеса на поверхность образца поддерживалось на уровне 0,7 ± 0,05 МПа, что соответствовало общей прикладываемой нагрузке около 780 Н. Частота проходов нагружающего колеса составляла 42 ± 1 цикл (21 цикл «туда-обратно») в минуту. Термический режим в камере на протяжении всего процесса нагружения обеспечивался на уровне 60,0 ± 0,5 °C. Общая продолжительность нагружения составляла 60 минут.

**Результаты исследования.** В ходе эксперимента производилась непрерывная автоматическая регистрация вертикальной деформации (глубины колеи) с использованием датчиков линейных перемещений (LVDT) с точностью до 0,01 мм. Основным исходным параметром являлась динамическая стабильность (DS), выраженная в циклах/мм. Расчет данного параметра производился по деформациям, зафиксированным в интервале между 45-й ( $t_1$ ) и 60-й ( $t_2$ ) минутами испытания, что соответствует участку установившейся ползучести. Динамическая стабильность вычислялась по формуле:

$$DS = (t_2 - t_1) \cdot N / (d_2 - d_1), \quad (1)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – время испытания, равное 45 мин и 60 мин соответственно;

$d_1$  и  $d_2$  – глубина колеи в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно, мм;

$N$  – частота проходов колеса, равная 42 цикл/мин;

Для обеспечения статистической значимости полученных данных серия для каждого исследуемого состава включала не менее трех репликативных измерений. В качестве итогового принималось среднеарифметическое значение показателей, удовлетворяющих критериям сходимости стандарта. Результаты лабораторных исследований щебеноочно-мастичных органоминеральных смесей сведены в общую таблицу 4.

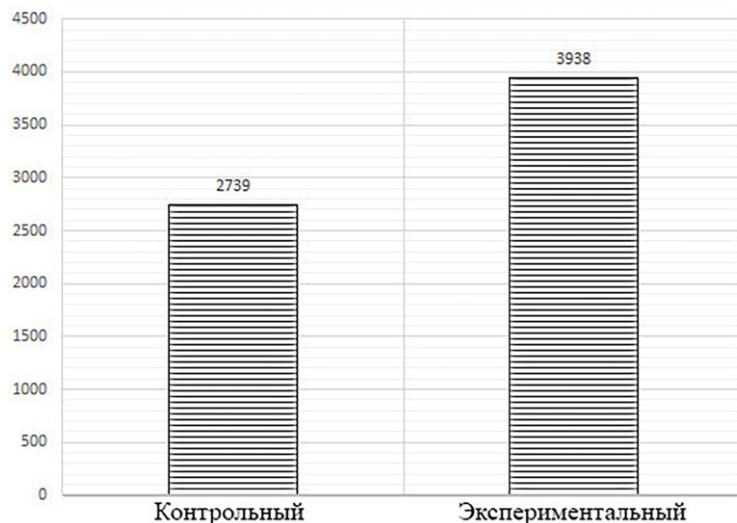
Таблица 4. – Первичные и расчетные данные испытаний на колеобразование при 60 °C

Состав	№ образца	Глубина колеи на 45-й мин ( $d_1$ ), мм	Глубина колеи на 60-й мин ( $d_2$ ), мм
Контрольный на полимерно-модифицированном вяжущем	1	1,81	2,04
	2	1,75	1,99
	3	1,88	2,11
	Среднее значение	1,81	2,05
Экспериментальный на композиционном биовяжущем	1	0,98	1,14
	2	1,02	1,19
	3	0,95	1,12
	Среднее значение	0,98	1,15

<sup>13</sup> См. сноску 2.

<sup>14</sup> См. сноску 1.

Исходя из полученных результатов лабораторных исследований, по формуле (1) по средним значениям рассчитывалась динамическая стабильность (DS) для щебеночно-мастичных органоминеральных смесей на битуме (контрольный) и на композиционном биовяжущем (экспериментальный). Коэффициенты вариации результатов для обеих серий испытаний (8,8% и 6,3%) не превышают допустимого нормативного предела в 20%, что свидетельствует о высокой сходимости и надежности полученных данных. Результаты расчета представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3. – Сравнение динамической стабильности (DS)**

Согласно стандарту JTGF40<sup>15</sup>, для асфальтобетонных смесей, применяемых в верхних слоях покрытий на скоростных автомагистралях и дорогах I класса, минимальное требование к динамической стабильности (DS) при 60 °C составляет  $\geq 3000$  цикл/мм. Контрольный состав на основе полимерно-модифицированного вяжущего показал результат DS = 2739 цикл/мм (по средним значениям), что не удовлетворяет требованиям для высшей категории дорог. Экспериментальный состав на основе композиционного биовяжущего показал результат DS = 3938 цикл/мм, что полностью соответствует и превосходит нормативные требования.

Сравнительный анализ показывает кардинальное улучшение свойств смеси при замене полимерно-модифицированного вяжущего на композиционное биовяжущее. Динамическая стабильность экспериментального состава на 43,8% выше, чем у контрольного. Конечная глубина колеи у экспериментальной смеси 1,19 мм (по максимальному значению), что в 1,77 раза меньше, чем у контрольной смеси (2,11 мм). Это однозначно свидетельствует о том, что разработанное биовяжущее обладает значительно более высокой когезионной прочностью и жесткостью при повышенной температуре, эффективно сопротивляясь накоплению остаточных деформаций.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о формировании в объеме композиционного биовяжущего более прочной структурной сетки по сравнению с традиционным полимерно-модифицированным вяжущим. Несмотря на то, что контрольное вяжущее относится к высокому классу I-D (PG 76-22 по Supergravel), его оказалось недостаточно для обеспечения требуемой сдвигостойчивости щебеночно-мастичной органоминеральной смеси с разработанным зерновым составом. Введение композиционного биовяжущего на основе природных масел, смол и натуральных полимерных компонентов позволило решить эту проблему. Вероятно, это связано с двумя ключевыми факторами: с формированием более жесткой матрицы, компоненты образуют пространственную структуру с более высоким модулем упругости при 60 °C; с увеличением адгезионного взаимодействия, способствующего созданию более прочных физико-химических связей на границе «вяжущее-камень», что препятствует сдвигу зерен в мастичной части под действием нагрузки.

**Обсуждение.** Полученные экспериментальные данные демонстрируют, что полная замена полимерно-модифицированного битума на разработанное композиционное биовяжущее приводит к значительному повышению сопротивления щебеночно-мастичной органоминеральной смеси накоплению остаточных деформаций. Данный результат имеет принципиальное значение в контексте существующих исследований в области биовяжущих. Одной из ключевых проблем, с которой сталкивается большинство исследователей, является снижение высокотемпературных эксплуатационных свойств (в частности, сдвигостойчивости) при введении в состав асфальтобетона компонентов растительного происхождения. Как правило, для компенсации этого негативного эффекта требуются сложные и дорогостоящие модификаторы. Настоящее исследование демонстрирует, что системный подход к проектированию, основанный на полной замене битума и подборе нескольких биокомпонентов с взаимодополняющими свойствами, позволяет не просто достичь, но и превзойти уровень высококачественных полимерно-модифицированных аналогов.

<sup>15</sup> См. сноска 2.

Высокие показатели динамической стабильности смеси на композиционном-биовяжущем могут быть объяснены складывающимся комплексным эффектом его компонентов. В отличие от простой дисперсии полимера в битуме, в материале происходит формирование сложной трехмерной структурной сетки за счет взаимодействия растительных масел и полимерных составляющих в матрице из природных смол. Эта структура, по-видимому, обладает более высоким модулем упругости и когезионной прочностью при температуре 60 °C, что и обеспечивает повышенное сопротивление сдвиговым деформациям.

Необходимо отметить, что данное исследование было сфокусировано на оценке сдвигостойчивости. Для полной и всесторонней оценки эксплуатационных характеристик разработанного материала требуется проведение дальнейших исследований, включающих оценку низкотемпературных свойств (трещиностойкость, к примеру, по методу BBR), усталостной долговечности и водостойкости. Тем не менее полученные результаты однозначно подтверждают высокий потенциал разработанного композиционного биовяжущего для создания долговечных дорожных покрытий.

**Заключение.** Экспериментально доказано, что полная замена стандартного полимерно-модифицированного битума (класса I-D) на разработанное композиционное биовяжущее в составе щебеноочно-мастичной асфальтобетонной смеси SMA-10 приводит к значительному повышению ее сопротивления колеообразованию. Динамическая стабильность (DS) при 60 °C увеличилась на 43,8% (с 2739 до 3938 цикл/мм), что позволило перевести асфальтобетон из категории, не соответствующей требованиям для скоростных автомагистралей, в категорию, полностью им удовлетворяющую. Основная цель работы была успешно достигнута.

Полученный результат имеет принципиальное научное и практическое значение. Он демонстрирует, что системный подход к проектированию композиции из нескольких взаимодополняющих биокомпонентов позволяет не просто компенсировать известные недостатки отдельных видов растительного сырья, но и создавать вяжущие, превосходящие по ключевым эксплуатационным показателям (в данном случае – сдвигостойчивости) высококачественные нефтяные аналоги. Таким образом, данная работа подтверждает высокий потенциал применения композиционных биовяжущих для создания долговечных и экологически безопасных дорожных покрытий, способных выдерживать нагрузки на наиболее ответственных участках дорожной сети.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tabaković, A. Is this the end of the road for bio-inspired road construction materials? // RILEM Technical Letters. – 2022. – Vol. 7. – P. 79–87. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2022.156.
2. Converting biomass into bio-asphalt – a review / Z.Y. Mahssin, N.A. Hassan, H. Yaacob et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Proc. of the 4th National Conf. on Wind & Earthquake Engineering (October 16–17, 2020, Putrajaya, Malaysia). – 2021. – Vol. 682. DOI: 10.1088/1755-1315/682/1/012066.
3. Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification / E.H. Fini, I.L. Al-Qadi, Z. You et al. // International Journal of Pavement Engineering. – 2011. – Vol. 12, № 6. – P. 515–522. DOI: 10.1080/10298436.2011.596937.
4. Characterization of asphalt binders modified with bio-binder from swine manure / J. Gasia, T. López-Montero, L. Vidal et al. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 20. DOI: 10.3390/app132011412.
5. Biomass-derived bio-oil for asphalt binder applications: production feasibility and performance enhancement / A.A. El-Sherbeni, A.M. Awed, A.R. Gabr et al. // Construction Materials. – 2025. – Vol. 5, № 1. DOI: 10.3390/constrmater5010011.
6. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils / M. Chen, F. Xiao, B. Putman et al. // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 59. – P. 10–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032.
7. Performance of waste cooking oil in asphalt binder modification / W.N.A.W. Azahar, M. Bujang, R.P. Jaya et al. // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 700. – P. 216–226. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.700.216.
8. A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: their source, composition, preparation and performance / Z. Zhang, Y. Fang, J. Yang et al. // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2022. – Vol. 9, № 2. – P. 151–166. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.003.
9. Productions and applications of bio-asphalts – a review / N. Su, F. Xiao, J. Wang et al. // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 183. – P. 578–591. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118.
10. Effect of Organic-Montmorillonite on rheological performance of Bio-Asphalt composites with various oxidative aging / C. Wang, T. Xie, X. Ji et al. // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 342, Part A. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127945.
11. Green roads ahead: a critical examination of bio-bitumen for sustainable infrastructure / Y. Zhang, P. Ding, L. Zhang et al. // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. DOI: 10.3389/fmats.2024.1382014.
12. Comparison of the rheological and the thermal behaviour of a neat asphalt binder and a wood-based binder for pavement surface layer / L.V. Espinosa, F. Gadler, R.V. Mota et al. // Road Materials and Pavement Design. – 2021. – Vol. 22, № 1. – P. S702–S717. DOI: 10.1080/14680629.2021.1911834.
13. An extensive laboratory investigation on the use of bio-oil modified asphalt in road construction / A. Guarin, A. Khan, A.A. Butt et al. // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 106. – P. 133–139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.009.
14. Preparation and performance evaluation of swine manure bio-oil modified rubber asphalt binder / H. Wang, Y. Jing, J. Zhang et al. // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123584.
15. Hemida A., Abdelrahman M. Component analysis of bio-asphalt binder using crumb rubber modifier and guayule resin as an innovative asphalt replacer // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 169. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105486.
16. The use of lignin for sustainable asphalt pavements: a literature review / E. Gaudenzi, F. Cardone, X. Lu et al. // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 362. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129773.
17. Performance assessment of asphalt mixtures produced with a bio-binder containing 30% of lignin / E. Gaudenzi, F. Cardone, X. Lu et al. // Materials and Structures. – 2022. – Vol. 55. DOI: 10.1617/s11527-022-02057-w.

## REFERENCES

1. Tabaković, A. (2022). Is this the end of the road for bio-inspired road construction materials? *RILEM Technical Letters*, 7, 79–87. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2022.156.
2. Mahssin, Z.Y., Hassan, N.A., Yaacob, H., Puteh, M.H., Ismail, C.R., Jaya, R.P., Zainol, M.M., & Mahmud, M.Z.H. (2021). Converting biomass into bio-asphalt – a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 682. DOI: 10.1088/1755-1315/682/1/012066.
3. Fini, E.H., Al-Qadi, I.L., You, Z., Zada, B., & Mills-Beale, J. (2011). Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(6), 515–522. DOI: 10.1080/10298436.2011.596937.
4. Gasia, J., López-Montero, T., Vidal, L., Miró, R., Bengoa, C., & Martínez, A.H. (2023). Characterization of asphalt binders modified with bio-binder from swine manure. *Applied Sciences*, 13(20). DOI: 10.3390/app132011412.
5. El-Sherbeni, A.A., Awed, A.M., Gabr, A.R., & El-Badawy, S.M. (2025). Biomass-derived bio-oil for asphalt binder applications: Production feasibility and performance enhancement. *Construction Materials*, 5(1). DOI: 10.3390/constrmater5010011.
6. Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B., & Wu, S. (2014). High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials*, 59, 10–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032.
7. Azahar, W.N.A.W., Bujang, M., Jaya, R.P., Hainin, M.R., Ngadi, N., & Abdullah, M.M.A. (2016). Performance of waste cooking oil in asphalt binder modification. *Key Engineering Materials*, 700, 216–226. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.700.216.
8. Zhang, Z., Fang, Y., Yang, J., & Li, X. (2022). A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: Their source, composition, preparation and performance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(2), 151–166. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.003.
9. Su, N., Xiao, F., Wang, J., Cong, L., & Amirkhanian, S. (2018). Productions and applications of bio-asphalts – a review. *Construction and Building Materials*, 183, 578–591. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118.
10. Wang, C., Xie, T., Ji, X., & Zhou, B. (2022). Effect of Organic-Montmorillonite on rheological performance of Bio-Asphalt composites with various oxidative aging. *Construction and Building Materials*, 342(Part A). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127945.
11. Zhang, Y., Ding, P., Zhang, L., Luo, X., Cheng, X., & Zhang, H. (2024). Green roads ahead: a critical examination of bio-bitumen for sustainable infrastructure. *Frontiers in Materials*, 11. DOI: 10.3389/fmats.2024.1382014.
12. Espinosa, L.V., Gadler, F., Mota, R.V., Vasconcelos, K., & Bernucci, L.L. B. (2021). Comparison of the rheological and the thermal behaviour of a neat asphalt binder and a wood-based binder for pavement surface layer. *Road Materials and Pavement Design*, 22(1), S702–S717. DOI: 10.1080/14680629.2021.1911834.
13. Guarin, A., Khan, A., Butt, A. A., Birgisson, B., & Kringos, N. (2016). An extensive laboratory investigation on the use of bio-oil modified asphalt in road construction. *Construction and Building Materials*, 106, 133–139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.009.
14. Wang, H., Jing, Y., Zhang, J., Cao, Y., & Lyu, L. (2021). Preparation and performance evaluation of swine manure bio-oil modified rubber asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123584.
15. Hemida, A., & Abdelrahman, M. (2021). Component analysis of bio-asphalt binder using crumb rubber modifier and guayule resin as an innovative asphalt replacer. *Resources, Conservation and Recycling*, 169. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105486.
16. Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2023). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: a literature review. *Construction and Building Materials*, 362. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129773.
17. Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2022). Performance assessment of asphalt mixtures produced with a bio-binder containing 30% of lignin. *Materials and Structures*, 55. DOI: 10.1617/s11527-022-02057-w.

Поступила 24.06.2025

## DEFORMATION RESISTANCE OF STONE MASTIC ASPHALT MIXTURE WITH A COMPOSITE BIO-BINDER

**A. AFANASENKA, P. YATSEVICH**  
**(Belarusian National Technical University, Branch of BNTU**  
**"Scientific and Research Polytechnic Institute", Minsk)**

This study investigates the deformation resistance of a Stone Mastic Asphalt (SMA) mixture based on a composite bio-binder, addressing the critical challenge in pavement materials science of finding alternatives to petroleum-based binders. A key problem with many existing bio-binders is their poor high-temperature performance, which leads to reduced resistance to plastic deformation. For a comparative evaluation, two mixtures with identical aggregate gradation were produced: a control mixture with conventional bitumen and a test mixture with the developed composite bio-binder. The rutting resistance was evaluated using the wheel tracking test according to the T 0719-2011 (JTG E20-2011) standard. It was established that the use of the composite bio-binder resulted in a 77.3% reduction in rut depth compared to the control mixture. The results indicate the high efficiency of the developed binder in improving resistance to plastic deformation and open up prospects for its application in pavement structures operating under high-temperature conditions and heavy traffic loads.

**Keywords:** composite bio-binder, Stone Mastic Asphalt (SMA), deformation resistance, rutting, high-temperature performance, dynamic stability (DS).

## МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ И СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦЕОЛИТА В ПРОЦЕССЕ УДАЛЕНИЯ ИОНОВ АММОНИЯ И ЖЕЛЕЗА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

*E.C. ВЕЛЮГО*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6165-1929>*

*канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>*

*канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9485-3760>*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*В работе представлены результаты комплексного исследования изменений текстурных и адсорбционных характеристик природного цеолита марки «Цеол» в процессе его эксплуатации в качестве фильтрующей загрузки фильтров второй ступени на станции обезжелезивания. Методами адсорбции-десорбции паров воды при 20°C установлено, что эксплуатация приводит к статистически значимому снижению удельной поверхности (с 251,92 до 225,97 м<sup>2</sup>/г по методу BET) и общего объема пор (с 75,013 до 67,285 см<sup>3</sup>/г). На основе экспериментальных данных разработана гидрохимическая модель рабочего цикла загрузки, сочетающая сорбцию и ионообмен. Для сохранения ресурса загрузки необходима оптимизация работы предыдущей ступени очистки, направленная на снижение концентраций железа и органических веществ в исходной воде.*

**Ключевые слова:** цеолит, ионообмен, обезжелезивание, удаление аммония, пористая структура, адсорбция, гистерезис, гидрохимическая модель, регенерация, органо-железистые комплексы.

**Введение.** Повышенные концентрации аммонийного азота и железа в подземных водах являются одной из наиболее распространенных проблем при водоподготовке. Эффективным решением для их удаления служит применение природных цеолитов, сочетающих высокую ионообменную емкость по отношению к ионам  $\text{NH}_4^+$  с развитой мезопористой структурой [1; 2]. Однако длительная эксплуатация цеолитовых фильтров в условиях реальных водоисточников, обогащенных органическими веществами, приводит к постепенной потере их сорбционной емкости, механизмы которой остаются недостаточно изученными [3].

Большинство существующих моделей описывают процесс очистки преимущественно как ионообменный, не учитывая сочетанного воздействия соединений железа и органических веществ, которое приводит к значительной трансформации текстурных и энергетических характеристик материала [4; 5]. В этой связи разработка комплексных гидрохимических моделей, количественно связывающих структурные изменения сорбента с его функциональными свойствами, представляется весьма перспективной. Ранее нами была успешно апробирована подобная методология применительно к процессам удаления железа и марганца на кварцевом песке и сорбенте *AC*, где впервые для материала *AC* была составлена и верифицирована детальная гидрохимическая модель, адекватно описавшая экспериментальные данные [6].

Целью настоящего исследования являлась всесторонняя оценка трансформации пористой структуры и сорбционного потенциала цеолита марки «Цеол» на различных стадиях его жизненного цикла в системе водоподготовки и разработка на этой основе комплексной гидрохимической модели, адекватно описывающей протекающие процессы и идентификацию ключевой роли органоминеральных отложений в процессе деградации загрузки.

**Материалы и методы исследования.** Объектом исследования служили три пробы цеолита марки «Цеол»:

- исходный (свежий) материал;
- цеолит, отобранный после эксплуатации продолжительностью 18 месяцев в фильтре обезжелезивания действующей станции водоподготовки в Витебской области. Пробы были отобраны из верхнего слоя загрузки, испытывающего наибольшую нагрузку;
- бывший в эксплуатации цеолит, подвергнутый обработке 0,1 М раствором HCl.

Исследуемый материал представляет собой природный цеолит, алюмосиликатный каркасный минерал с регулярной системой нанопор и каналов. Подвижные катионы ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), расположенные в полостях структуры, компенсируют отрицательный заряд алюмосиликатного каркаса, возникающий при изоморфном замещении кремния на алюминий в тетраэдрических позициях [2].

Именно эта структурная особенность обуславливает выраженные ионообменные свойства материала по отношению к катионам аммония. Фракционный состав загрузки составлял 0,8–1,2 мм при насыпной плотности 1,0 т/м<sup>3</sup><sup>1</sup>.

Отбор проб эксплуатированного цеолита производился из фильтров второй ступени технологической схемы станции водоподготовки, где данный материал использовался для задач доочистки воды после предварительного обезжелезивания. Такое расположение в технологической цепочке определяет специфический характер воздействия на загрузку, преимущественно остаточными концентрациями железа, аммонийного азота и растворенных органических веществ.

<sup>1</sup> Наполнители для фильтров: цеолит природный [Электронный ресурс] // Гидросити: сайт. – URL: <https://gidrositi.ru/catalog/napolniteli/tseolit/> (дата обращения: 16.07.2025).

Цеолит природный: производство, поставка, применение [Электронный ресурс] // Zeol.ru: сайт. – URL: <https://zeol.ru/> (дата доступа: 16.07.2025).

С целью диагностики природы загрязнений проводилась кислотная промывка бывшего в эксплуатации цеолита 0,1 М раствором HCl с последующим сравнением его текстурных характеристик до и после обработки. Использованная концентрация кислоты является достаточной для растворения карбонатных отложений и солей аммония, но щадящей для алюмосиликатного каркаса цеолита. Этот подход позволил оценить вклад различных типов загрязнений в общую потерю сорбционной емкости.

Текстурные характеристики образцов определялись на автоматизированном анализаторе *BELSORP MAX* (*MicrotracBEL Corp.*, Япония) по изотермам адсорбции-десорбции воды при температуре 20 °C и парциальном давлении насыщенного пара  $p_0 = 2,317$  кПа. Удельная поверхность и суммарный объем пор рассчитывались по методу BET, энергия адсорбции – по методу Дубинина-Астахова. Расчет параметров проводился с использованием программного обеспечения *BELMaster<sup>2</sup>* [7].

**Анализ текстурных характеристик.** Полученные изотермы адсорбции-десорбции паров воды для всех исследованных образцов соответствуют IV типу классификации IUPAC и содержат выраженную петлю гистерезиса, что подтверждает мезопористый характер структуры цеолита марки «Цеол». Анализ формы изотерм выявил существенные изменения в пористой структуре материала после эксплуатации. Для бывшего в эксплуатации цеолита наблюдается значительное сужение петли гистерезиса в области высоких относительных давлений ( $p/p_0 > 0,8$ ), что является прямым свидетельством частичного заполнения порового пространства продуктами загрязнения (рисунок 1, а). После кислотной промывки сохраняется общая форма изотермы, однако выраженное снижение объема адсорбции в области  $p/p_0 > 0,9$  указывает на необратимое уменьшение доли макропор и крупных мезопор, доступных для сорбции (рисунок 1, б).

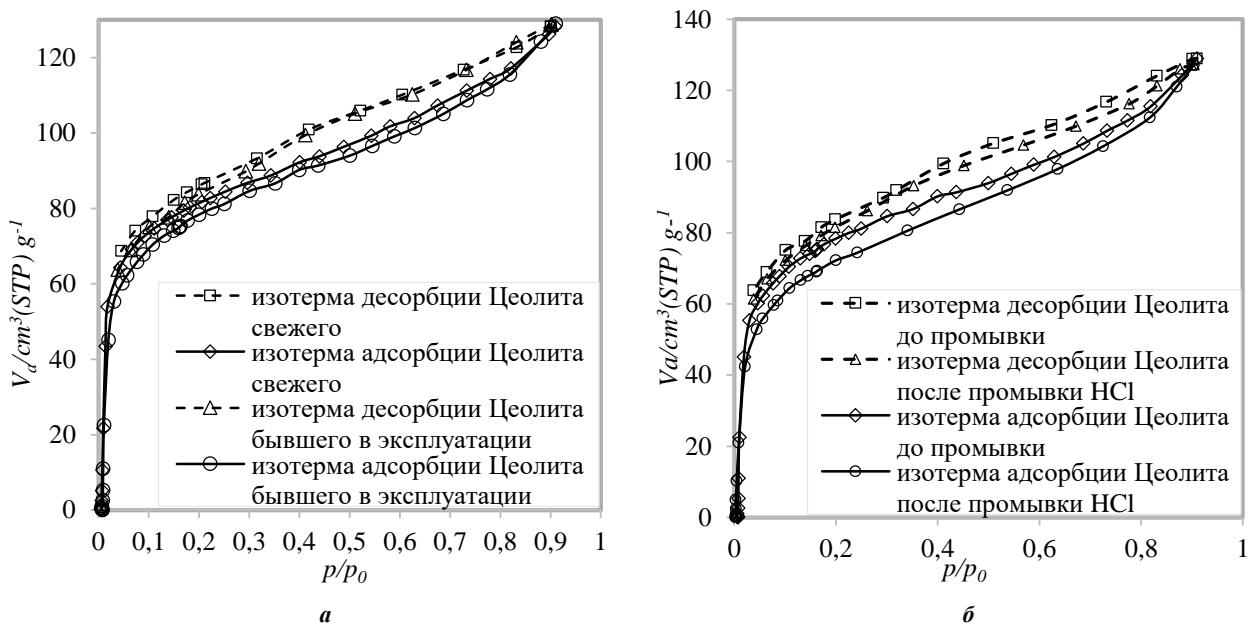


Рисунок 1. – Изотермы адсорбции/десорбции свежего и бывшего в эксплуатации цеолита (а) и изотермы адсорбции/десорбции бывшего в эксплуатации до и после промывки раствором HCl цеолита (б)

Результаты количественного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Текстурные характеристики цеолита

Показатель	Цеолит		
	свежий	бывший в эксплуатации	бывший в эксплуатации после промывки HCl
Удельная поверхность по методу BET, $m^2/g$	251,92	225,97	207,81
Суммарный объем пор по методу BET, $cm^3/g$ (при стандартных условиях)	75,013	67,285	61,877
Средний диаметр пор по методу BET, нм	1,64	1,84	1,97
Коэффициент $C$ (энергетическая константа)	76,093	112,76	96,24
Удельная поверхность по методу Ленгмюра, $m^2/g$	324,12	321,58	314,19
Суммарный объем пор по методу Ленгмюра, $cm^3/g$ (при стандартных условиях)	96,509	95,753	93,554
Коэффициент $B$	13,672	11,039	8,4802
Энергия адсорбции по методу Дубинина-Астахова (DA), кДж/моль	11,043	10,646	8,5672

<sup>2</sup> Высокоточный прибор для измерения адсорбции газа/пара. Руководство по эксплуатации / *MicrotracBEL Corp.* *BELSORP MAX*. – 2020. – 180 с.

*BELMaster. Analysis Software. User's Manual* / *MicrotracBEL Corp.* – 2020. – 227 р.

Проведенные исследования выявили существенную трансформацию структурных характеристик цеолита в процессе эксплуатации. Наблюдается согласованное уменьшение удельной поверхности по BET на 10,3% (с 251,92 до 225,97 м<sup>2</sup>/г) и общего объема пор на 10,3% (с 75,013 до 67,285 см<sup>3</sup>/г), что свидетельствует о прогрессирующем заполнении порового пространства продуктами загрязнения. Парадоксальное увеличение среднего диаметра пор на 12,2% (с 1,64 до 1,84 нм) указывает на селективную блокировку преимущественно узких мезопор, приводящую к относительному увеличению доли более широких транспортных каналов.

Энергетические характеристики материала претерпели значительные изменения: рост константы *C* в уравнении BET с 76,093 до 112,76 подтверждает формирование новых высоконапорных центров, связанное с осаждением оксидных соединений на поверхности цеолита. В противоположность этому, снижение энергии адсорбции по Дубинину-Астахову с 11,043 до 10,646 кДж/моль свидетельствует об общем уменьшении сорбционной активности материала по отношению к целевым компонентам, в частности ионам аммония.

Результаты, полученные по методу Ленгмиора, демонстрируют относительную стабильность микропористой структуры – уменьшение удельной поверхности на 0,78% (с 324,12 до 321,58 м<sup>2</sup>/г) и незначительное снижение объема пор. Однако уменьшение коэффициента *B* с 13,672 до 11,039 отражает снижение адсорбционного средства поверхности, обусловленное блокировкой активных центров.

Кислотная обработка эксплуатированного цеолита 0,1 М HCl, вместо ожидаемого восстановления параметров, привела к их дальнейшему ухудшению: удельная поверхность снизилась до 207,81 м<sup>2</sup>/г, объем пор – до 61,877 см<sup>3</sup>/г, тогда как средний диаметр пор увеличился до 1,97 нм. Синхронное уменьшение энергии адсорбции до 8,5672 кДж/моль и снижение коэффициентов *C* и *B* однозначно свидетельствуют о необратимой деградации сорбционного каркаса.

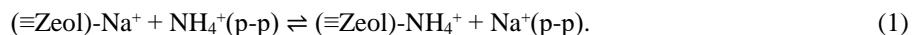
Критическим диагностическим признаком является отсутствие восстановления удельной поверхности после кислотной обработки. Этот факт, в сочетании с продолжающимся ростом среднего диаметра пор, доказывает, что доминирующим механизмом деградации являются не минеральные отложения, а устойчивые органо-железистые комплексы. Образование таких прочных соединений в пористой структуре объясняет постепенную потерю сорбционной емкости материала в процессе длительной эксплуатации.

Полученные данные послужили основой для разработки комплексной гидрохимической модели, описывающей процессы удаления загрязнений в цеолитовой загрузке с учетом выявленных механизмов деградации материала.

**Гидрохимическая модель процессов в цеолитовом фильтре.** На основании экспериментальных данных разработана гидрохимическая модель, описывающая функционирование цеолитовой загрузки в процессе вторичной фильтрации после сорбционных фильтров обезжелезивания до проведения регенерации. Модель включает две последовательно-параллельные стадии, обеспечивающие эффективное удаление ионов аммония (рисунок 2):

1. Стадия I (физико-химическая сорбция). На начальном этапе происходит быстрое заполнение легкодоступных высоконапорных центров на развитой поверхности цеолита. Молекулы и ионы NH<sub>4</sub><sup>+</sup> удерживаются за счет ван-дер-ваальсовых сил и электростатического взаимодействия с отрицательно заряженным алюмосяликатным каркасом. Данная стадия обеспечивает начальное высокое снижение концентрации аммония и легко обратима при промывке водой. Снижение аммония в этой стадии достигает 40–50%.

2. Стадия II (ионообмен). Параллельно и с меньшей скоростью, обусловленной диффузионными ограничениями, протекает глубокая доочистка посредством ионообмена. Ионы NH<sub>4</sub><sup>+</sup> диффундируют по порам к обменным позициям в каркасе цеолита и вытесняют ионы Na<sup>+</sup>:



Анализ ряда селективности цеолита для основных катионов (K<sup>+</sup> ≈ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > Mn<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > H<sup>+</sup>) объясняет высокую эффективность поглощения аммония в рабочем цикле, а также принципиальную возможность регенерации загрузки концентрированным раствором NaCl для вытеснения NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

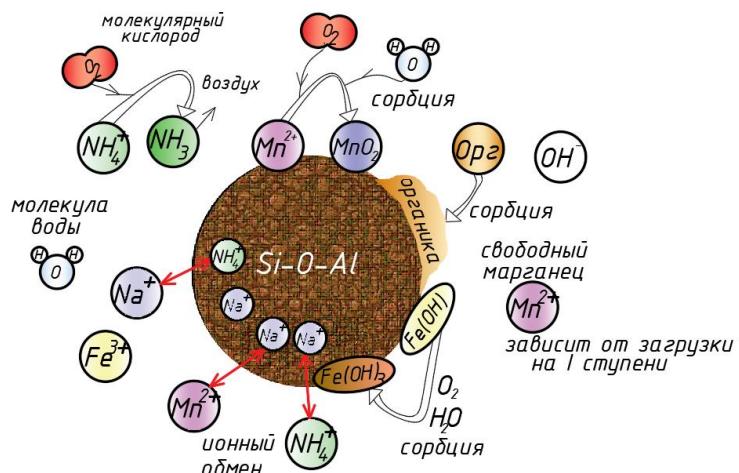
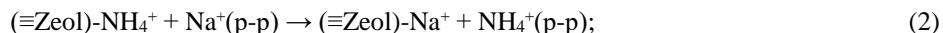


Рисунок 2. – Схематическое представление гидрохимической модели процессов в цеолитовом фильтре второй ступени

При достижении предельной обменной емкости или снижении качества очищенной воды проводится восстановление загрузки, включающее три последовательных этапа:

- 1) обратная промывка – удаление механических загрязнений и взрыхление фильтрующего слоя;
- 2) классическая регенерация 8% раствором NaCl – вытеснение ионов аммония из обменных позиций согласно уравнению:



- 3) отмывка – удаление остатков регенерирующего раствора и продуктов регенерации.

Данный способ восстановления сорбционной способности цеолита является безопасным и отработанным методом восстановления ионообменной емкости, особенно для малых установок, где использование кислотного хозяйства неприемлемо из-за коррозии оборудования и сложности утилизации стоков.

При поступлении на вторую ступень фильтров повышенных концентраций железа и органических веществ (в обходной схеме или при недостаточной эффективности первой ступени очистки), в цеолитовой загрузке протекают конкурирующие процессы, приводящие к ее необратимой деградации. В этом случае остаточные количества растворенных органических веществ и следовые концентрации железа в виде гидролизованных комплексов Fe(III) сорбируются в мезопорах цеолита. При наличии остаточного растворенного кислорода возможно образование оксигидроксидных пленок (FeOOH) на поверхности цеолита [4; 5]. Первоначально эти пленки могут создавать дополнительные сорбционные центры для ионов аммония через образование поверхностных комплексов ( $\equiv\text{FeOOH}-\text{O}^- \cdots \text{NH}_4^+$ ), что временно повышает рабочую обменную емкость. Однако со временем в пористом пространстве сорбированные органические лиганды и соединения железа формируют прочные хелатные органо-железистые комплексы.

Образование таких комплексов, обладающих исключительно высоким сродством к цеолитовому каркасу, полностью согласуется с полученными экспериментальными данными: необратимым снижением удельной поверхности и объема пор, а также безуспешностью попытки восстановления характеристик кислотной промывкой. Эти структуры создают в порах плотную нерастворимую матрицу, которая:

- физически блокирует доступ ионов  $\text{NH}_4^+$  к ионообменным центрам;
- необратимо снижает удельную поверхность и объем пор;
- не удаляется в процессе стандартной регенерации NaCl.

**Заключение.** Проведенные исследования показали, что стандартная регенерация NaCl довольно эффективно восстанавливает ионообменную емкость цеолита по отношению к аммонию, однако бессильна против органо-железистых комплексов, являющихся основной причиной необратимой деградации загрузки.

Критическим условием долговременной стабильности цеолитовой загрузки является максимальное снижение нагрузки по железу и органическим веществам на входе на вторую ступень. В связи с этим экспериментально установленное необратимое снижение удельной поверхности и объема пор позволяет определить критерий эффективности предварительной очистки: поддержание концентрации железа после первой ступени на уровне, не превышающем 0,3 мг/л (нормируемое значение).

Для обеспечения этого условия, а также для дестабилизации органо-железистых комплексов, критически важным является внедрение предварительной напорной аэрации перед подачей воды на цеолитовую ступень. Данная мера, обоснованная результатами исследования, позволяет:

- 1) обеспечить окисление остаточных соединений железа – перевести  $\text{Fe}^{2+}$  в  $\text{Fe}^{3+}$  с последующим образованием легко удаляемых форм гидроксидов железа;
- 2) дестабилизировать органические комплексы – разрушить устойчивые органо-железистые соединения, предотвращая их проникновение в поровое пространство цеолита;
- 3) снизить органическую нагрузку – за счет частичного окисления легкодоступной органики и уменьшения ее сорбции на цеолите.

Реализация предлагаемых мер в рамках существующей технологической схемы с двухступенчатой аэрацией и предварительным обезжелезиванием обеспечит сохранение сорбционной емкости цеолита и существенно увеличит межрегенерационный период его работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yushchenko V., Velyugo E., Romanovski V. Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – Vol. 22. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
2. Велюго Е.С., Ющенко В.Д., Козицин Т.В. Изучение фильтрующих свойств цеолитовых загрузок для обезжелезивания подземных вод Полоцкого региона // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей II Международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г. / Полоцкий государственный университет; под ред. Л.М. Парфеновой. – Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 2020. – С. 533–538. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/25545> (дата обращения: 25.11.2025).

3. Велюго Е.С. Влияние аммонийного азота на состав и очистку подземных вод // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов», приуроченной ко всемирному дню водных ресурсов, 22–24 марта 2023 г., г. Минск / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, РУП «ЦНИИКИВР»; отв. ред. О.В. Ковзунова. – Минск: Национальная библиотека Беларусь, 2023. – С. 96–100.
4. Применение цеолитов клиноптилолитового типа для очистки природных вод [Электронный ресурс] / Н.И. Ватин, В.Н. Чечевичкин, А.В. Чечевичкин и др. // Magazine of Civil Engineering. – 2013. – № 2. – С. 81–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenie-tseolitov-klinoptilolitovogo-tipa-dlya-ochistki-prirodnyh-vod> (дата обращения: 24.11.2025).
5. Kordala N., Wyszkowski M. Properties of Zeolites, Synthesis Methods and Some Areas of Application // Molecules. – 2024. – Vol. 29, Iss. 5. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/5/1069> (дата обращения: 24.11.2025).
6. Велюго Е.С., Ермак А.А., Ющенко В.Д. Гидрохимические модели удаления железа и марганца на кварцевом песке и сорбенте АС // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2025. – № 2. – С. 23–30. DOI: 10.52928/2070-1683-2025-41-2-23-30.
7. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость. – М.: ВАХЗ, 1972. – 128 с.

## REFERENCES

1. Yushchenko, V., Velyugo, E., & Romanovski, V. (2023). Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations. *Groundwater for Sustainable Development*, 22, 100943. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
2. Velyugo, E.S., Yushchenko, V.D., & Kozitsyn, T.V. (2020). Izuchenie fil'tryushchikh svoistv tseolitovykh zagruzok dlya obezzhelezivaniya podzemnykh vod Polotskogo regiona [Study of the filtering properties of zeolite loads for iron removal from groundwater in the Polotsk region]. In L.M. Parfenova (Eds.) *Arkhitektурно-строител'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii* [Architectural and construction complex: problems, perspectives, innovations] (533–538). Novopolotsk: Polotsk State University. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/25545>. (In Russ.).
3. Velyugo, E.S. (2023). Vliyanie ammoniinogo azota na sostav i ochistku podzemnykh vod [Influence of ammonium nitrogen on the composition and treatment of groundwater]. In O.V. Kovzunova (Ed.), *Sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy effektivnogo i kompleksnogo ispol'zovaniia vodnykh resursov»* [Collection of materials of the international scientific-practical conference "Current issues of effective and comprehensive use of water resources"] (96–100). Minsk: National Library of Belarus. (In Russ.).
4. Vatin, N.I., Chechevichkin, V.N., Chechevichkin, A.V., & Shilova, E.S. (2013). Primenie tseolitov klinoptilolitovogo tipa dlia ochistki prirodnykh vod [Application of clinoptilolite-type zeolites for natural water purification]. *Magazine of Civil Engineering*, 2, 81–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenie-tseolitov-klinoptilolitovogo-tipa-dlya-ochistki-prirodnyh-vod> (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kordala, N., & Wyszkowski, M. (2024). Properties of Zeolites, Synthesis Methods and Some Areas of Application. *Molecules*, 29(5). URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/5/1069>.
6. Velyugo, E.S., Ermak, A.A., & Yushchenko, V.D. (2025). Gidrokhimicheskie modeli udaleniiia zheleza i margantsa na kvartsevom peske i sorbente AS [Hydrochemical models of iron and manganese removal on quartz sand and AS sorbent]. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye Nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series F, Construction. Applied Sciences], (2), 23–30. DOI: 10.52928/2070-1683-2025-41-2-23-30. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Dubinin, M.M. (1972). *Adsorbsii i poristost'* [Adsorption and porosity]. Moscow: VAKhZ. (In Russ.).

Поступила 16.10.2025

## MODIFICATION OF STRUCTURAL AND SORPTION PROPERTIES OF ZEOLITE DURING REMOVAL OF AMMONIUM AND IRON IONS FROM GROUNDWATER

**E. VELYUGO, A. YERMAK, V. YUSHCHENKO**  
*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*This paper presents the results of a comprehensive study on the changes in the textural and adsorption characteristics of the natural zeolite brand "Tseol" during its operation as a filter medium in second-stage filters at an iron removal plant. Water vapor adsorption-desorption methods at 20°C established that operation leads to a statistically significant reduction in the specific surface area (from 251.92 to 225.97 m<sup>2</sup>/g by the BET method) and the total pore volume (from 75.013 to 67.285 cm<sup>3</sup>/g). Based on the experimental data, a hydrochemical model of the loading operation cycle combining sorption and ion exchange was developed. To preserve the service life of the filter medium, optimization of the preceding treatment stage aimed at reducing iron and organic substance concentrations in the feed water is necessary.*

**Keywords:** zeolite, ion exchange, iron removal, ammonium removal, porous structure, adsorption, hysteresis, hydrochemical model, regeneration, organo-iron complexes.

## СОХРАНЕНИЕ ТРАДИЦИЙ В ХРАМОВОЙ АРХИТЕКТУРЕ ПРИ РЕСТАВРАЦИИ АЛЕКСАНДРО-НЕВСКОЙ ЦЕРКВИ В МИНСКЕ

канд. техн. наук, доц. Р.М. ПЛАТОНОВА<sup>1)</sup>, Д.А. ШПАНОВСКАЯ<sup>2)</sup>, Н.И. ЛУКЬЯНЧИК<sup>3)</sup>

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

<sup>3)</sup> ЧПУП «Православная мастерская архитектора Лукьянчика Н.И.», Минск)

<sup>1)</sup> ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5747-4426>

<sup>1)</sup> poak.af@bntu.by, <sup>2)</sup> alexej0779@yandex.by, <sup>3)</sup> nil5011@mail.ru

*В статье рассматривается история создания и этапы реставрации церкви Александра Невского, расположенной в Минске, с акцентом на сохранение традиций, характерных для многовековой храмовой архитектуры Беларуси. Проанализированы объемно-планировочные и конструктивные особенности здания, возведенного в конце XIX столетия. На основе ранее выполненных работ по ремонту и реконструкции несущих и ограждающих элементов (2015–2018 гг.), а также реставрации внутреннего убранства, в 2023 году был разработан проект реставрации данного храма, являющегося важным объектом историко-культурного наследия Беларуси. Это позволит обеспечить его сохранность для будущих поколений.*

**Ключевые слова:** реставрация, церковь, традиции, храмовая архитектура, ремонт, реконструкция, проект, историко-культурное наследие.

**Введение.** В связи с ростом интереса к белорусской культуре важным аспектом является внимание к историческим, моральным и духовным ценностям. Белорусское храмовое зодчество выступает ориентиром, так как роль церкви возросла, а храм – хранитель духовных и исторических ценностей в архитектурной среде. Образ храма – отражение культуры и ее развития, что важно для укрепления самобытных ценностей белорусского народа.

**Основная часть.** Продвижению идей Православия на белорусских землях способствовало вхождение Беларуси в состав Российской империи. Влияние России на сооружение культовых зданий было велико. Однако в течение многовековой истории существования православных храмов белорусскими зодчими были выработаны свои отличительные особенности их возведения и архитектурного формирования. В XII–XIII веках на территории Беларуси было большое разнообразие школ православного зодчества, которые в свою очередь оказывали влияние на архитектуру соседних государств. На протяжении последующих периодов до XVIII века православное искусство нашей страны продолжало искать новые пути развития канонической художественной формы, обладающей глубоким духовным содержанием.

С 1980-х годов в Республике Беларусь особое внимание придается культовой архитектуре. Возобновилась деятельность православных и католических храмов, создаются условия для реставрации и реконструкции разрушенных культовых сооружений, а также ведется проектирование и строительство новых [1]. Сохранение традиций в храмовой архитектуре при реставрации Александро-Невской церкви является актуальной задачей.

Построенный в конце XIX века, Александро-Невской храм дошел до нас в своем первозданном виде. Главной особенностью этой святыни является то, что в ее строительстве отразились принципы церковного предания, основанные на требовании единого внутреннего и внешнего выражения. Церковь расположена на Военном кладбище г. Минска и входит в Государственный список историко-культурных ценностей.

Весной 1896 г. началось ее строительство по проекту епархиального архитектора В.И. Струева. В этом же году была совершена торжественная закладка первого камня [2, с. 47–48]. Появление храма святого благоверного великого князя Александра Невского непосредственно связано с историей 119-го пехотного Коломенского полка, более полувека дислоцировавшегося в Минске. 2 февраля 1898 года, на Сретение храм был освящен Минским и Туровским епископом Симеоном [2, с. 52].

Традиционная особенность архитектуры данного храма проявляется в четком и выразительном силуэте здания. Это было вызвано стремлением добиться наибольшей представительности храма, его доминантного характера по отношению к окружающей среде. Позаимствована у Византии и крестно-купольная композиция [3, с. 211]. Правда, зодчими она была переработана и приспособлена к более суровым северным широтам путем постановки главного купола на высокий световой восьмигранный барабан (рисунок 1) [4].

Другие колокола – меньше размером, звонкие голоса которых вторят величию главного благовеста, покоятся на изящных граненых шеях. Количество глав совпадает с количеством престолов, освящающих храм, верность традиции, свято чтимая архитектором В. Струевым. В средней части здания, словно четыре незыблемые опоры веры, возвышаются столпы, поддерживающие небесный свод и олицетворяющие четырех евангелистов, стражей четырех сторон света.

Боковые фасады прорезаны прямоугольными окнами с полуциркулярным завершением. Пролеты декорированы карнизом арочного очертания. Главный фасад завершается полуциркулярным фронтом, окнами (рисунок 2) [4].

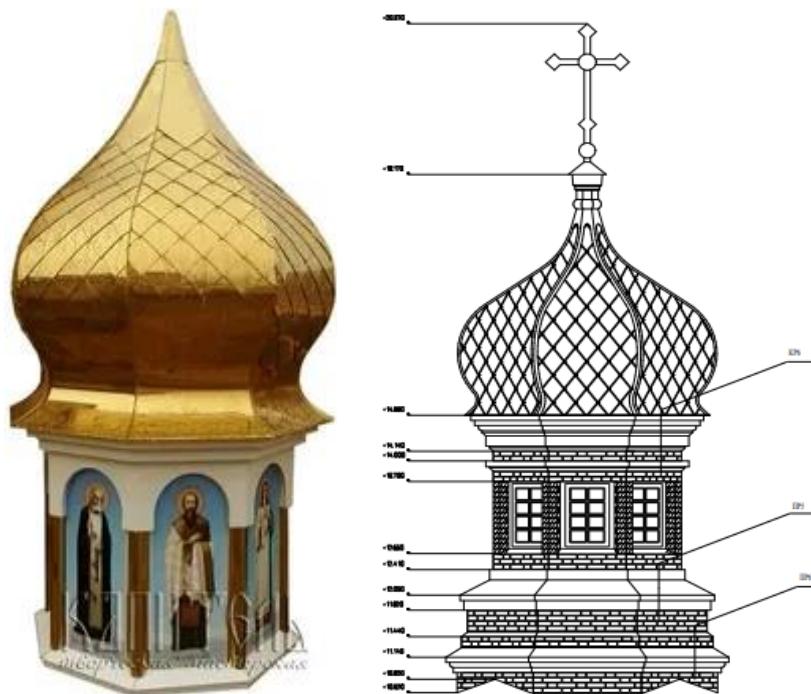


Рисунок 1. – Световой восьмигранный барабан Александро-Невского храма [4]

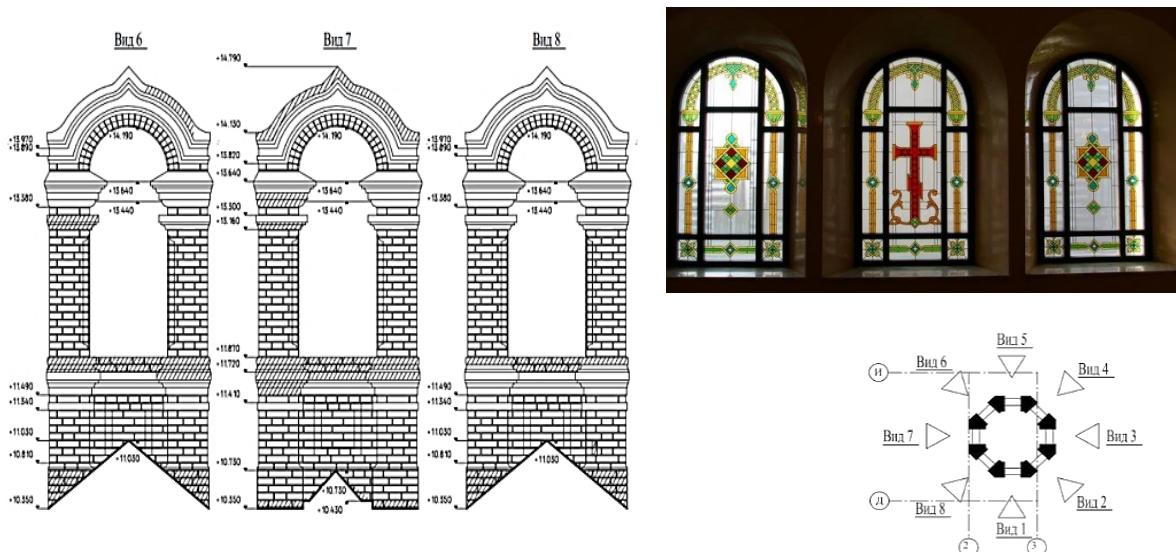


Рисунок 2. – Окна храма [4]

В своей основе храм представляет собой триединую структуру: алтарь, здимый образ небесного присутствия Господа; среднюю часть, просторную залу для молитв и духовных размышлений; и притвор, символ земной греховности, границу между миром дольним и горним.

Схема планировки храма (рисунок 3) [4] – это гармоничное воплощение божественного порядка, где симметрия относительно продольной оси подчеркивает стремление к небесной красоте и парадной торжественности. Место возведения храма – не случайность, а осознанный выбор, продиктованный религиозными установками и эстетическими соображениями.

Храм Александра Невского воздвигнут на святом месте, где некогда стояла разрушенная церковь. Предание гласит, что такое место, освященное молитвами поколений, дарует храму долголетие и любовь народа. И словно в подтверждение этих слов, во время войны упавшая на крышу бомба не взорвалась, оставив строение нетронутым. Без бережного сохранения древних традиций невозможно было бы создание такого уникального храма, в материальных формах которого находит отражение невидимый божественный мир.

На первый взгляд храм кажется немного тяжеловесным. Это объясняется тем, что здание до 1898 года, согласно проекту В. Струева, было без боковых приделов (рисунок 4) [2, с. 52].

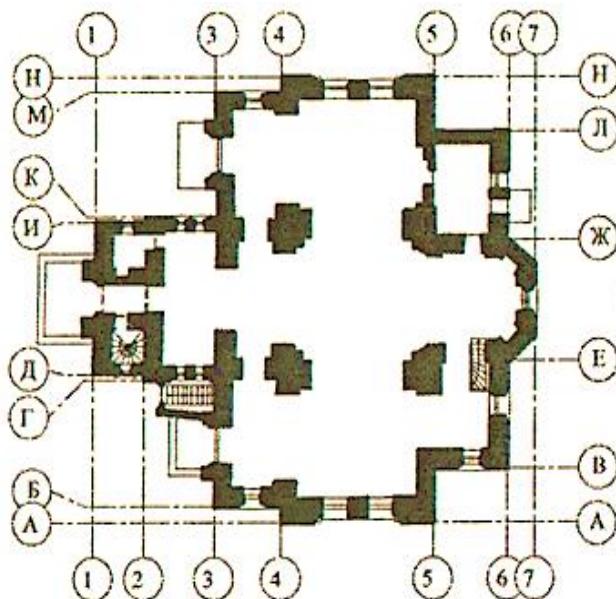


Рисунок 3. – План-схема Александро-Невского храма [4]



Рисунок 4. – Александро-Невский храм на фото 1898 года [2, с. 52]

Боковые приделы, пристроенные позже стараниями священника Павла Богдановича, придали храму знакомый нам сегодня облик со следующими параметрами: длина – 23,47 м; ширина – 20,88 м; высота от отмостки до крестов – 23,33 м. Это обстоятельство, несомненно, повлияло на его внешний вид, придав ему большую массивность и приземистость, но не лишило красоты (рисунок 5) [2, с. 54].

Возможно, свою роль играет цветовое решение фасадов, построенное на контрасте красно-охристых кирпичных стен и белоснежных элементов декора. Этот цвет щедро использован в карнизах, зубчатых фризах, арочных оконных проемах, розетках, тягах, клиноподобных кокошниках и угловых колоннах. Стоит отметить, что кирпичная кладка всегда привлекала архитекторов. Во-первых, это строительство на века, а во-вторых, кирпичная кладка – ручная, штучная работа, сравнимая с искусством ювелира.

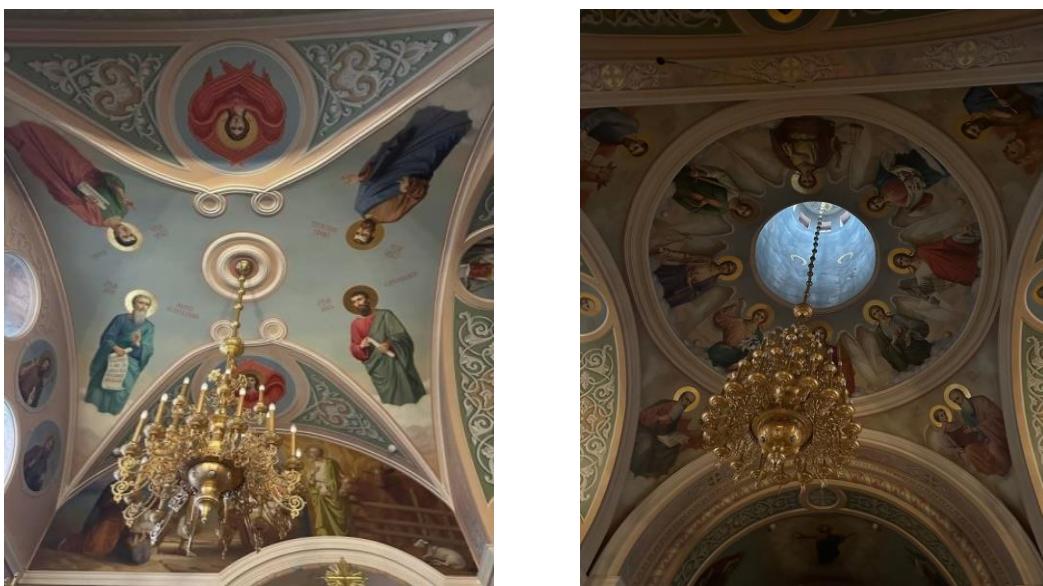
Сохраняя основные черты византийских храмов, Александро-Невская церковь обладает неповторимым своеобразием. К зданию примыкает пятигранный полукруглый апсида, а слева и справа к апсиде примыкают ризница и пономарка. Строго каноническим остается лишь алтарь. Согласно церковному преданию, над этой частью храма не должно быть помещений иного назначения. Обязательным условием является приподнятость алтаря над молитвенным залом, а молитвенного зала – над землей. В церковном понимании это символизирует ступенчатое Восхождение от земли к небу.



**Рисунок 5. – Александро-Невский храм на фото начала XX века [2, с. 54]**

При использовании традиций в храмовом строительстве нельзя забывать об особенностях реконструкции и реставрации церковных зданий. Церковь Александра Невского является памятником архитектуры конца XIX века. Вместе с тем за период ее существования в облике этой святыни произошли изменения. Многие элементы здания, пришедшие в негодность, в современных условиях либо не изготавливаются, либо выполняются по новым технологиям из новых материалов. В связи с этим остается вопрос: не внесут ли корректизы изменения во внешний облик постройки.

В 2017 году была разработана научно-проектная документация ремонтно-реставрационных работ внутренней части храма Александра Невского. В течение года осуществлен целый комплекс работ по обновлению столярных изделий святыни. Краснодеревщики и позолотчики постарались в точности передать рисунок, цвет и материал витражей, алтарных окон, престола главного алтаря, аналоя перед царскими вратами. С соблюдением изначальной конструкции полностью заменены переплеты наружных окон, гранитом перестелен пол и облицованы природным камнем – мрамором – панели на внутренних стенах, закончена роспись храма и дополнительно расписаны потолки правого и левого приделов; расписан и позолочен иконостас. В наше время православные храмы часто расписывают в каноне – по-византийски. Но тут, чтобы не нарушать архитектурную стилистику, заданную иконами, утварью и деталями интерьера XIX века, росписи выполнили в академическом живописном стиле. Для этого пригласили палехских мастеров из России, которые работают в дореволюционных традициях (рисунок 6).



**Рисунок 6. – Роспись потолка Александро-Невского храма (фото авторов)**

Были отреставрированы имеющиеся в храме ценные с точки зрения архитектуры предметы и реликвии. Это, к примеру, главный престол, на котором служилась первая Божественная Литургия в 1898 году, а также находящиеся в храме металлические хоругви и рапиды 119-го Коломенского полка.

Особое место среди реликвий занимает деревянный киот в виде декоративной часовенки, сооруженный к празднованию 100-летия 119 Коломенского полка руками его офицеров и нижних чинов в 1897 году [2, с. 60–64] (рисунок 7). Художественные особенности этой реликвии в том, что аналогов такого строения нигде не выявлено.



Рисунок 7. – Киот-часовня Александро-Невского храма [2, с. 63]

До нашего времени сохранилась еще одна святыня, связанная с историей 119-го пехотного Коломенского полка, – икона святого Иоанна Воина (рисунок 8). Икона была заказана в память о больших маневрах войск, проходивших в районе Белостока в августе 1897 года, на которых присутствовал царь Николай II, и по итогам которых он объявил полку «Царское спасибо».



Рисунок 8. – Икона святого Иоанна Воина (фото авторов)

Работа, проведенная по реставрации внутреннего пространства церкви Александра Невского, – лишь первый шаг. Проведению реставрационных работ подлежат также наружные стены храма. Возведены они были из высококачественного керамического простого и фасонного кирпича на сложном растворе конца XIX – начала XX веков, однако время оставило на них свои разрушительные следы. Не пощадило оно оштукатуренные и окрашенные декоративные элементы храма, которые тоже нуждаются в ремонте. При обследовании храма также установлено, что все поверхности стен (порядка 45% общей площади храма) имеют следы ранее нанесенной штукатурки, покраски фасадов, биологических деструкторов. Около 10% поверхности стен имеют незначительные сколы, выплескенности, трещины отдельных кирпичей, отслоение поверхности штукатурки лепных элементов декора, профилированных тяг, профилей карнизов и поясков. В оконных проемах, на откосах зафиксированы следы штукатурки kleевыми составами. Здесь требуется очистка и восстановление кирпичной кладки. Порталы дверных проемов оштукатурены после установки дверей и окрашены в цвет кирпича, требуют снятия штукатурки и очистки, с восстановлением кирпичной кладки.

В связи с этим, согласно требованиям Кодекса о культуре Республики Беларусь, был составлен проект «Реконструкция храма Александра Невского в г. Минске». Разработчиками проекта стали архитекторы Лукьянчик Н.И. и Маслиев О.И. [4]. Работы по реставрации проводятся «Белреставрацией» (рисунок 9).

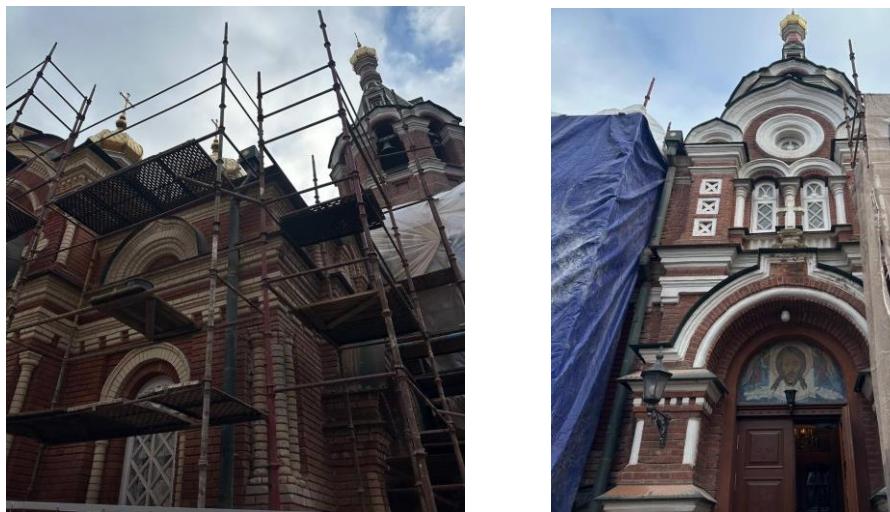
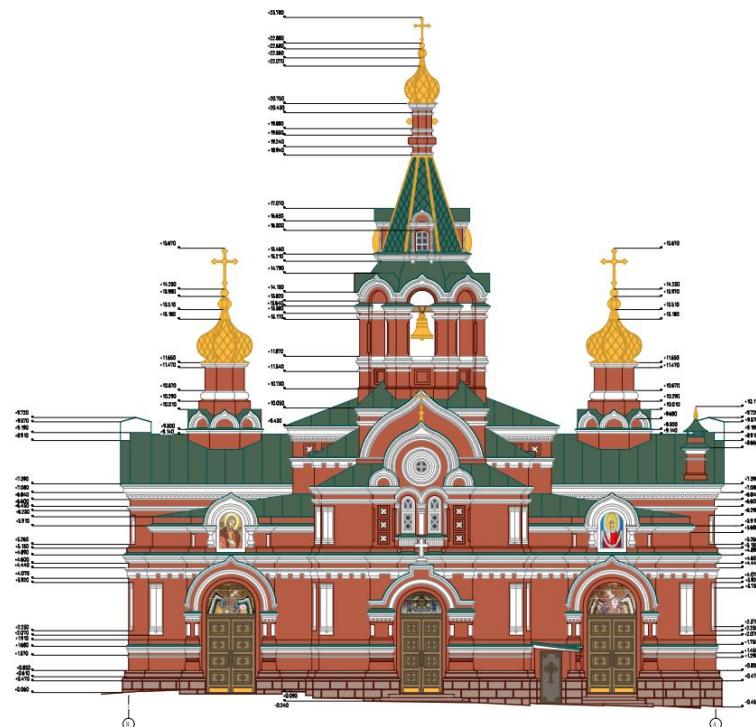


Рисунок 9. – Реставрация фасадов храма Александра Невского (фото авторов)

Авторы проекта уверены в том, что в храмовом зодчестве творчество архитектора не обезличивается, а, наоборот, живет полноценной жизнью в созвучии с архитектурной традицией. Поэтому основным требованием проведения реставрационных работ являлось максимально сохранить аутентичность здания храма, в связи с чем большое внимание было уделено отделке фасадов и их цветовому решению (рисунок 10).



Декоративные элементы фасада восстанавливаются методом вытягивания тела лепнины непосредственно на фасаде или изготавливаются методом отливок с соблюдением всех требований реставрационных работ.

Окрашивание загрунтованной поверхности выполняется краской фасадной водно-дисперсионной силиконовой Color LA, морозостойкой, с пленочной защитой от поражения водорослями и грибком, низким внутренним напряжением, атмосферостойкостью, низкой склонностью к загрязнению, высокой непроницаемостью для жидкой влаги, устойчивостью к ультрафиолету, устойчивостью к промышленным газовым выбросам и микроорганизмам, без склонности к набуханию [4].

**Заключение.** В архитектуре современных православных храмов Беларусь трепетно хранятся русско-византийские традиции и самобытные черты национального сакрального зодчества. Это проявляется в композиционных решениях, конструктивных особенностях, архитектурных элементах, формирующих неповторимый облик, и в цветовой палитре. При этом современные строительные технологии, материалы и производственные методы не только допустимы, но и необходимы при проведении реставрационных работ, позволяя вдохнуть новую жизнь в древние святыни.

Александровская церковь, словно драгоценный камень, украшает белорусскую столицу. Это не просто храм, а одухотворенное произведение искусства, в котором, возможно, и не отразилась в полной мере белорусская храмовая архитектура, но бесспорно нашли свое воплощение многовековой опыт мастеров и вековые традиции белорусского народа.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Платонова Р.М., Карпинович Г.П. Деревянный храм Святителя Николая Чудотворца в деревне Латыголь Вилейского района // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей IV международной научной конференции, Новополоцк, 20–21 апр. 2022 г. / Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой; редкол.: Д.Н. Лазовский (председ.) и др. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2022. – С. 26–33.
- Церковь Святого Александра Невского в Минске на военном кладбище / сост.: Л.Е. Кулаженко, Г.Н. Шейкин; под общ. ред. Н. Коржича. – Минск: Приход храма благоверного князя Александра Невского в г. Минске, 2018. – 175 с.
- Кулагін А.М. Сакральна-манументальна дойлідства / Ахітэктура Беларусі: нарысы эвалюцыі ва усходнеславян. і єурап. кантексле. У 4 т. Т. 3, кн. 2. Другая палова XIX – пачатак XX ст. / А.І. Лакотка і інш.: наука. рэд. А.І. Лакотка. – Мінск: Беларус. наука, 2007. – С. 211.
- Реконструкция храма Александра Невского в г. Минске: строительный проект № 33.21 (объект 08-C/2022- AP) / Частное проектное унитарное предприятие «Православная мастерская архитектора Лукьянчика Н.И.»; рук. Лукьянчик Н.И.; исполн. Маслиев О.И. – Минск: БНТУ, 2023. – 57 с.

#### REFERENCES

- Platonova, R.M., & Karpinovich, G.P. (2022). Derevyannyy khram Svyatitelya Nikolaya Chudotvortsa v derevne Latygom' Vileyskogo rayona [Wooden Church of St. Nicholas the Wonderworker in Latygom village, Vileika District]. In D.N. Lazovskii (Eds.) *Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations: electronic collection of articles: sb. statei* (26–33). Novopolotsk: Polotskii gosudarstvennyi universitet imeni Evfrosinii Polotskoi. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Kulazhenko, L.E., Sheikin G.N., & Korzhich, N. (Eds.). (2018). Tserkov' Svyatogo Aleksandra Nevskogo v Minske na Voyennom Kladbischche [Church of St. Alexander Nevsky in Minsk at the military cemetery]. Minsk: BNTU. (In Russ.).
- Kulagin, A.M. (2007). Sakralna-manumentalnaje dojlidstva. Achitektura Bielarusi: narisy evaliuciyi va uschodnieslavian. i jeurap. kantekscie [Sacred and Monumental architecture. Architecture of Belarus: Essays on Evolution in the East Slavic and European context]. In 4 vols. T.3, book 2. A.I. Lakotka and others (211). Minsk: Belarus. navuka. (In Belarus.).
- Lukyanchik, N.I., & Masliev, O.I. (2023). Rekonstruktsiya khrama Aleksandra Nevskogo v Minske: stroitel'nyy proyekt № 33.21 [Reconstruction of the Alexander Nevsky Temple in Minsk: construction project No. 33.21]. Minsk: BNTU. (In Russ.).

Поступила 09.09.2025

#### PRESERVATION OF TRADITIONS IN TEMPLE ARCHITECTURE DURING THE RESTORATION OF ALEXANDER NEVSKY CHURCH IN MINSK

**R. PLATONOVA<sup>1)</sup>, D. SHPANOVSAYA<sup>2)</sup>, N. LUKYANCHIK<sup>3)</sup>**

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

<sup>3)</sup> Orthodox workshop of architect Lukyanchik N.I., Minsk

The history of creation and the stages of restoration of Alexander Nevsky Church in Minsk with its emphasis on preserving the traditional characteristics of temple Belarussian architecture is considered. The space-planning and structural features of the 19<sup>th</sup> century building are analyzed. Based on previously completed repair work and reconstruction of load-bearing and enclosing elements in 2015–2018, as well as the restoration of the interior, a restoration project for this church was developed in 2023. This contribution will ensure its preservation for future generations.

**Keywords:** restoration, church, traditions, temple architecture, repair, reconstruction, project, historical and cultural heritage.

## ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.48:621.64

DOI 10.52928/2070-1683-2025-42-3-40-48

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НА СТАДИИ ОБСЛЕДОВАНИЯ

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

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье выполнен обзор существующих традиционных методов определения деформаций стенок резервуаров и рассмотрена новая технология математической обработки результатов геодезической съемки вертикальных стальных резервуаров, выполняемой электронным тахеометром. Существующие методы в основном реализованы на вычислении отклонений поверхности оболочки резервуара от вертикали по образующим и построении графиков для наглядности полученных результатов. Далее величины деформации стенок резервуара сравниваются с допусками, приведёнными в нормативных документах. Авторами предлагается алгоритм обработки измерений, который позволяет аналитически определить корреляцию деформаций стенок и днища резервуара, а также получить более наглядную графическую информацию для анализа величин и направлений деформаций всего резервуара. Предлагаемый алгоритм позволяет давать надежную оценку определения остаточного ресурса резервуара для принятия решения о продлении его срока эксплуатации или необходимом текущем ремонте.

**Ключевые слова:** вертикальный стальной резервуар, деформации, точность, аппроксимация, метод наименьших квадратов, вектор направляющих косинусов.

**Введение.** Вертикальные стальные цилиндрические резервуары (РВС) – это крупногабаритные емкости, предназначенные для хранения жидких веществ (нефти, нефтепродуктов, химикатов, воды и др.). Они используются на нефтебазах, химических предприятиях и прочих промышленных предприятиях.

Ввиду повышенной опасности, которую представляют вертикальные стальные цилиндрические резервуары, необходимо уделять особое внимание их техническому состоянию, соблюдать строгие меры безопасности и осуществлять регулярный мониторинг для оценки технического состояния и определения остаточного ресурса.

Возвведение резервуаров для хранения нефтепродуктов на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями, такими как переувлажнённые, заторфованные или пучинистые грунты, представляет собой сложную техническую задачу. Это связано с тем, что такие грунты обладают низкой несущей способностью, высокой степенью деформации и подвержены сезонным изменениям, что может негативно сказываться на устойчивости и эксплуатационной надёжности резервуаров.

Просадка оснований резервуаров, предназначенных для хранения нефтепродуктов, является одной из ключевых проблем при эксплуатации на сложных грунтах. Она приводит к неравномерным деформациям днища, стенок и других элементов металлических конструкций, которые усиливаются под действием веса нефтепродуктов. Неравномерные осадки и деформации могут вызвать нарушение прочности сварных швов, образование трещин, потерю герметичности и, как следствие, приводить к утечке опасных веществ.

Любое отклонение от проектного положения, которое определено в проектно-конструкторской документации, приводит к снижению надёжности конструкции и способствует увеличению риска возникновения аварийных ситуаций.

Техническое диагностирование сооружений и технологического оборудования включает в себя поиск дефектов, выполнение измерений для определения геометрических параметров и физико-химический контроль материалов. Вместе с признаками, характеризующими физический износ материалов металлоконструкций, особое внимание уделяют признакам, характеризующим деформации конструкций, их пространственное и взаимное положение (геометрические параметры).

Геодезический контроль геометрических параметров сооружений – это совокупность процедур по измерению и анализу пространственного положения, конфигурации и размеров конструкций и сооружений с целью выявления деформаций, смещений и отклонений от проектных параметров. Он является одним из важнейших инструментов обеспечения безопасности и долговечности объектов строительства и позволяет своевременно выявлять деформации для принятия профилактических мер.

**Основная часть.** В действующем нормативном документе<sup>1</sup> определены методы выполнения измерений при контроле вертикальных и горизонтальных цилиндрических резервуаров с использованием традиционного геодезического оборудования – теодолитов и нивелиров. Также определена форма представления результатов обработки измерений и система допусков. Кроме того, определен формат представления результатов обработки полученных измерений и, соответственно, значения допустимых отклонений.

<sup>1</sup> СТБ 2634-2023. Резервуары для нефти и нефтепродуктов. Общие требования. – Минск, 2023. – 142 с.

Основные требования, касающиеся геометрии резервуара, связаны с обеспечением горизонтальности днища и вертикальности стенок резервуара. Результаты определения отклонений стенок резервуара от вертикали оформляются в виде таблицы и графиков, которые обычно размещают попарно для диаметрально-противоположных образующих. Такая компоновка графического материала позволяет анализировать связь величин отклонений образующих и общий наклон резервуара. Пример графического отображения отклонений стенок резервуара от вертикали приведен на рисунке 1.

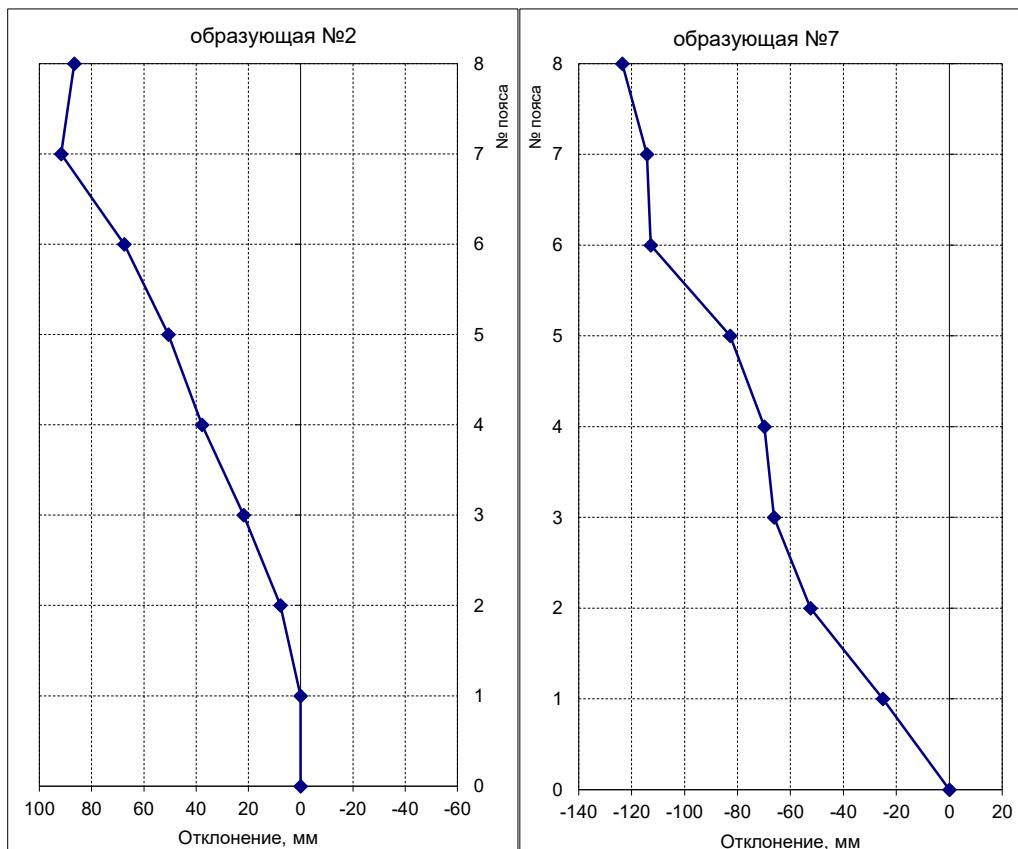


Рисунок 1. – Графики отклонений образующих резервуара от вертикали

Применение современных геодезических приборов, таких как электронные тахеометры и лазерные сканеры, радикально меняет возможности получения данных о геометрии объектов, предоставляя значительно больший объем информации в цифровом виде. Электронные тахеометры обеспечивают точность определения координат точек до 2–3 мм и позволяют собрать достаточное количество точек на стенке резервуара для эффективного применения метода наименьших квадратов.

Для такого варианта выполнения измерений наиболее оптимальной будет методика определения геометрических параметров стенок резервуаров по методу наименьших квадратов, используя координаты точек на стенке резервуара, вычисленные по результатам измерений. Предлагаемый алгоритм – построение параметрической модели наклонного цилиндра и оценка её параметров из набора трёхмерных точек методом наименьших квадратов. Это позволит получить достоверные и надежные оценки геометрического состояния резервуара, необходимые для мониторинга деформаций и принятия инженерных решений.

В идеале поверхность стенки резервуара должна представлять собой строго вертикальный цилиндр. Однако в реальных условиях добиться этого практически невозможно. Если при помощи тахеометра получить координаты точек на реальной поверхности стенки резервуара, то можно оценить средний радиус цилиндра, наклон и направление его оси, выполнив их аппроксимацию цилиндрической поверхностью.

Оценка характеристики неровностей и деформаций стенки резервуара может быть выполнена с использованием радиальных отклонений (кратчайших расстояний между реальной и аппроксимирующей цилиндрической поверхностью) или, по-другому, расстояний от точек, координаты которых были получены тахеометром, по нормали к аппроксимирующей поверхности.

Цилиндр может быть определен следующими параметрами:

- 1) точкой  $(x_0, y_0, z_0)$  на своей оси;
- 2) вектором направляющих косинусов  $(a, b, c)$ ;
- 3) радиусом  $r$ .

Уравнение цилиндра можно записать<sup>2</sup> [1]:

$$[c(y_i - y_0) - b(z_i - z_0)]^2 + [a(z_i - z_0) - c(x_i - x_0)]^2 + [b(x_i - x_0) - a(y_i - y_0)]^2 = R^2. \quad (1)$$

Обозначив:

$$A = (b^2 + c^2);$$

$$B = (a^2 + c^2);$$

$$C = (a^2 + b^2);$$

$$D = -2ab;$$

$$E = -2ac;$$

$$F = -2bc;$$

$$G = -2(b^2 + c^2)x_0 + 2aby_0 + 2acz_0;$$

$$H = -2(a^2 + c^2)x_0 + 2abx_0 + 2bcz_0;$$

$$I = -2(a^2 + b^2)z_0 + 2acx_0 + 2bcy_0;$$

$$J = (b^2 + c^2)x_0^2 + (a^2 + c^2)y_0^2 + (a^2 + b^2)z_0^2 - 2bcy_0z_0 - 2acz_0x_0 - 2abx_0y_0 - R^2,$$

получим аналог уравнения (1) вида

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Exz + Fyz + Gx + Hy + Iz + J = 0. \quad (2)$$

Поделим уравнение (2) на  $A$  и перенесем  $x^2$  вправо, чтобы уравнение стало линейным относительно определяемых коэффициентов и не было однородным:

$$\frac{B}{A}y^2 + \frac{C}{A}z^2 + \frac{D}{A}xy + \frac{E}{A}xz + \frac{F}{A}yz + \frac{G}{A}x + \frac{H}{A}y + \frac{I}{A}z + \frac{J}{A} = -x^2. \quad (3)$$

Эту линейную систему уравнений можно записать в матричном виде

$$\begin{pmatrix} y_1^2 & z_1^2 & x_1y_1 & x_1z_1 & y_1z_1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ y_2^2 & z_2^2 & x_2y_2 & x_2z_2 & y_2z_2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. \\ y_n^2 & z_n^2 & x_ny_n & x_nz_n & y_nz_n & x_n & y_n & z_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B/A \\ C/A \\ D/A \\ E/A \\ F/A \\ G/A \\ H/A \\ I/A \\ J/A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_1^2 \\ -x_2^2 \\ .. \\ -x_n^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

или

$$AP = B.$$

Умножив обе части уравнения на  $A^T$  (левая трансформация Гаусса для практической реализации МНК) неизвестный вектор  $P$  можно получить по формуле:

$$P = (A^T \cdot A)^{-1} A^T \cdot B.$$

<sup>2</sup> Least Square Fitting of Data by Linear or Quadratic Structures [Electronic ressource] : David Eberly, Geometric Tools, Redmond WA 98052. – Mode of access: <https://www.geometrictools.com/Documentation/LeastSquaresFitting.pdf>. – Date of access: 20.08.2025.

Пусть  $B' = B / A$ ,  $C' = C / A$ ,  $D' = D / A$ ,  $E' = E / A$ ,  $F' = F / A$ ,  $G' = G / A$ ,  $H' = H / A$ ,  $I' = I / A$  и  $J' = J / A$ . Вычислив вспомогательное значение

$$k = \frac{2}{(1+B'+C')}, \quad (5)$$

можем получить

$$A = k, \quad B = kB', \quad C = kC', \quad D = kD', \quad E = kE', \quad F = kF', \quad G = kG', \quad H = kH', \quad I = kI', \quad J = kJ'.$$

Если значения  $A$  и  $B$  близкие к 1, то приближенные значения направляющих косинусов вычисляют по формулам

$$c' = (1-C)^{1/2}, \quad a' = \frac{E}{2C}, \quad b' = -\frac{F}{2c'}.$$

Если значение  $A$  близкое к 1, а  $B$  – нет, используем формулы

$$b' = (1-B)^{1/2}, \quad a' = -\frac{D}{2b'}, \quad c' = -\frac{F}{2b'}.$$

Во всех других случаях приближенные значения направляющих косинусов вычисляют по формулам

$$a' = (1-A)^{1/2}, \quad b' = -\frac{D}{2a'}, \quad c' = -\frac{F}{2a'}.$$

Полученные  $(a', b', c')$  нормализуются для получения вектора направляющих косинусов  $(a, b, c)$ .

Зная  $(a, b, c)$  и коэффициенты  $G, H, I$ , мы можем получить оценки для  $x_0, y_0, z_0$  из решения линейной системы уравнений

$$\begin{pmatrix} -2(b^2 + c^2) & 2ab & 2ac \\ 2ab & -2(a^2 + c^2) & 2bc \\ 2ac & 2bc & -2(b^2 + b^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G \\ H \\ I \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Предварительное значение радиуса получим по формуле

$$R^2 = (b^2 + c^2)x_0^2 + (a^2 + c^2)y_0^2 + (a^2 + b^2)z_0^2 - 2bcy_0z_0 - 2acz_0x_0 - 2abx_0y_0 - J. \quad (7)$$

Таким образом были получены предварительные значения параметров аппроксимирующего цилиндра.

Для получения окончательных параметров аппроксимирующего цилиндра алгоритм поиска основан на методе Гаусса-Ньютона. Учитывая оценки  $(x_0, y_0, z_0)$ ,  $(a, b, c)$  и  $R$ , одна итерация алгоритма выполняет следующие шаги:

- Смещает координаты исходных точек так, чтобы точка на оси лежала в начале координат:

$$(x_i, y_i, z_i) = (x_i, y_i, z_i) - (x_0, y_0, z_0).$$

- Преобразовывает данные, поворачивая ось цилиндра сначала вокруг оси  $X$ , а затем поворачивая вокруг оси  $Y$  так, чтобы она совпадала с осью  $Z$ .

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Эта операция выполняется с помощью матрицы вращения  $U$ , которая вычисляется по значениям  $(a, b, c)$ :

$$U = \begin{pmatrix} c_2 & 0 & s_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & 0 & c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & s_1 \\ 0 & -s_1 & c_2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Элементы матрицы  $U$  вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned} c_1 &= c / \sqrt{b^2 + c^2}; \\ s_1 &= -b / \sqrt{b^2 + c^2}; \\ c_2 &= (cc_1 - bs_1) / \sqrt{a^2 + (cc_1 - bs_1)^2}; \\ s_2 &= -a / \sqrt{a^2 + (cc_1 - bs_1)^2}. \end{aligned}$$

3. Формирует матрицу Якоби и вектор  $d$  как разность  $d = R_i - R$ . Расстояние от точки  $(x_i, y_i, z_i)$  до оси цилиндра вычисляют по формуле

$$R_i = \frac{\sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} u_i &= c(y_i - y_0) - b(z_i - z_0); \\ v_i &= a(z_i - z_0) - c(x_i - x_0); \\ w_i &= b(x_i - x_0) - a(y_i - y_0). \end{aligned} \quad (11)$$

Матрица Якоби имеет вид:

$$J = \begin{pmatrix} -x_1/R_1 & -y_1/R_1 & -x_1z_1/R_1 & -y_1z_1/R_1 & -1 \\ -x_2/R_2 & -y_2/R_2 & -x_2z_2/R_2 & -y_2z_2/R_2 & -1 \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ -x_n/R_n & -y_n/R_n & -x_nz_n/R_n & -y_nz_n/R_n & -1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

4. Решает линейную систему методом наименьших квадратов

$$J \begin{pmatrix} P_{x0} \\ P_{y0} \\ P_a \\ P_b \\ P_R \end{pmatrix} = -d. \quad (13)$$

5. Обновляет оценки параметров по формулам

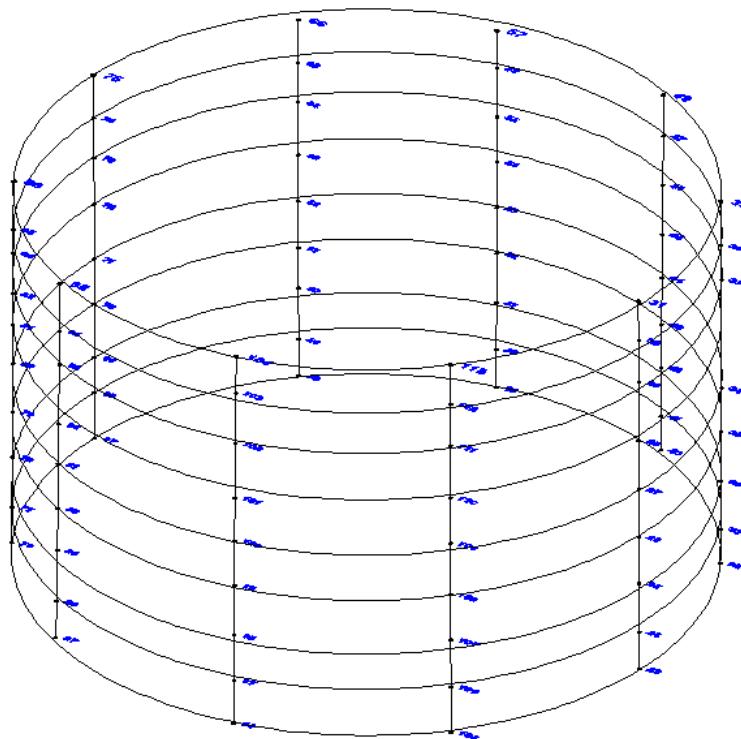
$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + U^T \begin{pmatrix} P_{x0} \\ P_{y0} \\ -P_{x0}P_a - P_{y0}P_b \end{pmatrix}; \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = U^T \begin{pmatrix} P_a \\ P_b \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$R = R + P_R. \quad (16)$$

Этапы, описанные выше, повторяются до тех пор, пока алгоритм не сходится. На этапе 1 используется исходный набор данных, а не преобразованный набор из предыдущей итерации.

Рассмотрим практическое применение изложенного выше алгоритма. Для резервуара РВС-3000 были определены координаты 90 точек на наружной стенке резервуара. Схема расположения точек приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Схема расположения координируемых точек на стенке резервуара**

Вычисления по приведенному выше алгоритму были проведены с использованием программы Excel. Для сравнения результатов вычислений по полученным формулам проведены расчёты в Java Applied·Geodesy 3D (JAG3D) – популярном пакете программного обеспечения с открытым исходным кодом, в котором реализован метод наименьших квадратов для различных геодезических задач. Этот пакет программного обеспечения имеет отдельный модуль для аппроксимации набора точек с координатами элементарными геометрическими фигурами и поверхностями. Приложение распространяется на условиях лицензии GNU General Public License (версия 3).

В результате вычислений были определены параметры аппроксимирующего наклонного цилиндра для рассматриваемого резервуара. Полученные параметры по приведённым выше формулам и в программе JAG3D для сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты вычислений параметров аппроксимирующего цилиндра

Параметр	Значение, полученное по формулам (4)–(16)	Значение, полученное в JAG3D	СКП
$X_0$	0,22322 м	0,2232 м	0,0035
$Y_0$	0,05735 м	0,0578 м	0,0035
$Z_0$	-0,04261 м	-0,0003 м	0,0108
$a$	-0,0013604	-0,0013604	0,0005
$b$	0,0101812	0,0101812	0,0005
$c$	0,9999472	0,9999472	0,0001
$R$	9,48324 м	9,4832 м	0,0013

Результаты практически идентичны, кроме некоторого расхождения в высотной составляющей  $Z_0$ .

Используя параметры аппроксимирующего наклонного цилиндра, можно вычислить общий наклон оси и направление наклона по формулам

$$N = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c}, \quad (17)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \quad (18)$$

или

$$\gamma = \arctan\left(\frac{b}{a}\right). \quad (19)$$

В результате было получено:  $N = 0,0103$  и  $\gamma = 97,6^\circ$ .

При определении геометрических параметров резервуара выполняют также нивелирование окрайки днища. По полученным данным возможно рассчитать параметры аппроксимирующей плоскости (коэффициенты уравнения плоскости  $A, B, C, D$ ), например, по алгоритму, приведенному в [2], а также определить ее наклон и направление. Для наклонной плоскости общий наклон оси и направление наклона вычислим по формулам, аналогичным (17)–(19):

$$N = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C};$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right).$$

В результате было получено:  $N = 0,0086$  и  $\gamma = 106,2^\circ$ .

Такая корреляция параметров наклона аппроксимирующей оси стенок резервуара и его днища говорит о том, что выявленные отклонения от идеальной геометрической формы являются следствием просадок основания резервуара и для их устранения необходимо выполнить подбивку просевшей части основания гидрофобным грунтом до расчетной отметки.

Для анализа деформаций стенки резервуара часто выполняют развертку цилиндрической поверхности на плоскость [3; 4]. Для получения эквивалентной поверхности необходимо выполнить перевычисление геодезических координат точек в координаты на поверхности цилиндра. Это можно выполнить с использованием следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} y_i^c &= z_i \\ x_i^c &= \alpha R \\ z_i^c &= [c(y_i - y_0) - b(z_i - z_0)]^2 + [a(z_i - z_0) - c(x_i - x_0)]^2 + [b(x_i - x_0) - a(y_i - y_0)]^2 - R^2 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где  $x_i^c, y_i^c, z_i^c$  – координаты точек в системе координат цилиндра;

$x_i, y_i, z_i$  – координаты точек в пространственной системе координат, полученные по формуле (8);

$x_0, y_0, z_0, a, b, c, R$  – параметры аппроксимирующего цилиндра.

Геометрический смысл  $z_i^c$  – это отклонение точки  $i$  от цилиндра, имеет знак «+», если точка находится снаружи цилиндра, и знак «–», если внутри. Процесс развертки цилиндра на плоскость демонстрирует рисунок 3.

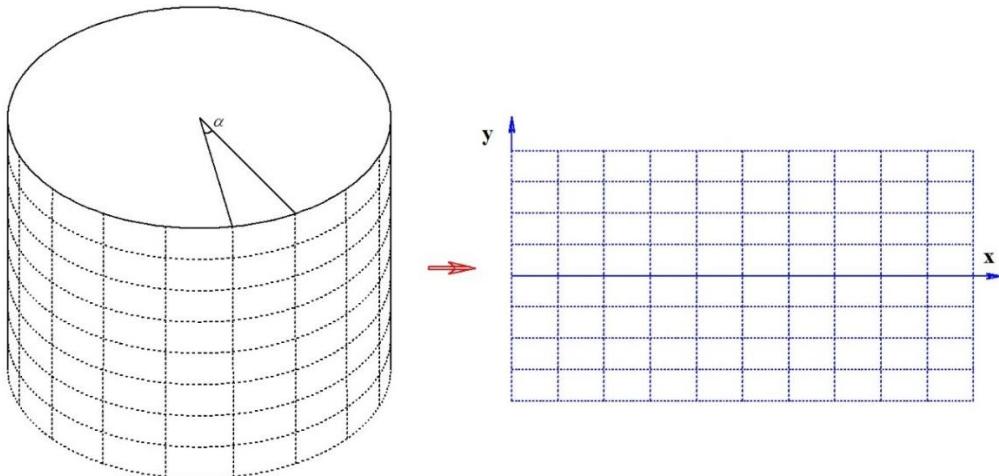
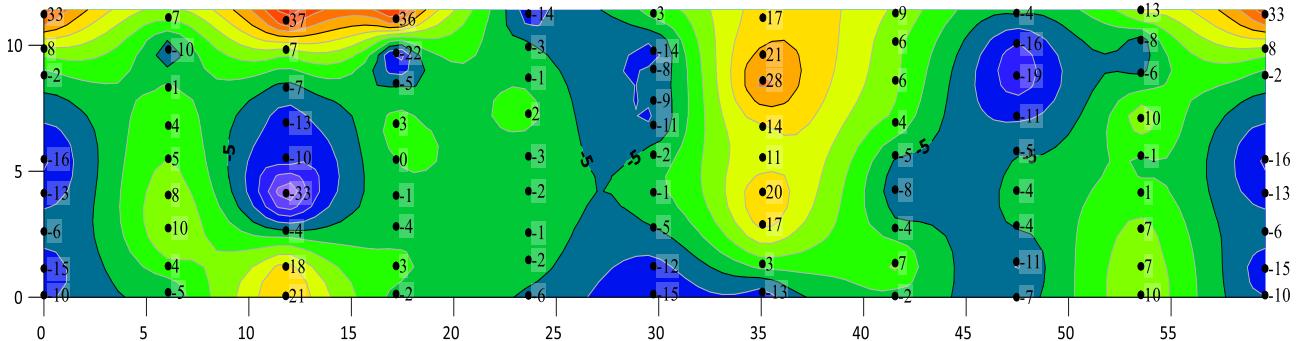


Рисунок 3. – Геометрическая схема развертки цилиндрической поверхности на плоскость

По координатам, полученным по формулам (17), можно отобразить точки в развертке на плоскость, вывести значения  $z_i^c$  и визуализировать эти значения в виде изолиний с цветной откраской (рисунок 4). Анализируя такое изображение, можно с достаточной детальностью и достоверностью определить выпучины или вмятины на стенке резервуара, а также общие параметры отклонений геометрической формы резервуара.



**Рисунок 4. – Визуализация отклонений стенки резервуара от идеальной цилиндрической поверхности**

**Заключение.** Таким образом, представленный авторами выше алгоритм обработки измерений геометрических параметров стальных вертикальных цилиндрических резервуаров на стадии обследования позволяет:

- получить более наглядную и достоверную графическую информацию для анализа величин и направлений деформаций всего резервуара;
- аналитически определить корреляцию деформаций стенок и днища резервуара;
- комплексно оценивать отклонение от проектного положения стенки и днища резервуара в процессе эксплуатации с учетом их пространственного положения и реальной геометрической формы;
- оценить отклонения реальной конструкции от идеальной (математической модели) и выполнять инженерные расчёты по математически строгим алгоритмам.
- давать надежную оценку определения остаточного ресурса резервуара для принятия решения о продлении его срока эксплуатации или необходимом текущем ремонте.

Представленный алгоритм обработки измерений геометрических параметров резервуаров успешно прошел апробацию на стальных вертикальных цилиндрических резервуарах типа РВС-3000, 5000, 10000.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Forbes A.B. Least Squares Best-Fit geometric elements. – United Kingdom, 1989.
2. Маркович К.И., Ялтыхов В.В., Дегтярев А.М. Совершенствование алгоритма получения параметров оптимальной плоскости для фасадной съемки // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2023. – № 1. – С. 82–89. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-82-89.
3. Анализ деформаций и напряжений оболочки вертикальных стальных резервуаров по данным лазерного сканирования / А.А. Шоломицкий, Н.Т. Кемербаев, С.Г. Могильный и др. // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 86–101. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-86-101.
4. Носков И.В., Черепанов Д.Н. Применение технологии 3D сканирования для определения деформации оснований и фундаментов резервуаров при разработке месторождений нефти // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 5. URL: <https://esj.today/PDF/05NZVN523.pdf>.

#### REFERENCES

1. Forbes, A.B. (1989). *Least Squares Best-Fit geometric elements*. United Kingdom.
2. Markovich, K.I., Jaltyhov, V.V., & Degtjarev, A.M. (2023). Sovershenstvovanie algoritma poluchenija parametrov optimal'noj ploskosti dlja fasadnoj s'emeiki. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Serija F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, (1), 82–89. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-82-89. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Sholomickij, A.A., Kemerbaev, N.T., Mogil'nyj, S.G., & Carenko, S.N. (2022). Analiz deformacij i naprjazhenij obolochki vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov po dannym lazernogo skanirovaniya. *Vestnik SGUGiT*, 27(2), 86–101. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-86-101. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Noskov, I.V., & Cherepanov, D.N. (2023). Primenenie tehnologii 3D skanirovaniya dlja opredelenija deformacii osnovanij i fundamentov rezervuarov pri razrabotke mestorozhdenij nefti. *Vestnik evrazijskoj nauki*, 15(5). URL: <https://esj.today/PDF/05NZVN523.pdf>. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 01.09.2025

**GEOMETRIC PARAMETERS OF STEEL VERTICAL CYLINDRICAL TANKS  
DETERMINATION AT THE SURVEY STAGE**

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

*The article provides an overview of existing traditional methods for tank walls deformation determining and discusses a new technology for results of geodetic surveying of vertical steel tanks using an electronic total station mathematical processing. The existing methods are mainly based on calculating the tank shell surface deviations from the vertical line along the generatrices and plotting graphs to visualize the results. The values of the tank wall deformation are then compared with the tolerances specified in regulatory documents. The authors propose an algorithm for processing measurements, which allows for an analytical determination of the tank walls and bottom deformations correlation, as well as obtaining more visual graphical information for analyzing the values and directions of the entire tank deformations. The proposed algorithm allows for a reliable residual resource of the tank assessment, which is necessary for making decisions on extending its service life or performing necessary maintenance.*

**Keywords:** vertical steel tank, deformations, accuracy, approximation, least squares method, direction cosines vector.

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 67.08

DOI 10.52928/2070-1683-2025-42-3-49-55

### КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОДУКТОВ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТХОДОВ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Е.Г. ФЕДАРОВИЧ, д-р техн. наук, проф. А.Э. ЛЕВДАНСКИЙ  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Для получения вторичного волокнистого материала из продуктов селективного измельчения отходов производства стеклопластика предложено использование многостадийной технологии классификации, включающей в себя пневмоклассификацию и механическое разделение на сите. Представлена разработанная установка исследования процесса селективного измельчения отходов стеклопластика, включающая стадию классификации. Представлены результаты экспериментальных исследований извлечения недоизмельченного материала, мелких волокон и частиц измельченной полимерной матрицы из продуктов селективного измельчения отходов, обрезков стеклохолста на основе связующего Депол С-180 ПТ и стеклоармированных стержней на основе ЭД-20. Определены рациональные значения средней скорости воздушного потока на сечения классификатора, позволяющие наиболее эффективно осуществлять процесс пневмоклассификации в роторно-гравитационном классификаторе. Подобран диаметр отверстий сита, необходимый для качественного отделения от волокнистой фракции частиц полимерной матрицы. Посредством метода выжигания определено содержание стекловолокна в полученном волокнистом материале. Представленная технологическая схема позволяет выделять из продуктов измельчения отходов стеклопластика волокнистый материал, который может быть использован как исходное сырье в производстве новых изделий.

**Ключевые слова:** отходы стеклопластика, измельчение стеклопластика, пневмоклассификация, механическое разделение, стекловолокно, вторичный материал.

**Введение.** Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение практически во всех отраслях народного хозяйства: в строительстве, автомобиле-, судо- и авиастроении, радиоэлектронике, в производстве предметов быта и т.д. [1]. Этому способствует широкий спектр свойств данных материалов: физико-химические, механические, теплофизические, электрические, оптические качества; повышенная износостойкость, особые виброакустические свойства и др.

Согласно статистическим данным из различных источников, объем мирового рынка композиционных полимерных материалов в 2023 году оценивается в 99,5–117,0 млрд долларов<sup>1,2</sup>. Прогнозируемый среднегодовой темп роста рынка ПКМ в период с 2023 г. по 2032 г. составит 6,9–7,8%. Среди ведущих мировых производителей продукции из ПКМ можно выделить Dupont, Dit BV, Composites Universal Group, Cabot Corporation, Mitsubishi Chemical Corporation, Owens Corning, Teijin Limited, Toray Industries Incorporation и SGL Group. При этом, как отмечается, наибольшая доля в мировом рынке ПКМ приходится на стеклопластик.

В результате объемного производства и применения изделий из стеклопластика возникает проблема их утилизации. По некоторым данным, мировые объемы образования отходов стеклопластика можно оценить на уровне 980 тыс. тонн [2]. Учитывая долгосрочность процессов деструкции стеклопластика (по различным данным до 200 лет) и постоянное ужесточение экологического законодательства, проблема утилизации является актуальной [3]. Основной путь решения данной проблемы – вторичная переработка отходов производства и потребления стеклопластика.

Одним из перспективных с экономической и экологической точки зрения является механический метод, основанный на измельчении стеклопластика в молотковых мельницах или аналогичных устройствах, с последующей классификацией на фракции [4; 5]. Данный метод имеет ряд преимуществ: сравнительная простота технологического оформления, применимость для практически любых полимерных композиционных материалов, одновременная переработка армирующих волокон и полимерного связующего, отсутствие вредных выбросов и испарений. Такие предприятия как Reprocov (Бельгия), Zajons Logistik (Германия), ReFiber ApS (Дания) уже используют технологию механической переработки стеклопластиковых изделий для производства вторичного волокнистого материала, который в большинстве случаев выступает как наполнитель термопластов либо в цементной промышленности.

<sup>1</sup> Размер рынка композитных материалов, прогнозы до 2033 года [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sphericalinsights.com/ru/reports/composite-process-materials-market> (дата обращения 24.02.2025).

<sup>2</sup> Объем рынка композитных материалов, отчет о доле, анализ, тенденции, рост в 2032 г. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.zionmarketresearch.com/report/composite-materials-market> (дата обращения 24.02.2025).

Имеющиеся в настоящее время исследования [6–9] отмечают, что основной нерешенной до настоящего времени проблемой механической переработки стеклопластика является классификация продуктов переработки, которая ввиду отсутствия более совершенного оборудования осуществляется методом рассева на ситах. Сущность проблемы заключается в том, что при использовании сит выделенный из продуктов переработки вторичный волокнистый материал содержит волокна широкого фракционного состава. Наличие в нем большого количества мелких волокон, которые не реализуют свои прочностные свойства в композиционном материале, приводит к снижению физико-механических свойств ПКМ. Также на снижение прочностных свойств композиционных материалов оказывает влияние наличие во вторичном волокнистом материале значительного количества частиц полимерной матрицы, которые снижают общее количество стекловолокна в массе.

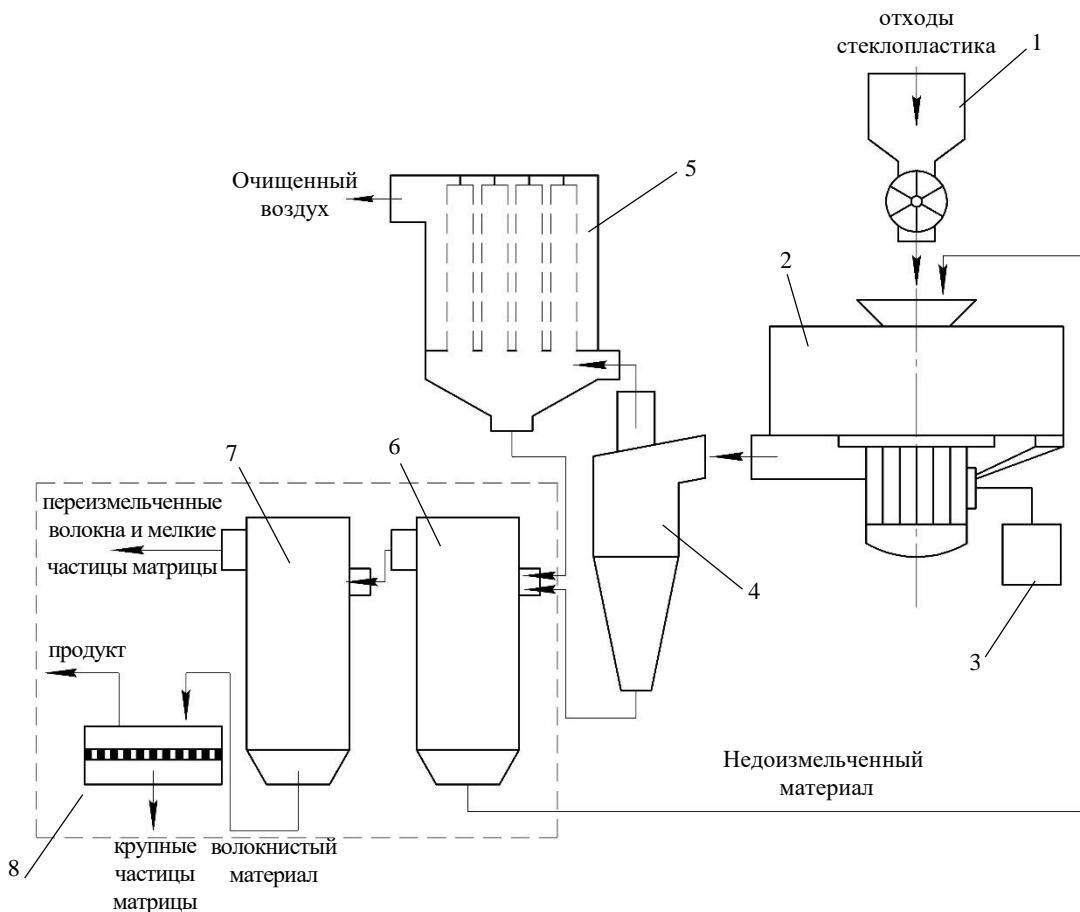
Проведенные нами ранее экспериментальные исследования в данном направлении показывают схожие результаты в сложности разделения продуктов селективного измельчения стеклопластика на фракции методом рассева на сите. Стоит добавить, что, используя метод классификации на сите, практически невозможно выделить из продуктов измельчения стеклопластика недоизмельченные куски стеклопластика и пучки волокон, скрепленные между собой матрицей. Связано это в первую очередь со свойством волокнистого материала слипаться и слеживаться на поверхности сита.

Указанные негативные аспекты механической классификации продуктов переработки стеклопластика не позволяют получать на основе вторичного волокнистого материала качественные изделия с заданными физико-механическими свойствами. В результате технология механической переработки стеклопластика не находит своего широкого распространения в мире.

Для решения поставленной проблемы была сформулирована цель настоящего исследования: разработать принципиально новый подход классификации продуктов селективного измельчения стеклопластика, основанный на совместном использовании методов механической классификации и пневмоклассификации.

**Основная часть.** Опыты проводились на разработанной экспериментальной установке исследования процесса селективного измельчения стеклопластика, представленной на рисунке 1.

Экспериментальная установка состоит из питателя 1, ударно-центробежной мельницы 2, частотного преобразователя 3, циклона 4, рукавного фильтра 5, последовательно установленных пневмоклассификаторов 6, 7 и сита 8.



1 – питатель; 2 – ударно-центробежная мельница; 3 – частотный преобразователь;  
4 – циклон; 5 – рукавный фильтр; 6, 7 – пневмоклассификаторы; 8 – сите

Рисунок 1. – Экспериментальная установка исследования процесса селективного измельчения стеклопластика

Исследования проводились следующим образом. Отходы стеклопластика посредством питателя 1 с постоянным массовым расходом (100 кг/ч) подавались в загрузочный патрубок ударно-центробежной мельницы 2. Полученные продукты измельчения совместно с воздушным потоком направлялись на разделение в циклон 4 и рукавный фильтр 5. Извлеченные из воздушного потока продукты измельчения из циклона 4 и рукавного фильтра 5 направлялись в пневмоклассификатор 6. Далее, полученный волокнистый материал поступал в пневмоклассификатор 7 и затем на механическую классификацию на сито 8.

Как можно заметить на рисунке 1, процесс классификации продуктов селективного измельчения стеклопластика состоит из трех стадий:

1. Полученный в результате селективного измельчения отходов стеклопластика, обрезков стеклохолста на основе связующего Депол С-180 ПТ и стеклоармированных стержней на основе ЭД-20 вторичный продукт – полидисперсный материал, состоящий из кусков недоизмельченного стеклопластика, пучков стекловолокна, скрепленных матрицей, и частиц измельченной матрицы (рисунок 2), подвергается пневмоклассификации в роторно-гравитационном классификаторе 6. При этом в нем задается определенное значение расхода воздуха таким образом, чтобы волокнистый материал подхватывался потоком воздуха и направлялся в патрубок выхода мелкой фракции. Недоизмельченный стеклопластик и скрепленные между собой матрицей пучки волокон, преодолевая силу воздушного сопротивления, направляются в патрубок выхода крупной фракции и при необходимости могут быть повторно измельчены в ударно-центробежной мельнице 2.

2. Далее, полученный волокнистый материал направляется в пневмоклассификатор 7. В данном случае за счет меньшей скорости воздушного потока происходит разделение материала в зависимости от длины волокна. Длинные волокна и крупные частицы измельченной полимерной матрицы будут преодолевать силу воздушного сопротивления и направляться к выходному патрубку крупной фракции, а мелкие частицы матрицы и переизмельченные волокна будут подхватываться потоком и направляться к выходному патрубку мелкой фракции.

3. В результате отсутствия в волокнистом материале мелких переизмельченных волокон, которые в основном способствуют слипанию и слеживанию материала при механическом воздействии, использование на данном этапе классификации сита позволяет за счет колебательного воздействия встряхивать материал (волокна) с меньшей степенью слеживаемости, что способствует более эффективному перемещению оставшихся в материале частиц матрицы к просеивающей поверхности сквозь волокна и дальнейшему прохождению через отверстия сита.



*a* – стеклохолст, связующее на основе полиэфирной смолы Депол С-180 ПТ;  
*б* – стеклоармированные стержни, связующее на основе эпоксидной смолы ЭД-20

Рисунок 2. – Продукты селективного измельчения стеклопластика

Основным технологическим параметром, влияющим на качественные показатели процесса разделения в гравитационном пневмоклассификаторе, является средняя скорость восходящего потока по сечению аппарата. В результате проведения экспериментальных исследований процесса разделения продуктов селективного измельчения стеклопластика в пневмоклассификаторе, были построены графические зависимости влияния средней скорости восходящего потока воздуха в классификаторе на выход крупной фракции (рисунок 3).

Экспериментально установлено, что увеличение средней скорости воздуха на сечение аппарата с 1,05 до 4,51 м/с приводит к постепенному снижению количества выделенной крупной фракции из продуктов селективного измельчения стеклопластиков Депол С-180 ПТ и ЭД-20. Данные зависимости можно с высокой степенью достоверности (0,9653–0,9942) описать квадратичными функциями, представленными на рисунке 3.

Установлено, что для полного разделения продуктов селективного измельчения стеклопластиковых отходов Депол С-180 ПТ и ЭД-20 на волокнистую фракцию (мелкая фракция – целевая) и недоизмельченный материал (крупная фракция) скорость воздуха в классификаторе должна составлять около 3,24 м/с.

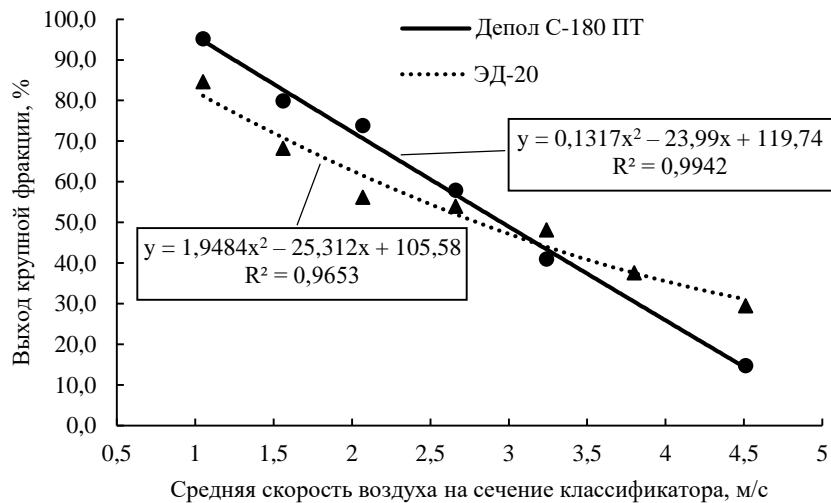


Рисунок 3. – Влияние скорости воздуха на выход крупной фракции при разделении продуктов селективного измельчения стеклопластиков Депол С-180 ПТ и ЭД-20

При данной скорости потока крупная фракция представляет собой систему, состоящую из крупных кусков недоизмельченного стеклопластика, пучков волокон, скрепленных недоизмельченной термореактивной матрицей, и крупных частиц измельченной матрицы (рисунок 4). Мелкая фракция представляет собой полидисперсный материал, состоящий из волокон различной длины от 0,1 до 25,0 мм и измельченных частиц полимерной матрицы. Увеличение скорости потока воздуха до значений 3,8–4,51 м/с приводит к загрязнению волокнистой фракции недоизмельченным материалом соответственно на 13,08–40,98% для стеклопластика Депол С-180 ПТ и на 10,54–48,12% для стеклопластика ЭД-20. Снижение скорости воздушного потока в пневмоклассификаторе до значений 2,66–1,05 м/с приводит к неполному разделению смеси, так как в крупной фракции присутствует волокнистый материал, для стеклопластика Депол С-180 ПТ в количестве 16,94–54,2% и для ЭД-20 – 5,87–36,49%.



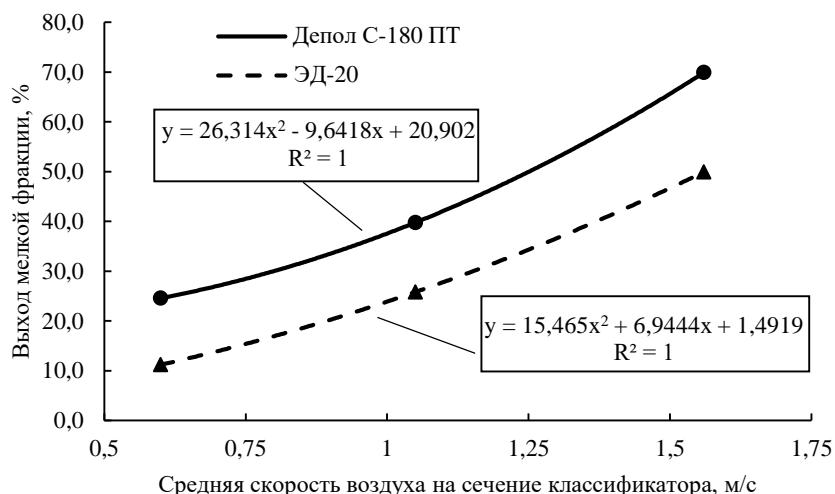
*а* – стеклохолст, связующее на основе полиэфирной смолы Депол С-180 ПТ;  
*б* – стеклоармированные стержни, связующее на основе эпоксидной смолы ЭД-20

Рисунок 4. – Извлеченная крупная фракция из продуктов селективного измельчения стеклопластика при средней скорости воздуха на сечение пневмоклассификатора 3,24 м/с

Далее, полученная волокнистая фракция, очищенная от недоизмельченного материала и крупных частиц измельченной полимерной матрицы, направлялась на вторую стадию пневмоклассификации с целью разделения по длине волокна. Основной задачей на данном этапе являлось выделить из полидисперсного волокнистого материала мелкие волокна, длина которых не позволяет им в полной мере реализовать свою прочность в композиционном материале. Ранее проведенные исследования по возможности использования вторичного волокнистого материала для получения композиционных материалов показывают, что длина армирующих вторичных волокон, для обеспечения армирующего эффекта, не должна быть меньше 4 мм [10].

Экспериментальные исследования разделения волокнистой фракции, полученной на первой стадии пневмоклассификации, проведенные при средней скорости воздуха на сечение классификатора от 0,61 до 1,56 м/с (рисунок 5), показали, что при превышении скорости восходящего потока более 1,05 м/с в мелкой фракции наблюдается наличие волокон длиной 4 мм и более. При средней скорости воздуха 1,05 м/с количество мелкой

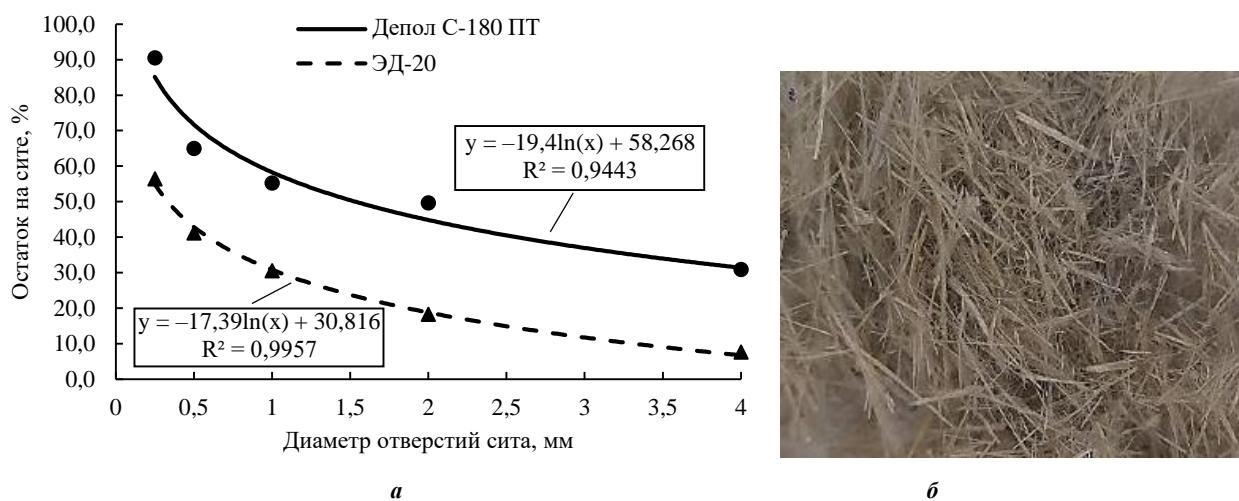
фракции, выделенной из отходов стеклопластика на основе Депол С-180 ПТ, составляет 25,83%, а для отходов стеклопластика на основе связующего ЭД-20 – соответственно 39,79%. Мелкая фракция представляет собой систему, состоящую из тонкодисперсных частиц измельченной полимерной матрицы, измельченного короткого (длиной до 3 мм) стекловолокна. Исследования при меньших скоростях воздушного потока в классификаторе (0,61 м/с) указывают на неполное извлечение из волокнистой фракции частиц матрицы и переизмельченных волокон.



**Рисунок 5. – Влияние скорости воздуха на выход мелкой фракции при разделении волокнистой фракции стеклопластиков Депол С-180 ПТ и ЭД-20**

Полученная в результате двух стадий пневмоклассификации волокнистая фракция, очищенная от недоизмельченных кусков стеклопластика, тонкодисперсной пыли измельченных полимерной матрицы и стекловолокна, направляется для разделения на сито. Использование сита необходимо для отделения от волокнистой фракции частиц полимерной матрицы, чья скорость витания совпадает со скоростью витания пучков волокон. Слипание и слеживание волокон на поверхности сита в данном случае не несет существенного негативного влияния на качество разделения, так как в волокнистой фракции отсутствуют крупные куски стеклопластика и короткие волокна, которые могли бы задерживаться в слое волокон. Отсутствие коротких волокон в волокнистой фракции уменьшает ее степень слеживаемости на поверхности сита, тем самым способствуя более свободному прохождению частиц полимерной матрицы к поверхности сита.

Рассеивание волокнистой фракции осуществляли на ситовом анализаторе Retsch AS 200 с одинаковым промежутком времени рассева на ситах с диаметром отверстий, мм: 4, 2, 1, 0,5 и 0,25. Результаты экспериментальных исследований рассева волокнистой фракции, полученной из стеклопластиков на основе связующих Депол С-180 ПТ и ЭД-20, представлены на рисунке 6.



**а – зависимость остатка волокнистой фракции стеклопластиков Депол С-180 ПТ и ЭД-20 от диаметра отверстий сита; б – волокнистая фракция, полученная из отходов стеклопластика ЭД-20**

**Рисунок 6. – Результаты рассева волокнистой фракции стеклопластиков Депол С-180 ПТ и ЭД-20**

Экспериментальные исследования рассева волокнистой фракции на ситах показали, что использование сита с диаметром отверстий 0,5 мм является наиболее рациональным для отделения от волокнистой фракции частиц полимерной матрицы (см. рисунок 6, а). Остаток на сите представляет собой пучки волокон, размер которых находится в пределах от 4 до 25 мм (см. рисунок 6, б). При использовании сит с отверстиями большего диаметра (1–4 мм) волокна проходят через поверхность сита, тем самым уменьшая общее количество получаемой волокнистой фракции.

В результате проведения трех стадий классификации продуктов селективного измельчения отходов стеклопластика на основе связующих Депол С-180 ПТ и ЭД-20, количество выделенной волокнистой фракции, за вычетом выделенного недоизмельченного материала, составляет соответственно 50 и 30% от первоначально полученного продукта селективного измельчения.

Для оценки качественного состава продуктов селективного измельчения стеклопластиков волокнистая фракция подвергалась выжиганию в муфельной печи при температуре 600 °C<sup>3</sup>. Установлено, что в волокнистом материале, полученном из отходов стеклохолста на основе связующего Депол С-180 ПТ и стеклоармированных стержней на основе ЭД-20, содержится соответственно 46,1 и 36,35% стекловолокна.

**Заключение.** Разработана принципиально новая схема классификации продуктов механической переработки отходов стеклопластика. В результате проведения экспериментальных исследований подобраны рациональные параметры процессов пневмоклассификации и механической классификации продуктов селективного измельчения стеклопластика. Установлено, что при средней скорости потока воздуха на сечение классификатора 3,24 м/с происходит наиболее полное удаление из продуктов механической переработки отходов стеклопластика недоизмельченного материала в количестве 40,98 и 48,12% соответственно для отходов стеклопластиков на основе Депол С-180 ПТ и ЭД-20, которые впоследствии могут быть повторно направлены на измельчение. Для удаления из волокнистой фракции мелких волокон (до 4 мм), которые в готовых вторичных композитных материалах не реализовывают свои армирующие свойства, необходимо задавать среднюю скорость на сечение классификатора равную 1,05 м/с. Использование на завершающей стадии классификации сита с диаметром отверстий 0,5 мм позволяет удалить из волокнистой фракции частицы полимерной матрицы, чья скорость витания совпадает со скоростью витания волокон в пневмоклассификаторе.

Представленная принципиальная технологическая схема классификации продуктов селективного измельчения отходов стеклопластиков позволяет решить проблемы наличия в волокнистой фракции недоизмельченного материала и мелких волокон, которые невозможно выделить, используя классический метод механической классификации на ситах. Получение качественного волокнистого материала из отходов стеклопластика позволит решить серьезную проблему утилизации композиционных материалов на основе стекловолокна, что способствует осуществлению замкнутого цикла производства в рамках зеленой экономики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Талалаева Г.В., Пазникова С.Н. Современные композиционные материалы: перспективы и риски применения их в области комплексной безопасности и гражданской обороны // Технологии гражданской безопасности. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 107–114.
2. Куликова Ю.В., Слюсарь Н.Н., Шайдурова Г.И. Анализ проблемы утилизации отходов композиционных материалов // Бюллетень науки и практики. – 2017. – Т. 24, № 11. – С. 255–261.
3. Recycling of Composite Materials / Y. Yang, R. Boom, B. Irion et al. // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2012. – Vol. 51. – P. 53–68. DOI: 10.1016/j.cep.2011.09.007.
4. Mechanical properties of recycled Glass Fiber Reinforced Polymers (rGFRP) in limestone calcined clay cement mortars / M. Rico, J.R. Zelaya, B. García et al. // Revista EIA. – 2024. – № 21(41). – P. 1–19. DOI: 10.24050/reia.v21i41.1720.
5. Retracted: a critical review on recycling composite waste using pyrolysis for sustainable development / R. Abdallah, A. Juaidi, M.A. Sava et al. // Energies. – 2021. – № 14(18). DOI: 10.3390/en14185748.
6. Strength and microscopic investigation of unsaturated polyester BMC reinforced with SMC-recyclate / R. DeRosa, E. Telfeyan, G. Gaustaud et al. // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2005. – № 18(4). – P. 333–349. DOI: 10.1177/0892705705049560.
7. Successful closed-loop recycling of thermoset composites / J. Palmer, O.R. Ghita, L. Savage et al. // Composites. Part A. – 2009. – № 40(4). – P. 490–498. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.02.002.
8. Pickering S.J. Recycling Thermoset Composite Materials // Wiley Encyclopedia of Composites. – 2012. – P. 1–17. DOI: 10.1002/9781118097298.weoc214.
9. Recycling of the Fibrous Fraction of Reinforced Thermoset Composites / C.E. Kouparitsas, C.N. Kartalis, P.C. Varelidis et al. // Polymer Composites. – 2002. – № 23(4). – P. 682–689. DOI: 10.1002/pc.10468.
10. Утилизация изделий из волокнистого композиционного материала / Е.И. Кордикова, А.В. Спиглазов, Д.И. Чиркун и др. // Труды БГТУ. – 2013. – № 4. – С. 66–68.

#### REFERENCES

1. Talalaeva, G.V., & Paznikova, S.N. (2023). Sovremennye kompozicionnye materialy: perspektivy i riski primeneniya ih v oblasti kompleksnoj bezopasnosti i grazh-danskoj oborony [Modern composite materials: prospects and risks of their use in the field of integrated security and civil defense]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti [Civil SecurityTechnology]*, 20(1), 107–114. (In Russ.).

<sup>3</sup> Методы сжигания по ГОСТ 32652-2014 (ISO 1172:1996).

2. Kulikova, Yu.V., Slyusar', N.N., & Shajdurova, G.I. (2017). Analiz problemy utilizacii othodov kompozicionnyh materialov [Analiz problemy utilizacii othodov kompozicionnyh materialov]. *Byulleten nauki i praktiki [Bulletin of Science and Practice]*, 24(11), 255–261. (In Russ.).
3. Yang, Y., Boom, R., Irion, B., Van Heerden, D.J., Kuiper, P., & De Wit, H. (2012). Recycling of Composite Materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 51, 53–68. DOI: 10.1016/j.cep.2011.09.007.
4. Rico, M., Zelaya, J.R., García, B., & Vanegas, D. (2024). Mechanical properties of recycled Glass Fiber Reinforced Polymers (rGFRP) in limestone calcined clay cement mortars. *Revista EIA*, 21(41), 1–19. DOI: 10.24050/reia.v21i41.1720.
5. Abdallah, R., Juaidi, A., Sava, M.A., Çamur, H., Albatayneh, A., Abdala, S., & Manzano-Agugliaro, F. (2021). Retracted: a critical review on recycling composite waste using pyrolysis for sustainable development. *Energies*, 14(18). DOI: 10.3390/en14185748.
6. DeRosa, R., Telfeyan, E., Gaustaud, G., & Mayes, S. (2005). Strength and microscopic investigation of unsaturated polyester BMC reinforced with SMC-recyclate. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 18(4), 333–349. DOI: 10.1177/0892705705049560.
7. Palmer, J., Ghita, O.R., Savage, L., & Evans, K.E. (2009). Successful closed-loop recycling of thermoset composites. *Composites Part A*, 40(4), 490–498. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.02.002.
8. Pickering, S.J. (2012). Recycling Thermoset Composite Materials. *Wiley Encyclopedia of Composites*, 1–17. DOI: 10.1002/9781118097298.weoc214.
9. Kouparitsas, C.E., Kartalis, C.N., Varelidis, P.C., Tsengoglou, C.J., & Papaspyrides, C.D. (2002). Recycling of the Fibrous Fraction of Reinforced Thermoset Composites. *Polymer Composites*, 23(4), 682–689. DOI: 10.1002/poc.10468.
10. Kordikova, E.I., Spiglavov, A.V., Chirkun, D.I., & Kuprash, E.A. (2013). Utilizaciya izdelij iz voloknistogo kompozicionnogo materiala [Disposal of fiber composite products]. *Trudy BG TU [Proceedings of BSTU]*, 4, 66–68. (In Russ.).

Поступила 24.07.2025

## CLASSIFICATION OF PRODUCTS OF SELECTIVE GRINDING OF GLASS PLASTIC WASTE

**E. FEDAROVICH, A. LEVDANSKI**  
*(Belarusian State Technological University, Minsk)*

*It is proposed to use a multistage classification technology, including pneumatic classification and mechanical separation on a sieve, to obtain secondary fibrous material from the products of selective grinding of fiberglass production waste. A developed installation for studying the process of selective grinding of fiberglass waste, including a classification stage, is presented. The results of experimental studies of the extraction of under-crushed material, small fibers and particles of crushed polymer matrix from the products of selective grinding of waste, trimmings of fiberglass based on the binder Depol S-180 PT and fiberglass rods based on ED-20 are presented. Rational values of the average air flow velocity on the classifier cross-sections are determined, allowing the most efficient implementation of the pneumatic classification process in a rotor-gravity classifier. The diameter of the sieve holes is selected necessary for high-quality separation of polymer matrix particles from the fibrous fraction. The content of glass fiber in the obtained fibrous material was determined by means of the burning method. The presented technological scheme allows to extract fibrous material from the products of crushing fiberglass waste, which can be used as a raw material in the production of new products.*

**Keywords:** glass plastic waste, glass plastic shredding, pneumatic classification, mechanical separation, fiberglass, recycled material.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **СТРОИТЕЛЬСТВО**

<i>Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Хаткевич А.М., Ципан Г.О.</i> Перспективы применения механического соединения в виде бетонных шпонок в деревобетонных конструкциях .....	2
<i>Лазовский Д.Н., Хаткевич А.М., Матлахов А.Л.</i> Практический расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению здания 10-этажного панельного жилого дома с увеличенным шагом поперечных несущих стен .....	8
<i>Афанасенко А.А., Яцевич П.П.</i> Деформационная устойчивость щебеночно-мастичной органоминеральной смеси на композиционном биовяжущем .....	20
<i>Велюго Е.С., Ермак А.А., Ющенко В.Д.</i> Модификация структурных и сорбционных свойств цеолита в процессе удаления ионов аммония и железа из подземных вод .....	28
<i>Платонова Р.М., Шпановская Д.А., Лукьянчик Н.И.</i> Сохранение традиций в храмовой архитектуре при реставрации александро-nevской церкви в Минске .....	33

### **ГЕОДЕЗИЯ**

<i>Ялтыхов В.В., Маркович К.И., Дегтярев А.М., Долгий П.С.</i> Определение геометрических параметров стальных вертикальных цилиндрических резервуаров на стадии обследования .....	40
--	----

### **ГЕОЭКОЛОГИЯ**

<i>Федарович Е.Г., Левданский А.Э.</i> Классификация продуктов селективного измельчения отходов стеклопластика .....	49
--	----