

MIESIĘCZNIK

№ 4(43), 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

Отв. за выпуск: А.М. Нияковский.

Редактор А.А. Прадидова.

Подписано к печати 23.12.2025. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84^{1/8}. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 10,65. Тираж 50 экз. Заказ 536.

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 666.97:691.32

DOI 10.52928/2070-1683-2025-43-4-2-12

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С КОМПЛЕКСНЫМИ ДОБАВКАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫХ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ

*канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА¹⁾,
В.В. МАРКОВЦОВА²⁾,*

д-р техн. наук, проф. С.Ж. РАЗЗАКОВ³⁾

(^{1), 2)} Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

³⁾ Наманганский государственный технический университет)

В статье приводятся параметры низкотемпературных режимов ТВО бетонов с комплексными добавками, включающими поликарбоксилатный суперпластификатор и воздухововлекающую добавку. Установлено, что применение в составе бетона поликарбоксилатного суперпластификатора и воздухововлекающей добавки делает возможным снижение длительности изотермического прогрева с 5 часов до 3 часов и температуры изотермического прогрева с 60 °C до 40 °C, при этом обеспечивая высокую интенсивность твердения и набор прочности через 7 суток 80–84% от проектной, а в возрасте 28 суток на 15–20% выше прочности бездобавочного бетона, твердевшего в воздушно-сухих условиях. Комплексная добавка, включающая Хидетал ГП-9-Альфа и Хидетал П8, более эффективна при низкотемпературной ТВО по сравнению с комплексной добавкой Стакемент 2000М и Микропоран. Показано, что поликарбоксилатные суперпластификаторы делают возможным применение сокращенных и низкотемпературных режимов ТВО, что позволяет снизить энергозатраты и риск появления структурных дефектов.

Ключевые слова: тяжелые бетоны, тепловлажностная обработка, изотермический прогрев, интенсификация твердения, поликарбоксилатный суперпластификатор, воздухововлекающая добавка.

Введение. Теоретические положения и практические аспекты тепловлажностной обработки бетона (ТВО) достаточно изучены и широко представлены в научных публикациях отечественных и зарубежных авторов. В научных работах определены основные этапы и технологические параметры тепловлажностной обработки и их влияние на формирование микроструктуры, прочностные характеристики и долговечность цементного камня и бетона [1–6]. Нормативные документы СП 5.03.02-2021¹ и П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017² содержат рекомендации по выбору режимов ТВО в зависимости от свойств применяемого цемента, вида бетона, теплофизических и геометрических характеристик изделий, конструкции агрегата и характеристик теплоносителя.

Ключевым критерием при назначении режимов ТВО выступает формирование бездефектной структуры бетона, способной обеспечить требуемый уровень долговечности и устойчивости к внешним агрессивным воздействиям. Ведущие исследователи в области строительного материаловедения, в частности Баженов Ю.М., Миронов С.А., Малинина Л.А., Блещик Н.П., Бибик М.С., Бабицкий В.В., Ушеров-Маршак А.В., делают акцент на том, что структурная однородность и минимизация внутренних напряжений, возникающих в процессе термообработки, определяют долгосрочную стойкость бетона к коррозионным и другим эксплуатационным факторам [1–6]. Современные исследования подтверждают, что неоптимальные режимы ТВО могут приводить к образованию микротрещин, увеличению пористости и снижению сцепления цементного камня с заполнителем, замедленному образованию этtringита, что ухудшает долговечность бетона [7–10].

Анализ публикационной активности, выполненный по данным российской научной электронной библиотеки eLibrary.ru, свидетельствует о сохраняющемся научном интересе к процессам тепловлажностной обработки, несмотря на их относительную изученность. По запросу «тепловлажностная обработка бетона» за период с 2020 по 2025 год найдено 163 публикации, из них: опубликовано в журналах – 101 статья, в сборниках конференций – 62 статьи, выполнены две диссертационные работы. Это указывает на актуальность проблемы и продолжающуюся научную дискуссию вокруг оптимизации технологических параметров ТВО.

¹ СП 5.03.02-2021. Изготовление бетонных и железобетонных изделий // М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Введ. 01.07.2021. – Минск, 2021. – 16 с.

² П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017. Тепловлажностная обработка изделий сборных бетонных и железобетонных // РУП «Стройтехнорм». – Введ. 29.03.2018. – Минск, 2018. – 66 с.

Новый рост исследований в данной области связан с широким внедрением в технологию бетонов суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров. Согласно данным eLibrary.ru, за последние пять лет опубликовано 98 статей, посвященных изучению влияния данного вида химических добавок на физико-механические свойства бетонов, в том числе в условиях ТВО.

Сулейманова Л.А. и др. [11] отмечают, что химические добавки на поликарбоксилатной основе, позволяют получать высокотехнологичные бетоны с высокой подвижностью и стойкостью к расслаиванию, с низкой пористостью, более высокими физико-механическими характеристиками и качеством поверхности готовых изделий.

Механизм влияния добавок суперпластификаторов на свойства бетона связан с их химической природой, что достаточно подробно раскрыто в работе Юхневского П.И. [12]. Суперпластификаторы в зависимости от химического состава подразделяются на четыре группы: 1) сульфированные меламинформальдегидные соединения (олигомеры) и комплексы на их основе; 2) сульфированные нафталинформальдегидные соединения (олигомеры) и комплексы на их основе; 3) модифицированные лигносульфонаты; 4) производные полиоксикарбоновых кислот. Отмечается, что суперпластификаторы нафталинформальдегидного типа приводят к большему замедлению схватывания по сравнению с суперпластификаторами на меламиновой или поликарбоксилатной основе [12], что необходимо учитывать при назначении длительности режимов тепловлажностной обработки.

Халиков Р.М. и др. [13] физико-химический механизм молекулярного воздействия химических добавок на поликарбоксилатной основе описывают следующим образом: взаимодействие «якорных» функциональных групп поликарбоновой кислоты с катионами твердой фазы цементных микрочастиц, фрактальных кластеров гидросиликатов кальция и одновременной стабилизацией полиэтиленгликольными радикалами. Данный механизм воздействия, по мнению авторов исследования [13], придает необходимые реологические характеристики модифицированному цементному вяжущему и обеспечивает эффективность химическим добавкам на поликарбоксилатной основе.

В процессе исследований [14], было установлено, что вещественный состав пластифицирующих добавок также влияет на величину усадочных деформаций. Наименьшие значения влажностной усадки получены для систем с добавками на основе поликарбоксилатных эфиров, наибольшие – для систем с добавками на основе нафталинсульфонатов и меламинсульфонатов.

Корянова Ю., Несветаев Г. в ходе проведенных исследований [15] показали, что анализ влияния суперпластификаторов на пористость, прочность и деформационные свойства цементного камня позволяет выполнить предварительную оценку «совместимости» конкретного цемента с конкретным суперпластификатором, в том числе с учетом температурных условий.

Лешканов А.Ю.³, анализируя влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на гидратацию цемента, отмечает, что поликарбоксилатный суперпластификатор может аналогично традиционным пластификаторам адсорбироваться на частицах цемента, снижать водоцементное отношение, но за счет линейной структуры сроки схватывания не удлинять, а оставлять на уровне аналогичных показателей составов без добавок, а еще за счет определенной структуры он позволяет набирать высокую механическую прочность цементных систем.

В результате анализа ряда публикаций были выделены проблемы, которые возникают при тепловлажностной обработке бетонов с добавками на поликарбоксилатной основе. В работе [16] выявлено негативное воздействие высокой температуры, выражаемое в снижении прочности бетона, которое в большей степени проявлялось для составов с высоким расходом пластификатора на поликарбоксилатной основе. Отмечается, что для устранения негативного влияния высокой температуры на прочность бетона момент начала теплового воздействия должен совпадать с завершением индукционного (подготовительного) периода в цементном тесте. В итоге авторы работы пришли к выводу, что параметры термообработки должны иметь следующие значения: длительность предварительного выдерживания не менее пяти часов, скорость подъема температуры не более 10 °C/ч, температура изотермического обогрева не более 50 °C.

Исследования прочности бетонных смесей с пластификатором на основе поликарбоксилатного эфира Glenium® 51, представленные в работе [17], показали, что превышение содержания добавки более 0,5% от массы цемента существенно замедляет рост ранней прочности, и это необходимо учитывать при назначении режимов тепловлажностной обработки.

Анализ научной литературы показал, что несмотря на значительное количество научных публикаций, посвященных пластифицирующим добавкам, сведения о режимах тепловлажностной обработки представлены фрагментарно и в основном касаются бетонов с традиционными добавками [18; 19], а рекомендации по ТВО^{4,5} имеют преимущественно общий характер.

³ Лешканов А.Ю. Пластифицированные бетоны с высокой ранней прочностью, получаемые при использовании сокращенных низкотемпературных режимов тепловлажностной обработки: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.5. – М., 2021. – 209 л.

⁴ ОСН-АПК 2.10.32.001-04. Инструкция по применению химических добавок в бетонах и растворах для сельского строительства. – М., 2004. – 85 с.

⁵ Рекомендации по применению специальных химических добавок для управления физико-механическими и технологическими свойствами бетонов и растворов. – М., 1984. – 18 с.

Обобщенные сведения по режимам тепловлажностной обработки бетонов с пластифицирующими добавками представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Рекомендации по тепловлажностной обработке модифицированного бетона из различных источников

Наименование суперпластификатора	Химический состав	Рекомендации по тепловлажностной обработке модифицированного бетона	Источник
Суперпластификатор «Полипласт СП-1»	смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфо-кислот различной молекулярной массы	рекомендуется изотермический прогрев выполнять при температуре не выше 80 °C	[17, с. 11]
Суперпластификатор «Полипласт СП-3»	смесь натриевых солей полиметиленафталин-сульфокислот различной молекулярной массы, лигносульфонатов технических, промышленной смеси тиосульфата и роданида натрия	время предварительной выдержки принимать не менее 4 ч; скорость подъема температуры принимать не более 10...15 °C/ч; изотермический прогрев осуществлять при температуре не более 70 °C	[17, с. 12]
ЛСТ	смесь натриевых солей лигносульфоновых кислот	режимы ТВО: 3 + 3 + 5 + 2 при максимальной температуре 70 °C для бетонов с F до 300 или с W до 8; 3 + 3 + 6 + 2 при максимальной температуре 80 ... 85 °C для бетонов на портландцементах при отсутствии специальных требований по морозостойкости или плотности	[19]
Эдванс Ферро	суперпластификатор на поликарбоксилатной основе	интенсивное твердение бетона при тепловой обработке, в том числе при сниженных температурах изотермической выдержки	[17, с. 15]

Отмечается⁶, что при использовании пластифицирующих, пластифицирующе-воздуховлекающих, воздуховлекающих и микрогазообразующих добавок может возникнуть необходимость удлинения режима тепловой обработки. Применение пластифицирующих, пластифицирующе-воздуховлекающих добавок без удлинения цикла тепловой обработки возможно в том случае, если он составляет не менее 13...14 ч для бетонов на портландцементах. При этом изделия и конструкции до тепловой обработки выдерживаются не менее 2 ч, а скорость подъема температуры не превышает 20 °C/ч; при меньшем предварительном выдерживании скорость подъема температуры назначается не более 15 °C/ч.

Указывается на то, что применение традиционных суперпластификаторов – в частности, модифицированных лигносульфонатов, а также продуктов поликонденсации меламина и формальдегида – в сочетании с тепловлажностной обработкой обеспечивает лишь незначительный прирост прочности бетона на ранних сроках твердения. При применении таких добавок требуется длительный изотермический прогрев при высоких температурах (до 80–90 °C) и не допускается сокращение отдельных этапов режима пропаривания из-за удлинения индукционного периода гидратации цемента, обусловленного адсорбией молекул добавок на поверхности клинкерных минералов⁷ [18].

Для новейших суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров отмечается возможность применения низкотемпературных режимов ТВО⁸ [20]. Лешкановым А.Ю.⁹ разработан низкотемпературный режим с продолжительностью ТВО 8 часов, при дозировке СП на основе ПКЭ Sika Viscocrete 24 НЕ 0,4% от массы цемента, при температуре изотермического прогрева 60 °C без предварительного выдерживания перед ТВО, обеспечивающего распалубочную прочность до 70% от марочной.

Смирновой О.М. [20] проведены исследования и определены параметры низкотемпературной обработки бетона паром с поликарбоксилатным суперпластификатором: Стакемент 2026: продолжительность предварительной выдержки 2,5–3 часа, скорость повышения температуры 7 °C/час, температура изотермической выдержки 40–50 °C.

При назначении режимов тепловлажностной обработки важным этапом является учет влияния добавок на физико-механические и реологические свойства цемента. В работе Зеленковской Ж.Л. [21] предложена зависимость, позволяющая рассчитывать длительность предварительной выдержки бетона с учетом вида и содержания химических добавок. Влияние пластифицирующих добавок предложено учитывать двумя коэффициентами и дозировкой добавки. При этом эффективность пластифицирующей добавки не учитывается, поскольку коэффициенты предлагается принимать с постоянным значением.

⁶ См. сноски 4, 5.

⁷ См. сноска 4.

⁸ См. сноска 3.

⁹ См. сноска 3.

$$\tau_{\text{пп}} = 0,6 \exp(0,5G_{rc}) + \frac{[3,0 \exp(0,3G_{rc})] (1 + b_{\text{пввв}} V_{\text{возд}}^{m_{\text{пввв}}})}{(1 + D_{yc})} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{\times (1 + b_{\text{пвпл}} D_{\text{пп}}) \left(\frac{B}{U} - 0,2\right)^{n_{\text{пп}}}}{(1 + D_{yc})},$$

где G_{rc} – группа цемента по эффективности при пропаривании;

$b_{\text{пввв}}$, $m_{\text{пввв}}$ – коэффициенты, зависящие от вида воздуховлекающей добавки (могут быть приняты равными соответственно 0,5 и 1,5);

$b_{\text{пвпл}}$, $m_{\text{пвпл}}$ – то же от вида пластифицирующей добавки (могут быть приняты равными соответственно 0,7 и 1,3);

$V_{\text{возд}}$ – объем вовлеченного в бетонную смесь воздуха при введении воздуховлекающей добавки, % по объему;

$D_{\text{пп}}$, D_{yc} – дозировка пластифицирующей добавки и ускорителя твердения, % от массы цемента по сухому веществу;

$n_{\text{пп}}$ – показатель степени (может быть принят равным 2,0).

Зависимости, полученные в ходе исследований [21], позволили авторам работы рассчитать кинетику изменения относительной (в % от проектной) прочности бетона. Расчеты по предложенной методике показали, что при длительности изотермической выдержки 4–6 часов относительная прочность бетона I группы пропаривания может достигать 40% при температуре 40 °C и увеличиваться до 60% при температуре 60 °C. Максимальные значения относительной прочности 70–80% от прочности бетона в проектном возрасте 50 МПа могут быть получены при температуре изотермической выдержки 80 °C. Показано, что при длительности изотермической выдержки более 6 часов интенсивность нарастания прочности снижается. Сопоставляя результаты исследований [16; 17] с результатами, представленными в работе [21], можно сделать вывод о невозможности использования данной методики для прогнозирования прочности бетона с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров.

В нормативной литературе, в частности П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017¹⁰, при назначении режимов тепловлажностной обработки бетона влияние модификаторов бетона также рекомендуется учитывать через расчет двух коэффициентов Kf_{m1} и Kf_{m2} , характеризующих отношение кубиковой прочности бетона на сжатие, твердеющего в нормальных температурно-влажностных условиях в течение соответственно 1 и 2 сут., с химическими добавками, к соответствующей прочности бетона без добавок. Только для трех пластифицирующих добавок С-3, ЛСТМ-2, ЛСТ эти коэффициенты могут быть определены по формулам, приведенным в нормативном документе¹¹. Для суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров формулы для расчетов не представлены, следовательно, режимы ТВО могут быть установлены только экспериментальным путем.

Обобщение данных выше приведенных исследований позволяет выделить следующие общие подходы при назначении режимов ТВО бетонов с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров: длительность предварительного выдерживания 3–6 часов, скорость подъема температуры не более 10 °C/час, температура изотермического прогрева 40 °C–60 °C, содержание добавки в бетоне не более 0,5% от массы цемента.

Целью выполнения данного исследования является определение эффективности низкотемпературных режимов тепловой обработки бетонов класса С³²/40 с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатных эфиров и комплексными добавками на их основе.

Характеристика материалов и методика проведения исследований. Для приготовления бетонной смеси в качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Кричевцементошифер» по ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия», ГОСТ 30515 «Цементы. Общие технические условия». Физико-механические характеристики портландцемента приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Физико-механические характеристики портландцемента

Класс портландцемента	НГЦТ, %	Группа эффективности пропаривания	Средняя активность при пропаривании, МПа	Сроки схватывания, ч-мин		Минералогический состав клинкера, %			
				начало	конец	C ₃ S	C ₃ A	C ₂ S	C ₄ AF
ЦЕМ I 42,5Н	27,25	I	33,6	2 ²⁰	5 ⁰⁰	64,4	6,1	14,1	11,2

¹⁰ См. сноску 2.

¹¹ См. сноску 2.

В качестве крупного заполнителя использовался щебень производства РУПП «Гранит» по ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия». В качестве мелкого заполнителя в составе бетонной смеси применялся природный песок карьера «Боровое» производства филиала «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементошифер», удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Физико-механические характеристики щебня и песка представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Физико-механические характеристики заполнителей

Наименование показателя	Песок	Щебень
Истинная плотность, г/см ³	2,45	2,65
Насыпная плотность, кг/м ³	1507	1415
Содержание пылеватых и глинистых частиц, %	2,40	0,9
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, %	–	20,2
Пустотность, %	39,2	47,8
Влажность, %	3,2	4,3
Модуль крупности	2,20	–
Размер фракции, мм	–	5-20
Марка по дробимости	–	1400

В качестве модифицирующих добавок использовались добавки производства СКТ-СТАНДАРТ («Торговый Дом «Хидетал»), ООО «Стахема-М», ЗАО «Группа компаний «ПЕНЕТРОН-РОССИЯ» по СТБ 1112-98 «Добавки для бетонов. Общие технические условия».

Добавка Хидетал ГП-9-Альфа – это суперпластификатор 5-го поколения (гиперпластификатор) на основе эфиров поликарбоксилатов универсального применения. Основные свойства: водоредуцирование, пластификация. Дополнительные свойства: при водоредуцировании быстрый набор ранней прочности, повышение морозостойкости и водонепроницаемости. Пластификатор I группы. За счет высокой водоредуцирующей способности позволяет значительно сократить расход цемента с выходом на марочную прочность. Позволяет существенно сократить время и изменить режим ТВО. Снижает или полностью исключает водоотделение и расслоение на высокоподвижных смесях.

Добавка Хидетал П8 – воздухововлекающая добавка на основе комплекса амфoterных и анионных поверхностно-активных веществ. Добавка предназначена для повышения воздухосодержания и морозостойкости бетона, улучшает формуемость жестких бетонных смесей, позволяет улучшить уплотняемость, получить высоко-качественную поверхность изделий. Позволяет повысить объем растворной смеси на 10–15%, сохраняет при этом прочность за счет снижения количества воды.

Добавка Стакемент 2000М – гиперпластификатор на основе поликарбонатов (I группы). Повышает трещино-стойкость, морозостойкость бетона, снижает усадку, повышает водонепроницаемость с получением W12 и выше. Добавка Стакемент 2000М позволяет изготавливать бетоны высоких марок (М 600 и более) по прочности на сжатие из высокопластичных (литых) бетонных смесей, увеличить подвижность с П1 до П5, повышать начальную и конечную прочность бетона, повышать плотность, морозостойкость, водонепроницаемость и другие физико-механические свойства бетона, снизить расход цемента на 20% и более.

Добавка Микропоран – воздухововлекающая добавка на основе абиетиновых солей. В затвердевшем бетоне повышает морозостойкость и стойкость против воздействия химических средств для размораживания. В бетонной смеси или в растворе создаёт малые закрытые воздушные поры диаметром 10–300 мкм (так называемый эффективный воздух). Поры в свежеприготовленной смеси действуют как слабый пластификатор, в затвердевшем бетоне повышают морозостойкость и стойкость против воздействия химических средств для размораживания. Характеристика химических добавок приведена в таблице 4.

Таблица 4. – Характеристика химических добавок

Наименование показателя	Хидетал ГП-9-Альфа	Стахемент 200М	Хидетал П8	Микропоран
Документ по стандартизации	ТУ ВУ 490681049.005-2012	ТУ ВУ 800013176.004-2011	ТУ ВУ 490681049.003-2012	ТУ ВУ 800013176.002-2011
Внешний вид	Непрозрачная белая жидкость	Непрозрачная жидкость светло-коричневого цвета	Голубая жидкость	Прозрачная жидкость желтого цвета
Массовая доля сухих веществ, %, не менее	30,6	30,0	2,6	5,0
Плотность при 20 °C, кг/м ³	1,064	1,075	1,005	1,015
Водородный показатель (значение pH) раствора	4,5	5,9	7	9,1
Содержание хлор-ионов, %	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Рекомендуемая дозировка, % ввода	0,4–0,8	0,5–1,2	0,05–0,4	0,1–0,2

Добавка Пенетрон Адмикс относится к гидроизоляционным добавкам, позволяет увеличить марку бетона по водонепроницаемости и морозостойкости, выпускается в соответствии с ТУ ВУ 191081376.001-2015. Рекомендуемая дозировка 0,8–1,3%.

Для проведения исследований были составлены комплексы из химических добавок следующего состава:

- D1: Стахемент 2000М 1,0% от массы цемента; Микропоран 0,15% от массы цемента;
- D2: Хидетал ГП-9-Альфа 0,7% от массы цемента; Хидетал П8 0,05% от массы цемента;
- D3: Хидетал ГП-9-Альфа 1,0% от массы цемента; Хидетал П8 0,05% от массы цемента; Пенетрон Адмикс 1,3% от массы цемента.

Для определения прочности бетона изготавливались образцы-кубы с ребром 100 мм, которые подвергались ТВО при заданных режимах и далее твердели в воздушно-сухих условиях, после чего в возрасте 7 и 28 суток определялась прочность бетона на сжатие по ГОСТ 10180-2012. Для определения прочности на сжатие использовался пресс гидравлический П-125. Подвижность бетонной смеси определялась по ГОСТ 10181-2014. Тепловлажностная обработка производилась в лабораторной камере по низкотемпературным режимам, отличающимся температурой и длительностью изотермического прогрева.

Результаты исследований. Составы бетона подбирались, исходя из обеспечения класса бетона С³²/40, марки по подвижности П2. При введении комплексных химических добавок компонентный состав контрольного состава бетонной смеси (СК) был откорректирован с учетом водоредуцирующего действия добавок суперпластификаторов. Подобранные составы бетонных смесей представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Составы бетонных смесей с комплексными химическими добавками

Обозначение состава	Расход материалов, кг/м ³				Расчетная плотность, кг/м ³	В/Ц	Обозначение комплексной добавки	Компонентный состав комплексной химической добавки, кг/м ³ (% от массы цемента)					Осадка конуса, см	Марка по подвижности
	Ц	П	Щ	В				Хидетал ГП-9-Альфа	Хидетал П8	Стахемент 2000М	Микропоран	Пенетрон Адмикс		
СК	410	770	1050	200	2430	0,49	–	–	–	–	–	–	5	П2
C1	410	874	1050	160	2494	0,39	D1	–	–	4,10 (1,0)	0,62 (0,15)	–	7	П2
C1	410	874	1050	160	2494	0,39	D2	2,87 (0,7)	0,205 (0,05)	–	–	–	8	П2
C2	450	800	1050	175	2475	0,39	D2	3,15 (0,7)	0,225 (0,05)	–	–	–	8	П2
C3	400	890	1050	155	2495	0,39	D3	4,00 (1,0)	0,20 (0,05)	–	–	5,20 (1,3)	5	П2

В качестве контрольного принят бетон без химических добавок (СК), твердеющий в воздушно-сухих условиях при температуре $t=18\pm2$ °C и влажности W=60%, прочность которого составила в возрасте 7 сут. и 28 сут. соответственно 18,7 МПа и 48,8 МПа.

Общий цикл тепловлажностной обработки подразделяется на следующие периоды:

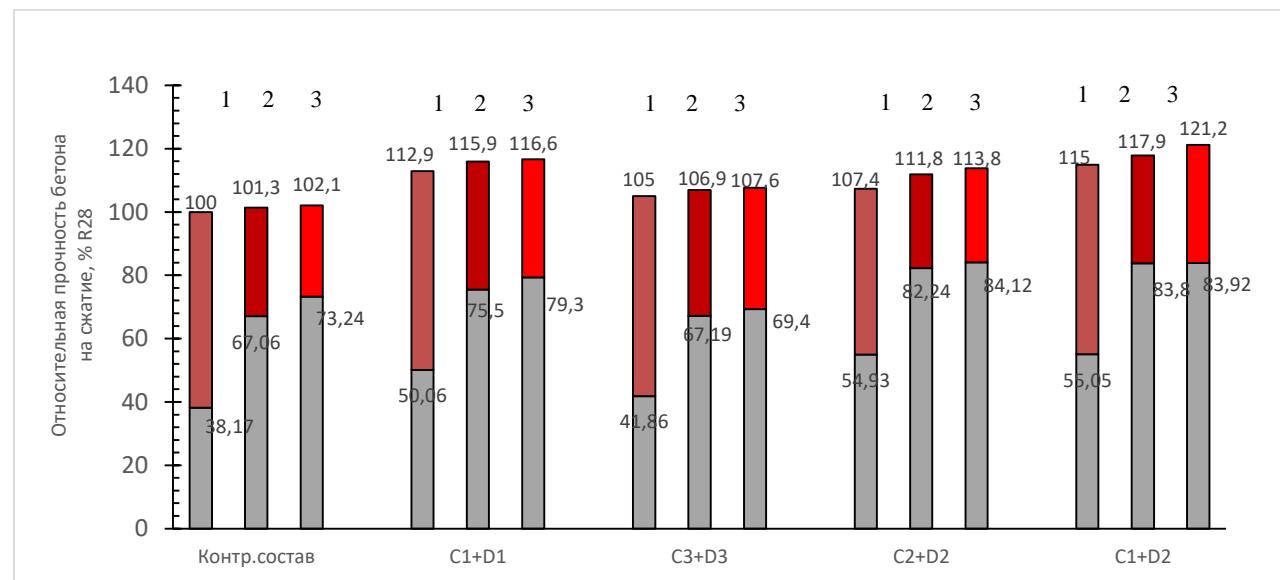
- от момента окончания формования изделия до начала повышения температуры среды в камере – период предварительного выдерживания $\tau_{\text{пр.в.}}$;
- от начала повышения температуры среды в камере до достижения заданного наивысшего уровня температуры – период подъема температуры $\tau_{\text{п.}}$;
- выдерживание при наивысшей заданной температуре – период изотермического прогрева $\tau_{\text{из.}}$;
- понижение температуры среды камеры – период охлаждения $\tau_{\text{ост.}}$.

Согласно П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017¹² (см. таблицу 3) рекомендуемый режим тепловлажностной обработки для бетона класса С^{32/40}, обеспечивающий достижение около 70% прочности бетона от проектной: 3+3+2. С учетом данных рекомендаций для проведения эксперимента приняты четыре трапециoidalных режима тепловлажностной обработки (ТВО) длительностью 12 и 14 часов: время предварительного выдерживания – 4 ч; время подъема температуры – 3 ч; продолжительность изотермического прогрева при температуре 40 °C (60 °C) – 3 ч и 5 ч и период охлаждения – 2 ч. Принятые режимы ТВО представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Режимы ТВО бетона, модифицированного комплексными добавками

Обозначение	Общий цикл ТВО	Температура изотермического прогрева, °C
1	воздушно-сухие условия	температура $t=18\pm2$ °C; влажность W=60 %
2	12 (4+3+3+2)	60
3	14 (4+3+5+2)	60
4	12 (4+3+3+2)	40
5	14 (4+3+5+2)	40

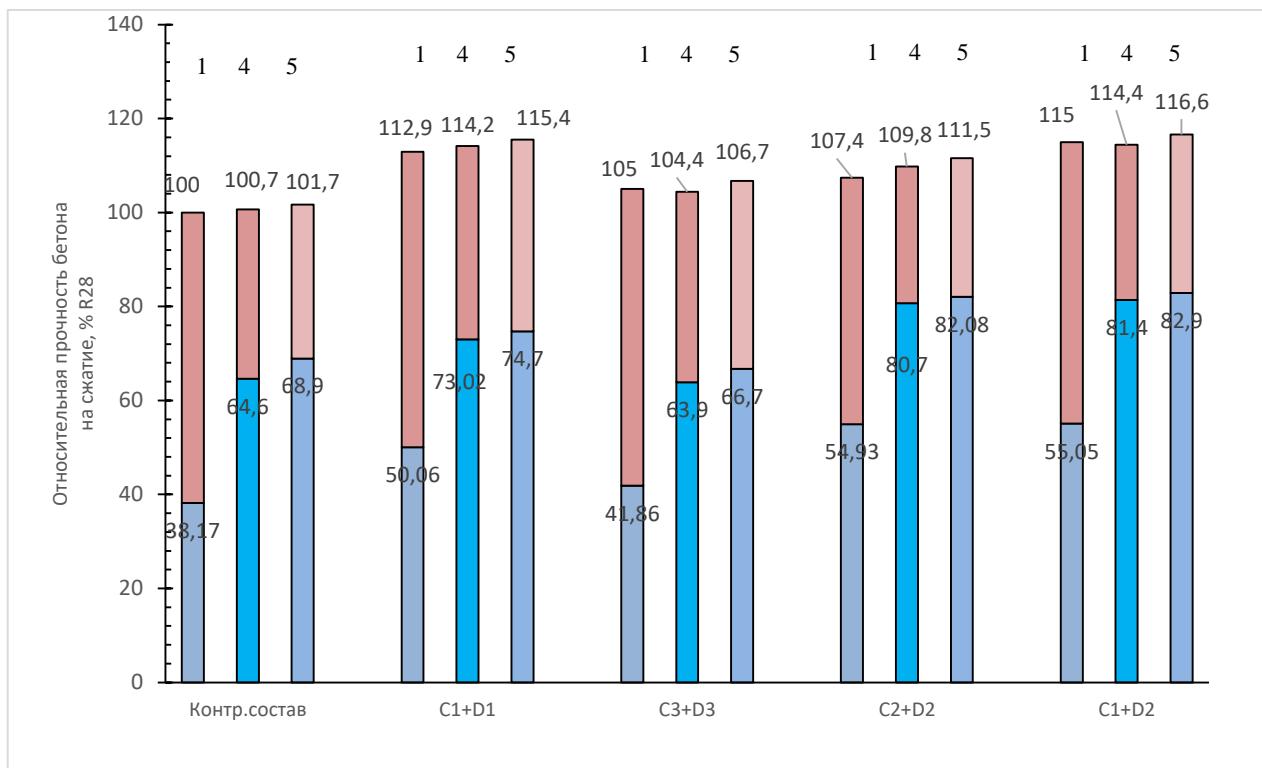
Влияние температуры и длительности изотермического прогрева на прочность модифицированного бетона представлены на графиках, которые построены в виде гистограмм с накоплением. Каждый столбик гистограммы состоит из двух частей, отражающих относительное значение прочности в возрасте 7 суток и 28 суток. Графики представлены на рисунках 1, 2.



1 – воздушно-сухие условия; 2 – ТВО: 4+3+3+2; 3 – ТВО: 4+3+5+2

Рисунок 1. – Прочность модифицированного бетона, в возрасте 7 (нижняя часть столбика) и 28 суток (верхняя часть столбика) после ТВО с температурой изотермического прогрева 60 °C

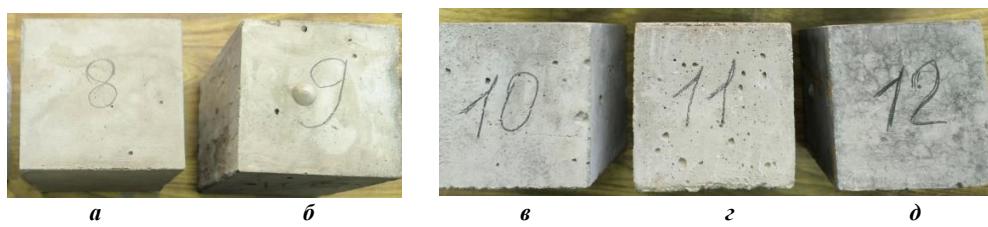
¹² См. сноска 2.



1 – воздушно-сухие условия; 4 – ТВО: 4+3+3+2; 5 – ТВО: 4+3+5+2

Рисунок 2. – Прочность модифицированного бетона, в возрасте 7 (нижняя часть столбика) и 28 суток (верхняя часть столбика) после ТВО с температурой изотермического прогрева 40 °C

Внешний вид образцов-кубиков после ТВО представлен на рисунке 3.



a – C1+D1; ̄ – C3+D3; ̥ – C2+D2; ̦ – C1+D2; ̧ – CK

Рисунок 3. – Примеры образцов-кубиков после ТВО: 4+3+5+2 при температуре изотермического прогрева 60 °C из бетона разных составов

Обсуждение. В ходе исследования установлено, что в возрасте 28 суток при твердении в воздушно-сухих условиях по сравнению с бездобавочным бетоном прочность на сжатие модифицированного бетона составов C1+D1, C3+D3, C2+D2, C1+D2 увеличилась соответственно на 12,9%, 5,0%, 7,4%, 15%, то есть наибольшее увеличение прочности обеспечивают комплексная добавка D1: Стакемент 2000М 1,0% от массы цемента; Микропоран 0,15% от массы цемент; и комплексная добавка D2: Хидетал ГП-9-Альфа 0,7% от массы цемента; Хидетал П8 0,05% от массы цемента.

Установлено, что наиболее интенсивный набор прочности модифицированного бетона идет при выдерживании в условиях ТВО по режиму 3 при температуре изотермического прогрева 60 °C. В возрасте 7 суток для составов C1+D1, C3+D3, C2+D2, C1+D2 прочность модифицированного бетона была соответственно 79,3%, 69,4%, 84,1%, 83,9% от прочности бездобавочного бетона в возрасте 28 сут. при воздушно-сухих условиях твердения. В возрасте 28 суток прочность на сжатие модифицированного бетона превышала прочность бездобавочного бетона соответственно на 16,6%, 7,6%, 13,8%, 21,2%.

Следует отметить, что снижение температуры изотермического прогрева с 60 °C до 40 °C не привело к снижению интенсивности набора прочности. Так, прочность на сжатие бетона состава C1+D2 в возрасте 7, 28 суток после ТВО по режиму 5 была соответственно 82,9% и 116,6%; по режиму 3 соответственно 83,9% и 121,2% от прочности на сжатие бездобавочного бетона при воздушно-сухих условиях твердения.

Сокращение времени изотермического прогрева с 5 часов до 3 часов также существенно не повлияло на значение прочности на сжатие в возрасте 7 суток после ТВО. В частности, прочность бетона на сжатие состава С1+Д2 в возрасте 7 суток после ТВО по режимам 2, 3, 4, 5 была соответственно 83,8 %, 83,9%; 81,4% и 82,9% прочности на сжатие бездобавочного бетона в возрасте 28 суток при воздушно-сухих условиях твердения.

Комплексная добавка D1 показала худший результат по сравнению с комплексной добавкой D2. Прочность на сжатие бетона состава С1+Д1 в возрасте 7 суток после ТВО по режимам 2, 3, 4, 5 была соответственно 75,5%, 79,3%; 73% и 74,7% прочности на сжатие бездобавочного бетона в возрасте 28 суток при воздушно-сухих условиях твердения.

Наименьший прирост прочности после тепловлажностной обработки показал состав С3 с комплексной добавкой D3: в возрасте 7 суток после ТВО по режимам 2, 3, 4, 5 прочность была соответственно 67,2%, 69,4%; 63,9% и 66,7% от прочности на сжатие бездобавочного бетона в возрасте 28 суток при воздушно-сухих условиях твердения. Полученные значения прочности находятся на уровне показателей для бездобавочного бетона, прочность которого в возрасте 7 суток после ТВО по режимам 2, 3, 4, 5 составляла соответственно 67,1%, 73,2%; 64,5% и 68,9% прочности на сжатие в возрасте 28 суток при воздушно-сухих условиях твердения. По сравнению с комплексной добавкой D2 в составе комплексной добавки D3 количество суперпластификатора Хидетал ГП-9-Альфа было увеличено с 0,7% до 1,0% от массы цемента, что, вероятно, привело к замедлению процесса гидратации из-за блокирования частиц цемента.

Следует отметить, что бездобавочный бетон контрольного состава после ТВО 4+3+5+2 при температуре изотермического прогрева 60 °C, в течение 7 суток набрал 73,2% от прочности в возрасте 28 суток при твердении в воздушно-сухих условиях, т.е. набор прочности после ТВО проходил почти в 2 раза быстрее.

Заключение. Несмотря на широкое внедрение поликарбоксилатных суперпластификаторов, действующие нормативные документы не содержат расчетных зависимостей для определения их влияния на физико-механические свойства цемента при определении режимов ТВО бетонов с такими добавками, что делает экспериментальный подход обязательным. Низкотемпературные режимы тепловлажностной обработки являются эффективным методом интенсификации твердения бездобавочных бетонов, позволяющим получить до 70% прочности на 7 сутки после ТВО при длительности изотермического прогрева 5 часов и температуре изотермического прогрева 60 °C. Применение комплексных добавок, включающих суперпластификатор на поликарбоксилатной основе и воздухововлекающую добавку, делает возможным обеспечение прочности до 80% на 7 сутки после ТВО при длительности изотермического прогрева 3 часа и при температуре изотермического прогрева 40 °C. Установлено, что наибольший набор прочности обеспечивает комплексная химическая добавка, включающая суперпластификатор Хидетал ГП-9-Альфа в количестве 0,7% от массы цемента и воздухововлекающую добавку Хидетал П8 в количестве 0,05% от массы цемента. Применение низкотемпературных режимов ТВО в сочетании с поликарбоксилатными суперпластификаторами и комплексными добавками на их основе позволяет достигать высоких прочностных характеристик, что особенно актуально для энергосберегающих и экологически ориентированных технологий в производстве сборного железобетона.

ЛИТЕРАТУРА

- Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: ACB, 2022. – 456 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/231595>.
- Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / Под ред. С.А. Миронова. – М.: Стройиздат, 1973. – 96 с.
- Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 158 с.
- Блещук Н.П. Проектирование состава бетона и режима тепловой обработки железобетонных конструкций // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3. – С. 37–42.
- Бибик М.С., Бабицкий В.В. Расчетно-экспериментальная методика оптимизации режима тепловлажностной обработки бетона // Строительная наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 31–35.
- Ушеров-Маршак А.В., Бабаевская Т.В., Циак М. Методологические аспекты современной технологии бетона // Бетон и железобетон. – 2002. – № 1. – С. 5–7.
- Влияние времени и температуры твердения на структурообразование цементного камня / А.И. Гныря, Ю.А. Абзаев, С.В. Коробков и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 171–185.
- Influence of curing temperature on the hydration and strength development of Class G Portland cement / X. Pang, L. Sun, M. Chen et al. // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 156. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106776.
- Review on effect of steam curing on behavior of concrete / A.M. Zeyad, B.A. Tayeh, A. Adesina et al. // Cleaner Materials. – 2022. – Vol. 3. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100042.
- A Review of the Effects of Raw Material Compositions and Steam Curing Regimes on the Performance and Microstructure of Precast Concrete / Y. Zhou, Y. Zhan, M. Zhu et al. // Materials. – 2022. – № 15. DOI: 10.3390/ma15082859.
- Высокотехнологичные бетоны с использованием суперпластифицирующих добавок на основе поликарбоксилата / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, А.С. Слепухин и др. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 9. – С. 63–66.
- Юхневский П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. – 308 с.

13. The supramolecular impact mechanism of polycarboxylate superplasticizers on controlled hardening construction of nanocomposites / R.M. Khalikov, O.V. Ivanova, L.N. Korotkova et al. // Nanotechnologies in construction. – 2020. – № 12(5). – P. 250–255. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255.
14. Шмит'ко Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. К вопросам взаимосвязи структуры добавок-пластификаторов с величиной влажностной усадки цементных систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 11(755). – С. 134–144.
15. Koryanova Y., Nesvetaev G. About influence of some superplasticizers on hydration and the structure of hardened cement paste // MATEC Web of Conferences. – 2017. – № 129. DOI: 10.1051/matecconf/201712905017.
16. Кастроных Л.И., Каклюгин А.В., Гикало М.А. Влияние суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов на эффективность термообработки монолитного бетона // Строительные материалы. – 2023. – № 4. – С. 35–41. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41.
17. Прочность жестких бетонных смесей с поликарбоксилатными пластификаторами / Л.М. Добшиц, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 4. – С. 6–13. DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.6.
18. Тараканов О.В. Химические добавки в растворы и бетоны: монография. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 156 с.
19. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона: монография. – М.: Палеотип, 2006. – 244 с.
20. Smirnova O.M. Low-heat steaming treatment of concrete with polycarboxylate superplasticizers // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – № 102(2). DOI: 10.34910/MCE.102.13.
21. Зеленковская Ж.Л., Ковшар С.Н. Назначение и обоснование традиционных режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 150–157. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-2-150-157.

REFERENCES

1. Bazhenov, Y. M. (2022). *Tekhnologiya betona [Concrete technology]* (6th ed., rev. and enl.). Moscow: ASV. <https://e.lanbook.com/book/231595> (In Russ.).
2. Mironov, S. A. (Eds.). (1973). *Rost prochnosti betona pri proparivanii i posleduyushchem tverdenii [Strength gain of concrete during steam curing and subsequent hardening]*. Moscow: Stroyizdat. (In Russ.).
3. Malinina, L. A. (1977). *Teplov lazhnostnaya obrabotka tyazhelogo betona [Steam curing of heavyweight concrete]*. Moscow: Stroyizdat. (In Russ.).
4. Bleshchik, N. P. (2006). Proektirovanie sostava betona i rezhima teplovoy obrabotki zhelezobetonnykh konstruktsiy [Design of concrete mix and thermal curing regime for reinforced concrete structures]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika [Construction Science and Technology]*, (3), 37–42. (In Russ.).
5. Bibik, M. S., & Babitskiy, V. V. (2012). Raschetno-eksperimental'naya metodika optimizatsii rezhima teplov lazhnostnoy obrabotki betona [Computational-experimental method for optimizing the steam curing regime of concrete]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika [Construction Science and Technology]*, (1), 31–35. (In Russ.).
6. Usherov-Marshak, A. V., Babayevskaya, T. V., & Tsik, M. (2002). Metodologicheskie aspekty sovremennoy tekhnologii betona [Methodological aspects of modern concrete technology]. *Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*, (1), 5–7. (In Russ.).
7. Gnyrya, A. I., Abzaev, Y. A., Korobkov, S. V., & Gauss, K. S. (2018). Vliyanie vremeni i temperatury tverdeniya na strukturoobrazovanie tsementnogo kamnya [Influence of curing time and temperature on the structure formation of cement paste]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building]*, 20(2), 171–185. (In Russ.).
8. Pang, X., Sun, L., Chen, M., Xian, M., Cheng, G., Liu, Y., & Qin, J. (2022). Influence of curing temperature on the hydration and strength development of Class G Portland cement. *Cement and Concrete Research*, (156), Article 106776. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106776.
9. Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., Adesina, A., Azevedo, A. R. G., Amin, M., Hadzima-Nyarko, M., & Agwa, I. S. (2022). Review on effect of steam curing on behavior of concrete. *Cleaner Materials*, (3), Article 100042. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100042.
10. Zhou, Y., Zhan, Y., Zhu, M., Wang, S., Liu, J., & Ning, N. (2022). A review of the effects of raw material compositions and steam curing regimes on the performance and microstructure of precast concrete. *Materials*, 15(8), Article 2859. DOI: 10.3390/ma15082859.
11. Suleymanova, L. A., Pogorelova, I. A., Slepukhin, A. S., & Plekhova, S. I. (2016). Vysokotekhnologichnye betony s ispol'zovaniem superplastifitsiruyushchikh dobavok na osnove polikarboksilata [High-performance concretes using polycarboxylate-based superplasticizers]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov]*, (9), 63–66. (In Russ.).
12. Yukhnevskiy, P. I. (2013). *Vliyanie khimicheskoy prirody dobavok na svoystva betonov [Influence of the chemical nature of admixtures on concrete properties]*. Minsk: Belarusian National Technical University. (In Russ.).
13. Khalikov, R. M., Ivanova, O. V., Korotkova, L. N., & Sinitsyn, D. A. (2020). Supramolekulyarnyy mekanizm vliyaniya polikarboksilatnykh superplastifikatorov na upravlyayemoye tverdeniye stroitel'nykh nanokompozitov [Supramolecular mechanism of polycarboxylate superplasticizers' influence on controlled hardening of construction nanocomposites]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve [Nanotechnologies in Construction]*, 12(5), 250–255. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255.
14. Shmit'ko, E. I., Bel'kova, N. A., & Makushina, Y. V. (2021). K voprosam vzaimosvyazi struktury dobavok-plastifikatorov s velichinoy vlazhnostnoy usadki tsementnykh sistem [On the relationship between the structure of plasticizer admixtures and moisture shrinkage of cement systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction]*, 11(755), 134–144. (In Russ.).
15. Koryanova, Y., & Nesvetaev, G. (2017). About influence of some superplasticizers on hydration and the structure of hardened cement paste. *MATEC Web of Conferences*, (129), Article 05017. DOI: 10.1051/matecconf/201712905017.

16. Kastornykh, L. I., Kaklyugin, A. V., & Gikalo, M. A. (2023). Vliyanie superplastifikatorov na osnove polikarboksilatov na effektivnost' termoobrabotki monolitnogo betona [Influence of polycarboxylate-based superplasticizers on the efficiency of thermal treatment of cast-in-place concrete]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (4), 35–41. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Dobshits, L. M., Anisimov, S. N., Smirnov, A. O., Leshkanov, A. Y., & Anisimova, A. A. (2020). Prochnost' zhestkikh betonnykh smesey s polikarboksilatnymi plastifikatorami [Strength of stiff concrete mixes with polycarboxylate plasticizers]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Structures. Technologies]*, (4), 6–13. DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.6. (In Russ.).
18. Tarakanov, O. V. (2016). Khimicheskie dobavki v rastvory i betony [Chemical admixtures in mortars and concretes]. Penza: PGUAS. (In Russ.).
19. Izotov, V. S., & Sokolova, Y. A. (2006). *Khimicheskie dobavki dlya modifikatsii betona [Chemical admixtures for concrete modification]*. Moscow: Paleotip. (In Russ.).
20. Smirnova, O. M. (2021). Low-heat steaming treatment of concrete with polycarboxylate superplasticizers. *Magazine of Civil Engineering*, 102(2), Article 10213. DOI: 10.34910/MCE.102.13.
21. Zelenkovskaya, Z. L., & Kovshar, S. N. (2023). Naznacheniye i obosnovaniye traditsionnykh rezhimov teplovoy obrabotki betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy [Design and justification of conventional thermal curing regimes for concrete and reinforced concrete products]. *Nauka i tekhnika [Science and Technology]*, 22(2), 150–157. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-2-150-157. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 15.12.2025

LOW-HEAT STEAMING TREATMENT OF HEAVY CONCRETE WITH COMPLEX ADDITIVES BASED ON POLYCARBOXYLATE SUPERPLASTICIZERS

L. PARFENOVA¹⁾, V. MARKOVTSOVA²⁾, S. RAZZAKOV³⁾

^(1), 2) *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,*

³⁾ *Namangan State Technical University*)

This article presents the low-temperature hardening parameters of concrete with complex admixtures, including a polycarboxylate superplasticizer and an air-entraining admixture. It was found that the use of a polycarboxylate superplasticizer and an air-entraining admixture in concrete allows for a reduction in isothermal heating time from 5 hours to 3 hours and an isothermal heating temperature from 60°C to 40°C, while ensuring high hardening intensity and strength gain after 7 days of 80–84% of the design strength, and at 28 days, a 15–20% increase in the strength of air-dry concrete without the admixture. A complex admixture containing Hidetal GP-9-Alpha and Hidetal P8 is more effective in low-temperature hardening than the complex admixtures Stahement 2000M and Microporan. Polycarboxylate superplasticizers have been shown to enable the use of reduced and low-temperature HTT regimes, which will reduce energy costs and the risk of structural defects.

Keywords: heavy-duty concrete, heat-moisture treatment, isothermal heating, curing intensification, polycarboxylate superplasticizer, air-entraining admixture.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ ЦОД ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. В.М. УЛЯШЕВА¹⁾,

канд. техн. наук, доц. А.Ю. МАРТЬЯНОВА²⁾, К.В. РЕЗНИК³⁾

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

¹⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5456-9532>,

²⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-2957>,

³⁾ ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3110-6833>

Надежность системы газоснабжения объектов различного назначения существенно зависит от надежного функционирования всех элементов газораспределительных агрегатов, размещенных в газораспределительных станциях (ГРС), предназначенных в первую очередь для снижения давления (редуцирования) до требуемой величины в зависимости от назначения ГРС. Редуцирование требует значительных затрат энергии, в том числе тепловой, на подогрев газа. В настоящее время требуются значительные вычислительные ресурсы, для чего используются центры обработки данных (ЦОД), или дата-центры, которые являются мощными источниками тепловых выбросов в атмосферу. Результаты численного моделирования теплового режима ЦОД подтверждают высокие значения температуры воздуха в помещениях. Известны различные варианты использования сбросной теплоты ЦОД. В данной работе предлагается утилизация теплоты ЦОД для использования в технологическом процессе ГРС с использованием детандер-генераторных агрегатов.

Ключевые слова: газоснабжение, газораспределительная станция (ГРС), центр обработки данных (ЦОД), утилизация теплоты, детандер-генераторный агрегат (ДГА), турбодетандер.

Введение. Активный рост внутреннего рынка потребления природного газа¹, продолжение, несмотря на смену geopolитической реальности, следования отечественных корпораций принципам устойчивого развития (ESG)², в том числе – игроков газового рынка, создают благоприятные условия для внедрения энергосберегающих технологий на объектах газоснабжения. Развитие информационного сектора экономики, в частности рост мощностей и площадей центров обработки данных (ЦОД), или дата-центров³, обладающих энергоёмким основным (вычислительным, коммуникационным) оборудованием и вспомогательным (климатическим и холодильным) для своих нужд, требуют всё большие объемы электроэнергии. По оценкам сетевых компаний в настоящее время потребление электроэнергии объектами ЦОД превышает 3,5 ГВт⁴. При этом потенциал энергосбережения составляет 2.1×10^6 МВт · ч/год, а к 2030 г. может увеличиться до 6.3×10^6 МВт [1]. Расчет теплопоступлений от оборудования ЦОД основан на рекомендациях, представленных в [2]. По результатам расчетов теплонапряженность машинных залов составляет порядка 50 Вт/м³ или 3 кВт/м², что соизмеримо с тепловыми нагрузками горячих цехов промышленных объектов. Значительное количество теплоты поступает от различных систем охлаждения оборудования ЦОД, что способствует повышению теплового загрязнения атмосферы.

Актуальность разработки энергосберегающих технологий для использования теплового потенциала ЦОД обоснована многими авторами [1; 3–5]. Среди предлагаемых технологий отмечены ограниченные возможности внутреннего использования сбросной теплоты ЦОД, в основном для подогрева приточного воздуха с использованием различных утилизаторов теплоты. Широко распространено внешнее применение для систем теплоснабжения с использованием тепловых насосов. Среди возможных направлений также отмечены сушка биомассы, предварительный подогрев воды при производстве энергии, в опреснительных установках, использование при производстве электроэнергии.

В последнее время стали широко использоваться детандерные агрегаты для производства электроэнергии [6; 7]. В данной работе предлагается решение, позволяющее соблюсти требования экологической повестки и обеспечить стабильный рост и развитие для обозначенных сфер экономики, в виде размещения машинных залов ЦОД вблизи объектов газотранспортных магистралей, в частности, газораспределительных станций (ГРС), оборудованных детандерными агрегатами.

¹ Корпоративный журнал ПАО «Газпром». – 2024. – № 4. – С. 11–15. URL: https://www.gazprom.ru/f/posts/58/270952/gazprom_04_2024_s.pdf (дата обращения 20.04.2025).

² «Газпром» инвестирует в устойчивость. URL: <https://www.rbc.ru/industries/news/651fbcc19a7947008ce7b99a> (дата обращения 20.04.2025).

³ BusinesStat: Анализ рынка коммерческих дата-центров в России в 2018–2022 гг., прогноз на 2023–2027 гг. в условиях санкций. URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14188/> (дата обращения 20.04.2025).

⁴ Киловатт палата. Как меняется потребность ЦОДов в электроэнергии с развитием ИИ. URL: <https://www.komersant.ru/doc/8043060> (дата обращения 20.10.2025).

Методы и материалы. Структура машинных залов ЦОД представляет из себя чередование рядов, состоящих из стоек вычислительного оборудования, и «горячих» и «холодных» коридоров (рисунок 1).

Тепловой баланс данных центров практически не зависит от периода года, поскольку из-за отсутствия световых проемов исключается действие теплоты от солнечной радиации. При определении холодопроизводительности систем кондиционирования воздуха (СКВ) учитываются теплопоступления от серверного оборудования в стойках ($Q_{\text{ит}}$), источников бесперебойного питания (ИБП, $Q_{\text{ИБП}}$), элементов системы распределения электроэнергии ($Q_{\text{РП}}$), осветительных приборов ($Q_{\text{осв}}$), обслуживающего персонала ($Q_{\text{люд}}$), а также теплоты, поступающей с наружным воздухом в теплый период года ($Q_{\text{нап}}$) [8].

В большинстве случаев в технической документации на серверное оборудование представлена полезная выходная электрическая мощность без учета потерь электроэнергии. Для определения потерь и более достоверной информации о потребляемой электроэнергии оборудованием в машинном зале можно воспользоваться следующей формулой:

$$Q_{\text{с.о.}} = E_{\text{с.о.}} = 100 \cdot E_{\text{вых.с.о.}} \cdot N_{\text{б.п.}} \cdot \eta_{\text{б.п.}}^{-1}, \text{ Вт,} \quad (1)$$

где $Q_{\text{с.о.}}$ – теплопоступления от серверного оборудования, Вт;

$E_{\text{с.о.}}$ – потребляемая электрическая мощность серверного оборудования, Вт;

$E_{\text{вых.с.о.}}$ – полезная выходная мощность или паспортная мощность блоков питания серверного оборудования, Вт;

$N_{\text{б.п.}}$ – количество основных блоков питания серверного оборудования в соответствии с паспортной схемой резервирования, шт;

$\eta_{\text{б.п.}}^{-1}$ – эффективность одного блока питания, %.

Теплопоступления от ИБП:

$$Q_{\text{ИБП}} = 0,04 \cdot E_{\text{н}} + 0,06 \cdot E_{\text{с.о.}}, \text{ Вт,} \quad (2)$$

где $E_{\text{н}}$ – потребляемая ИБП мощность, Вт.

Тепловыделения от устройств распределения питания:

$$Q_{\text{РП}} = 0,02 \cdot E_{\text{н}} + 0,02 \cdot E_{\text{с.о.}}, \text{ Вт,} \quad (3)$$

где $E_{\text{н}}$ – номинальное значение энергосистем, иначе потребляемая устройствами распределения питания мощность), Вт.

В результате суммарные теплопоступления в помещениях данных центров определяются по формуле:

$$Q_{\text{ЦОД}} = Q_{\text{осв}} + Q_{\text{люд}} + Q_{\text{нап}} + Q_{\text{с.о.}} + Q_{\text{ИБП}} + Q_{\text{РП}}, \text{ Вт,} \quad (4)$$

где $Q_{\text{осв}}$ – теплопоступления от источников искусственного освещения, Вт;

$Q_{\text{люд}}, Q_{\text{нап}}$ – поступления теплоты от людей и через наружные ограждающие конструкции, Вт. Для данного объекта рассмотрен рабочий автоматический режим без обслуживания, помещение располагается на первом этаже и не имеет наружных ограждающих конструкций.

Результаты расчета теплового баланса для приведенного выше машинного зала представлены в таблице 1. Согласно методике [8] требуемая холодопроизводительность СКВ для подбора прецизионных кондиционеров принимается равной суммарным теплопоступлениям в помещения ЦОД с учетом рекомендуемого запаса 20% и коэффициента неравномерности загрузки серверного оборудования, который принимается равным 0,8 [8].

Таблица 1. – Тепловой баланс машинного зала ЦОД

Наименование помещения	Объем помещения, м ³	От искусств. освещения, Вт	От оборудования, Вт	Избытки теплоты (явные)	
				Вт	Вт/м ³
РТП-1 1-ый этаж	4750,8	1624	68075	69669	14,7

Для обеспечения нормируемых параметров (температура 10–35°C) подобраны 7 прецизионных кондиционеров DP-UPC140BUI-SX/XZ/QS/TS-D/F с выносным конденсатором фирмы Dantex, производительностью 14,7 кВт с расходом воздуха 3300 м³/ч.

Для оценки эффективности подобранных оборудования и схемы размещения серверных стоек в программе STAR-CCM+ выполнено численное моделирование. При создании геометрической модели учтены прецизионные кондиционеры, решетки для подачи охлажденного воздуха, размещение серверных стоек по принципу горячих и холодных коридоров (рисунок 1). Охлажденный воздух подается снизу через фальшпол. Численное моделирование теплового и воздушного режима помещения ЦОД основано на применении уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса [9]. Для расчета использована модель турбулентности k-e [10]. Некоторые результаты расчета представлены на рисунке 2.

В соответствии с руководством⁵ температура соответствует диапазону допустимых значений (10 до 35 °C), среднее значение по объему составляет 29 °C. Температура в пространстве фальшпола составляет 19±1 °C, что соответствует требованиям⁶.

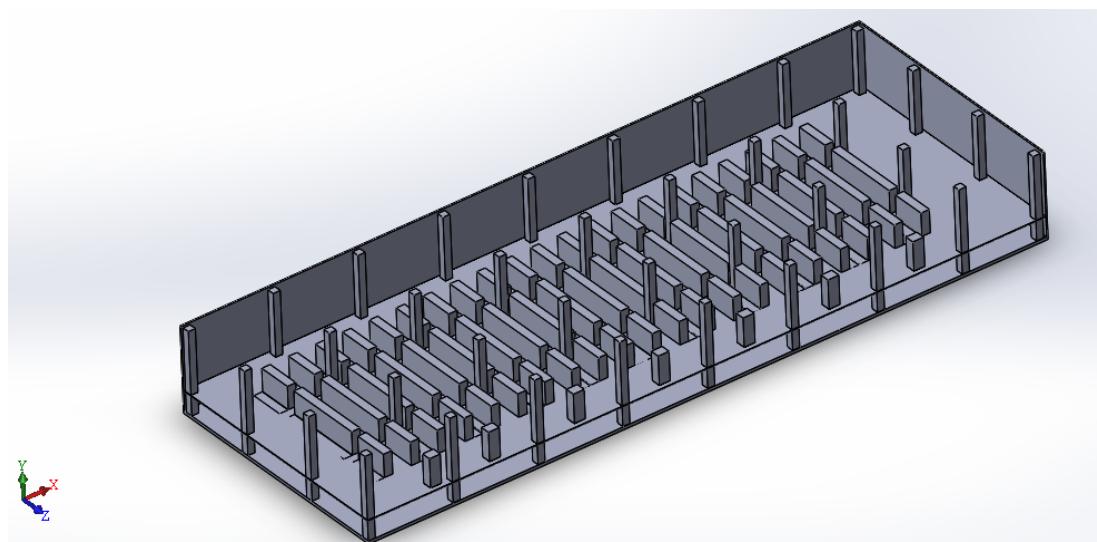


Рисунок 1. – Геометрическая модель помещения ЦОД

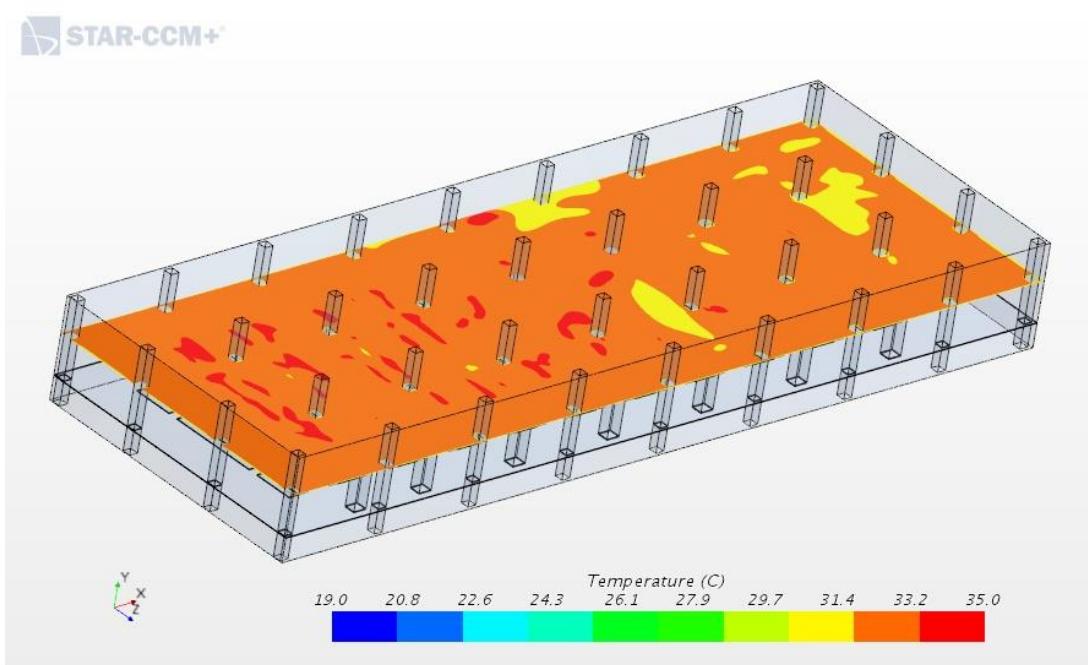


Рисунок 2. – Распределение температуры воздуха на уровне 1,500 м

⁵ ASHRAE TC 9.9. Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices URL: https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Bookstore/ASHRAE_TC0909_Power_White_Paper_22_June_2016_REVISED.pdf.

⁶ СТО НОСТРОЙ 2.15.177-2015. Инженерные сети зданий и сооружений внутренние. Устройство систем вентиляции и кондиционирования серверных помещений. Правила, контроль выполнения, требования к результатам работ. URL: https://profstroigroup.ru/uploads/files/STO/STO%202019/131-140/133_sto_nostroj_2_15_177-2015.pdf.

При определении тепловых нагрузок ЦОД, которые требуется отводить системами кондиционирования воздуха в паре с оборудованием возводимых вблизи с ЦОД объектами газораспределительных станций (ГРС), а именно: детандер-генераторными агрегатами, остается актуальным вопрос регулирования работы этой парной системы в условиях изменения мощностей ЦОД.

В предложенной парной системе (ЦОД + ГРС (рисунок 3) при выборе устройства для редуцирования давления газа на ГРС до заданных значений выбор между детандером и турбодетандером отдается турбодетандеру, включающему турбинный механизм и получившему большее применение, чем детандер с поршневым механизмом⁷. При применении детандер-генераторного агрегата (ДГА) в составе ГРС в качестве рабочего тела выступает природный газ.

Основными составными частями ДГА являются следующие технологические устройства: турбодетандер, генератор электроэнергии, теплообменник подогрева газа (в зависимости от применяемых схем: до/после, после детандера, последовательное чередование устройств), запорная и регулирующая арматура на газовых трубах, приборы автоматики и контрольно-измерительные приборы.

Принцип работы ДГА состоит в следующем (рисунок 4): транспортируемый в газопроводе 1 природный газ (либо его часть – при условии, когда ДГА служит дополнительным, резервным к основному дросселирующему устройству ГРС 2) подается в теплообменник предварительного подогрева 6 (при условии его применения в схеме и необходимости в подогреве газа перед ДГА), после газ подается на турбодетандер 10.

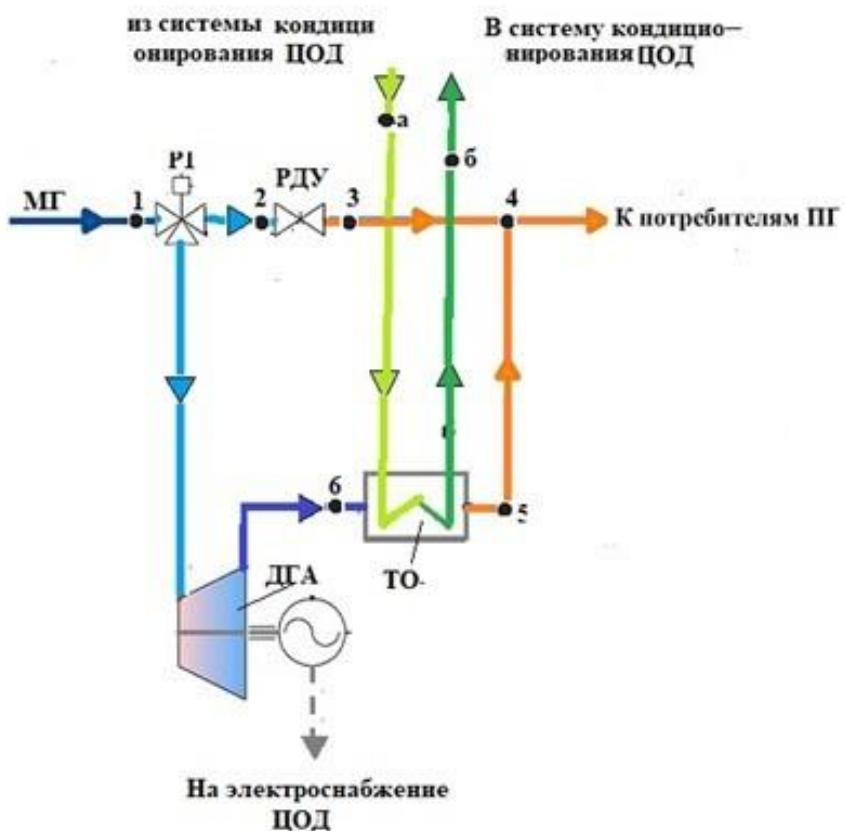
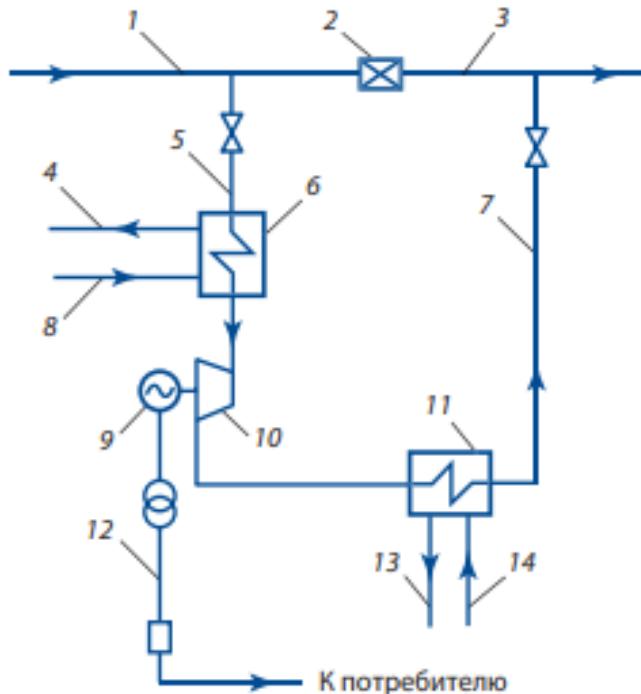


Рисунок 3. – Модель ГРС+ЦОД

Принцип работы турбодетандера аналогичен принципу действия газовой, либо паровой турбины. В турбодетандере энергия транспортируемого природного газа без сжигания органических видов топлива (т.е. экологически чистым способом) преобразуется в механическую энергию вращения ротора турбины. Результатом прохождения газа через лопатки турбины турбодетандера служит понижение его давления до заданных параметров и в качестве побочного продукта данного технологического процесса происходит понижение температуры транспортируемого природного газа.

⁷ Давыдов О.А. Методика оценки эффективности системы энергоснабжения газораспределительной станции с использованием возобновляемых видов энергии // дис. ... канд. техн. наук: 2.4.5. – СПБПУ Петра Великого, 2024. – 178 л. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/r25-66.pdf/download/r25-66.pdf>.



1 – газопровод высокого давления; 2 – стационарное дросселирующее устройство (при условии, когда ДГА служит дополнительным, резервным оборудованием); 3 – газопровод низкого давления; 4, 6, 8 – узел предподогрева газа перед турбодетандером (при наличии); 5 – газопровод подвода газа к турбодетандеру; 7 – газопровод отвода газа низкого давления от турбодетандера; 9 – электрогенератор, спаренный с турбодетандером; 10 – турбодетандер; 11, 13, 14 – подогрев газа после турбодетандера (utiлизации холода); 12 – линия подачи электроэнергии потребителю, выработанной на электрогенераторе

Рисунок 4. – Принципиальная схема применения ДГА в составе оборудования ГРС

Полученный в турбодетандере холод является вторичным энергетическим ресурсом (ВЭР), требующим утилизации. Выработанная турбиной механическая энергия передается по физически связанному с ней ротору на электрогенератор 9. Ток, вызываемый генератором, передается потребителю по сети 12. В теплообменнике 11 происходит подогрев природного газа после его расширения до требуемой по техническим условиям температуры. После турбодетандера 10 и следующего за ним теплообменника 11 газ передается по газопроводу 7 в газопровод низкого давления 3 и поставляется конечному потребителю.

Альтернативным рабочим телом для турбодетандера может служить воздух, чье давление предварительно повышается с помощью компрессоров. Суть применения турбодетандера в составе вентиляционных установок заключается в возможности получения охлажденного воздуха для промышленных объектов без использования холодильного оборудования с хладагентами. В данном случае для воздушно-холодильной установки (ВХУ), аналогично рассмотренной схеме на ГРС, предпочтение отдается турбодетандеру.

Данное техническое решение обладает рядом преимуществ:

1) воздух, используемый в качестве рабочего тела, не требует дополнительных затрат на приобретение в отличие от хладагента для холодильного оборудования. Используется либо атмосферный воздух для воздушно-холодильной установки, либо подается через вентиляционные сети объекта;

2) в сравнении с системами охлаждения воздуха, использующими аммиак, широко применяемыми на промышленных объектах, у рассматриваемого решения существенно снижены риски несчастных случаев на производстве в результате аварии в системе охлаждения;

3) воздушно-холодильные установки могут быть свободно размещены в практически любой точке промышленного предприятия, без обустройства дополнительных специальных коммуникаций (помимо места забора/подачи воздуха);

4) капиталовложения в подобную систему ниже, чем в системы специального холодильного оборудования.

Заключение. При использовании парной системы ЦОД+ГРС имеет место утилизация холода, как вторичного энергетического ресурса от установок ДГА, что способствует закрытию потребности в холоде объектов ЦОД. На функционирование внутренних климатических систем ЦОД может уходить до 35% от общего потребления электроэнергии. Учитывая, что на работу основного вычислительного оборудования центров уходит до 50% энергопотребления, доля потребления электроэнергии для обеспечения микроклимата центров занимает весомую часть в общем потреблении электроэнергии.

Возведение и эксплуатация парной системы из объектов ЦОД и ГРС является взаимовыгодным решением для обеих отраслей экономики. Отрасль газоснабжения получает возможность широкого внедрения экологического решения на объектах ГРС, решая вопрос с утилизацией вторичного холода от установок ДГА. Сектор цифровой экономики получает существенную экономию на климатическом оборудовании вычислительных центров, поддержку роста рынка ЦОДов и возможности для большего масштабирования своих проектов.

ЛИТЕРАТУРА

- Яковлев И.В., Авдокунин Н.В. Эффективность применения сбросного тепла центров обработки данных // Теплоэнергетика. – 2023. – № 10. – С. 55–64.
- Quirk D., Davidson T., Schmidt R. Руководство по тепловому режиму в центрах обработки данных // АВОК. – 2022. – № 7. – С. 52–56.
- Утилизация теплоты центров обработки данных с использованием тепловых насосов / М.Ю. Егоров, Э.С. Жиляев, А.О. Кривицкий и др. // СОК. – 2025. – № 9. – С. 38–44.
- Смолкс М. Повторное использование тепла ЦОДов // ИКС. – 2024. – № 2. – С. 44–51.
- Dmitriev Y. Analysis of cooling system efficiency // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7, № 4. – P. 49–59.
- Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 961–968.
- Эффективность работы детандер-генераторных агрегатов с предварительным нагревом газа / Э.К. Кан, А.А. Мукольянц, Б.Б. Норматов и др. // UNIVERSUM. Технические науки: электрон. научн. журн. – 2024. – № 11(128). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18693>.
- Чернов А.Н., Агапитов Е.Б. Методика размещения кондиционеров в центрах обработки данных для обеспечения эффективного охлаждения ИТ-оборудования // Научный вестник ВГАСУ. – 2013. – № 4(32). – С. 41–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20789031&ysclid=mivxqfx9ig806370549> (дата обращения 20.10.2025).
- Численное моделирование теплопередачи теплообменника в серверном оборудовании / Н.С. Пономарев, Ю.А. Дмитриев, В.К. Аверьянов и др. // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 3. – С. 29–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.03.29-33.
- Averyanov V., Vasiliev V., Ulyasheva V. Selection of turbulence models in case of numerical simulation of heat-, air- and mass exchange processes // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 44. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400005.

REFERENCES

- Yakovlev, I.V., & Avdokunin, N.V. (2023). E`ffektivnost` primeneniya sbrosnogo tepla centrov obrabotki danny`x [The Effectiveness of Using Data Center Waste Heat]. *Teploe`nergetika [Thermal Power Engineering]*, (10), 55–64. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Quirk, D., Davidson, T. & Schmidt, R. (2022). Rukovodstvo po teplovomu rezhimu v centrax obrabotki danny` [Guide to Thermal Conditions in Data Centers]. *ABOK [AVOK]*, (7), 52–56. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Egorov, M.Yu., Zhilyaev, E.S., Krivitsky, A.O., Demidova, N.B., Kovalenko, I.I., Proshkin, S.S., ... Shcherbatov, I.A. (2025). Utilizaciya teploty` centrov obrabotki danny`x s ispol`zovaniem teplovoy`x nasosov [Utilization of the heat of data processing centers using heat pumps]. *SOK [SOK]*, (9), 38-44. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Smolks, M. (2024). Povtornoje ispol`zovanie tepla CzODov [Reusing Data Center Heat]. *IKS [IKS]*, (2), 44–51. (In Russ.).
- Dmitriev, Y. (2022). Analysis of cooling system efficiency. *Architecture and Engineering*, 7(4), 49–59.
- Klimenko, A.V., Agababov, V.S., Borisova, P.N., & Petin, S.N. (2017). Termodinamicheskaya e`ffektivnost` ispol`zovaniya detander-generatorny`x agregatov na stanciyakh texnologicheskogo umen`sheniya davleniya transportiruemogo prirodnogo gaza [Thermodynamic efficiency of using expander-generator units at stations for technological pressure reduction of transported natural gas]. *Teplofizika i ae`romexanika [Thermal Physics and Aeromechanics]*, 24(6), 961–968. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Kan, E.K., Mukol`yancz, A.A., Normatov, B.B., & Abduraimov, A.S. (2024). E`ffektivnost` raboty` detander-generatorny`x agregatov s predvaritel`ny`m nagrevom gaza [Efficiency of gas-preheated expander-generator units]. *UNIVERSUM. Texnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. [UNIVERSUM. Technical sciences: electron. scientific journal]*, 11(128). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18693>. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Chernov, A.N., & Agapitov, E.B. (2013). Metodika razmeshheniya kondicionerov v uentrax obrabotki danny`x dlya obespecheniya e`ffektivnogo ovlazhdeniya IT-oborudovaniya [Methodology for placing air conditioners in data processing centers to ensure efficient cooling of IT equipment]. *Nauchny`j vestnik VGASU [Scientific Bulletin of VGASU]*, (4), 41–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20789031&ysclid=mivxqfx9ig806370549>. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Ponomarev, N.S., Dmitriev, Y.A., Aver`yanov, V.K., & Tsygankov, A.V. (2024). Chislennoe modelirovanie teploperedachi teploobmennika v servernom oborudovanii [Numerical modeling of heat transfer in a heat exchanger in server equipment]. *Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo [Industrial and civil engineering]*, (3), 29–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.03.29-33. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Averyanov, V., Vasiliev, V., & Ulyasheva, V. (2018). Selection of turbulence models in case of numerical simulation of heat-, air- and mass exchange processes. *E3S Web of Conferences*, 44. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400005.

Поступила 15.12.2025

UTILIZATION OF DATA CENTER HEAT FOR GAS SUPPLY FACILITIES

V. ULYASHEVA, A. MARTYANOVA, K. REZNIK
(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering)

The reliability of the gas supply system for various types of facilities depends significantly on the reliable operation of all elements of the gas distribution units located in gas distribution stations (GDS), which are primarily designed to reduce the pressure (reduction) to the required level, depending on the purpose of the GDS. Reduction requires significant energy consumption, including the use of thermal energy to heat the gas. Currently, significant computational resources are required, which are provided by data processing centers (DPCs) or data centers, which are significant sources of thermal emissions into the atmosphere. The results of numerical modeling of the data center's thermal regime confirm the high values of indoor air temperature. Various options for using the data center's waste heat are known. This paper proposes the utilization of the data center's heat for use in the GDS process using expander-generator units.

Keywords: *gas supply, gas distribution station (GDS), data processing center (DPC), heat recovery, expander-generator unit (EGU), turboexpander.*

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ДОЛГОСРОЧНУЮ РАБОТУ СТЕНОВЫХ БЛОКОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ХЛОПЧАТНИКА

канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ¹⁾, А.Н. ЯГУБКИН²⁾,

канд. техн. наук, доц. Н.В. БАКАТОВИЧ³⁾, PhD д. ВЕН⁴⁾

(¹⁻³) Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

⁴⁾ School of Urban Construction, Zhejiang Shuren University, Китайская Народная Республика)

В статье показана возможность получения теплоизоляционно-конструкционных материалов на основе дробленых стеблей хлопчатника. Приведены материалы и методы исследований, граничные условия исследований, основные факторы, определяющие долговечную эффективную работу стеновых блоков из отходов хлопчатника. Изучены монофракционные составы дробленых стеблей хлопчатника и полифракционные композиции структурообразующего материала. Исследована кинетика изменения влажности полифракционного состава структурообразующего материала для установления пригодности к применению в стеновых блоках. Подобран фракционный состав, позволяющий формировать максимально плотную структуру из дроблённых стеблей хлопчатника. Определены основные физические характеристики конструкционно-теплоизоляционных блоков из стеблей хлопчатника: прочность при сжатии, средняя плотность и коэффициент теплопроводности.

Ключевые слова: отходы хлопчатника, стебель хлопчатника, фракционный состав, цементное вяжущее, долговечность, коэффициент теплопроводности, сорбция, влажность, конструкционно-теплоизоляционный материал.

Введение. Постоянно возрастающая численность населения увеличивает потребность в одежде, что влечёт за собой рост объёмов производства ткани. В результате происходит повышение объёмов сбора хлопка, и как следствие увеличивается количество отходов хлопчатника. Основные объёмы производства хлопка приходятся на страны Центральной и Средней Азии, для которых важной проблемой является эффективное использование получаемых отходов при производстве хлопка. По этой причине ведутся исследования, связанные с применением волокон и стеблей хлопчатника [1–3], улучшением механических и теплоизоляционных свойств каучука [4], разработкой составов для 3D печати [5], медицинским протезированием [6], обнаружением аммиака [7], производством сорбентов [8].

Перспективной отраслью, эффективно перерабатывающей стебли хлопчатника, можно считать строительство зданий. Хлопковые отходы, возможно использовать для производства изоляционных и стеновых материалов, на что указывает ряд научных исследований [9–14]. Предлагается для снижения энергопотребления зданий использовать вакуумные теплоизоляционные панели из отходов хлопка с коэффициентом теплопроводности 0,02–0,04 Вт/(м·°C) [10; 12]. Для получения высокоэффективных тепло- и звукоизоляционных панелей из гибридных биокомпозитов используют эпоксидные смолы и хлопковые отходы. При этом полученные результаты в ходе исследований свидетельствуют о том, что панели обладают значительным термическим сопротивлением равным 0,22141 (м²·°C)/Вт [11]. Конструкционно-теплоизоляционные биокомпозитные панели из стеблей хлопчатника с максимальным сопротивлением лучистому теплу и коэффициентом теплопроводности 0,063 Вт/(м·°C) разработаны в Бангладеш [9].

Куст хлопчатника представляет собой одревесневшее растение, поэтому традиционно в сельской местности стебли используют в качестве местного топлива, для получения золы и как корм для животных [15–17]. Однако с учётом достаточно высокой прочности на сжатие наиболее рациональным является использование стеблей хлопчатника в качестве заполнителя в смеси с цементом для возведения стен зданий аналогично использованию древесных волокон и древесной щепы для стеновых блоков [18; 19]. Таким образом, применение дробленого фракционированного стебля хлопчатника для получения долговечных эффективных стеновых материалов с повышенными теплоизоляционными свойствами, обеспечивающих экологическую безопасность для человека и не содержащих в составах органических, синтетических связующих, а также полимерных добавок, будет способствовать максимально эффективному способу утилизации растительного отхода.

Материалы и методы исследований. Для проведения исследований конструкционно-теплоизоляционных блоков использовали стебли хлопчатника, произрастающего на полях сельскохозяйственных предприятий Китая и Туркменистана. Хлопчатник представляет собой одревесневший куст высотой до 1,8 м. Стебель хлопчатника состоит на 37,5–40% из целлюлозы, на 21,3–24,7% из лигнина, на 18,2% из пентозанов и на 3,1–5,8% из золы. Оставшиеся на поле после уборки хлопка стебли подбирают механизировано или вручную. Диаметр стебля составляет от 5 мм до 20 мм, длина стебля от 300 мм до 1800 мм.

При изготовлении образцов стеновых материалов в качестве вяжущего применяли портландцемент марки EN 197-1 – CEM I 42,5R ОАО «Кричевцементношифер». Требования к портландцементу регламентируются ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»¹.

В исследовательской работе стебель хлопчатника (рисунок 1, а) использовали в качестве структурообразующего материала для получения образцов конструкционно-теплоизоляционных стеновых блоков. На стадии подготовки структурообразующего материала стебель хлопчатника дробился на фрагменты длиной 10–30 мм (рисунок 1, б).



Рисунок 1. – Отходы хлопчатника

Образцы стеновых блоков на основе дробленых стеблей хлопчатника формовали в определенной последовательности. Изначально дробленые стебли хлопчатника обрабатывали известковым молоком (соотношение гашеной извести и воды 1:10) и выдерживали на протяжении 5–7 минут. Затем стебли хлопчатника тщательно перемешивали с предварительно подготовленным цементным тестом (водоцементное отношение составляет 0,5). Расход основных компонентов на 1 м³: стебли хлопчатника 252 кг, цемент 350 кг. Полученную композиционную смесь формировали под давлением 1,2–2,0 МПа и выдерживали в форме 24 часа. Образец извлекали из формы и хранили при температуре 20±2 °C и относительной влажности воздуха 60–70%. В возрасте 28 суток образцы высушивали до постоянной массы и проводили испытания.

Физико-механические показатели образцов стеновых блоков – плотность, прочность при сжатии – определяли в соответствии с ГОСТ 19222 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия»² на образцах-кубах с размером ребра 150 мм.

Материалы и методика исследований подробно изложены в работах [8–10].

Пустотность структурообразующего материала из дробленых стеблей хлопчатника определяли по ГОСТ 8269.0 и визуально. Для визуальной оценки пустотности использовали форму из прозрачного пластика размером 150×150×150 мм. Фракционированный структурообразующий материал засыпали в форму без уплотнения и визуально изучали сформированную структуру из дробленых стеблей хлопчатника.

Границные условия исследования связаны в основном с погрешностями приборов и оборудования, а также с вариацией при определении средней плотности. При этом погрешность весов лабораторных марки ВК-300 составила ±0,015 г, для весов МТ 15 В1ЖА равнялась ±2 г, штангенциркуль цифровой ШЦЦ-І имел

¹ ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. – Введ. 01.03.2021. – М.: НО «СОЮЗЦЕМЕНТ», 2021. – 28 с.

² ГОСТ 19222-84. Арболит и изделия из него. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1985. – М.: Научно-исследовательский институт железобетона Госстроя СССР, 1985. – 24 с.

погрешность $\pm 0,03$ мм, погрешность прибора ИТП-МГ4 «250» соответствовала $\pm 5\%$. Стабильность температуры сушильного шкафа SNOL 60/300 по данным производителя не превышала $\pm 1^\circ\text{C}$. При определении средней плотности образцов и блоков коэффициент вариации равнялся 10%.

Основная часть. На первом этапе ставилась задача подобрать оптимальный фракционный состав структурообразующего материала, позволяющий формировать максимально плотную структуру из дроблённых стеблей хлопчатника. По длине нарезки дроблённые стебли разделили на 3 фракции. Дроблённые стебли в виде цилиндро-мелкой фракции имели длину не более 10 мм. Для средней фракции дробили стебли на цилиндры длиной 15–20 мм, а для крупной фракции длина цилиндров составила 25–30 мм. Диаметр стеблей изменялся в пределах 4–8 мм для всех фракций.

Сначала исследовали монофракционные составы дробленных стеблей. При заполнении формы-куба крупной фракцией пустотность составила 37%. При этом формировался связанный каркас с разноориентированным расположением частиц из стеблей. Объем пустого пространства в форме четко просматривался. Исследования пустотности средней фракции позволило установить, что показатель снизился относительно значения крупной фракции на 30% и составил 26%. Разноориентированность и связанность частиц в каркасе структурообразующего материала сохранилась. Для мелкой фракции пустотность не превысила 10%, но, несмотря на то, что сформированная структура имела достаточно плотное строение, визуально фиксировалось отсутствие связности между частицами и большинство частиц имели горизонтальную ориентацию.

На следующем этапе проводили изучение полифракционных композиций структурообразующего материала. Варьировали введение каждой фракции в общий объем в количестве 10–50%. В основном показатели пустотности композиций находились в пределах 18–35%. Минимальных показателей пустотности 10% удалось достичь при равном соотношении всех фракций, т.е. по 33,3%. Необходимо отметить, что связность структуры каркаса сохранилась. Таким образом, в результате подбора оптимального соотношения фракций в композиции структурообразующего материала пустотность каркаса снизилась на 71% относительно показателя крупной фракции.

После определения размеров и соотношений фракций исследовали кинетику изменения влажности полифракционного состава структурообразующего материала для установления пригодности к применению в стеновых блоках. Полифракционный структурообразующий материал выдерживали в камере при относительной влажности воздуха 97% (рисунок 2). Измельчённые стебли хлопчатника до начала испытаний приведены на рисунке 3.

Влажность дробленых стеблей составила 6% (сутки после начала эксперимента). Через 10 суток испытаний влажность дробленых стеблей достигла 18%. В возрасте 20 суток влажность возросла на 17% относительно показателя за 10 суток испытаний и составила 21%.

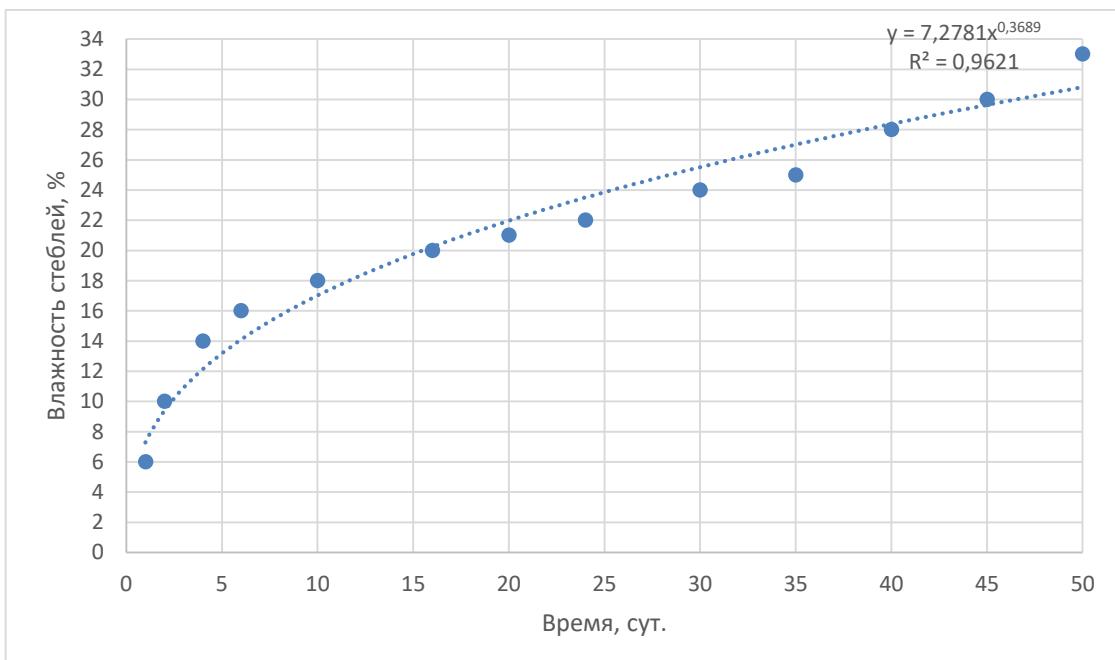


Рисунок 2. – Влажность заполнителя из дробленного хлопчатника при выдерживании в камере при относительной влажности воздуха 97% (со степенной линией тренда)

Установлено, что на 40 сутки влажность увеличилась только на 7% и достигла 28%. Максимальная влажность дроблённых стеблей равна 33% и зафиксирована на 50 сутки после начала испытаний. Таким образом, за последние 30 суток испытаний прирост влажности составил только 12%. Грибок появляется на 106 сутки после начала эксперимента (рисунок 4).



Рисунок 3. – Стебли из хлопчатника перед экспериментом



Рисунок 4. – Появление грибка на стеблях хлопчатника

Полученные результаты сопоставимы с результатами исследований в работе [20], где приведены данные по аналогичным исследованиям соломы и костры с последующим успешным применением в стеновых блоках на цементном вяжущем. По результатам исследований дробленый хлопчатник можно отнести к материалам, стойким к загниванию при нахождении продолжительное время во влажных условиях.

После определения оптимального фракционного состава структурообразующего материала из хлопчатника, расходов компонентов композиционного стенового материала, плотности и прочности при сжатии образцов изучали тепло- и гидрофизические параметры экспериментальных составов. Фотографии образцов-плит на основе жидкого стекла с дробленым хлопчатником и цемента с дробленым хлопчатником для испытаний на теплопроводность показаны на рисунках 5, 6 соответственно.



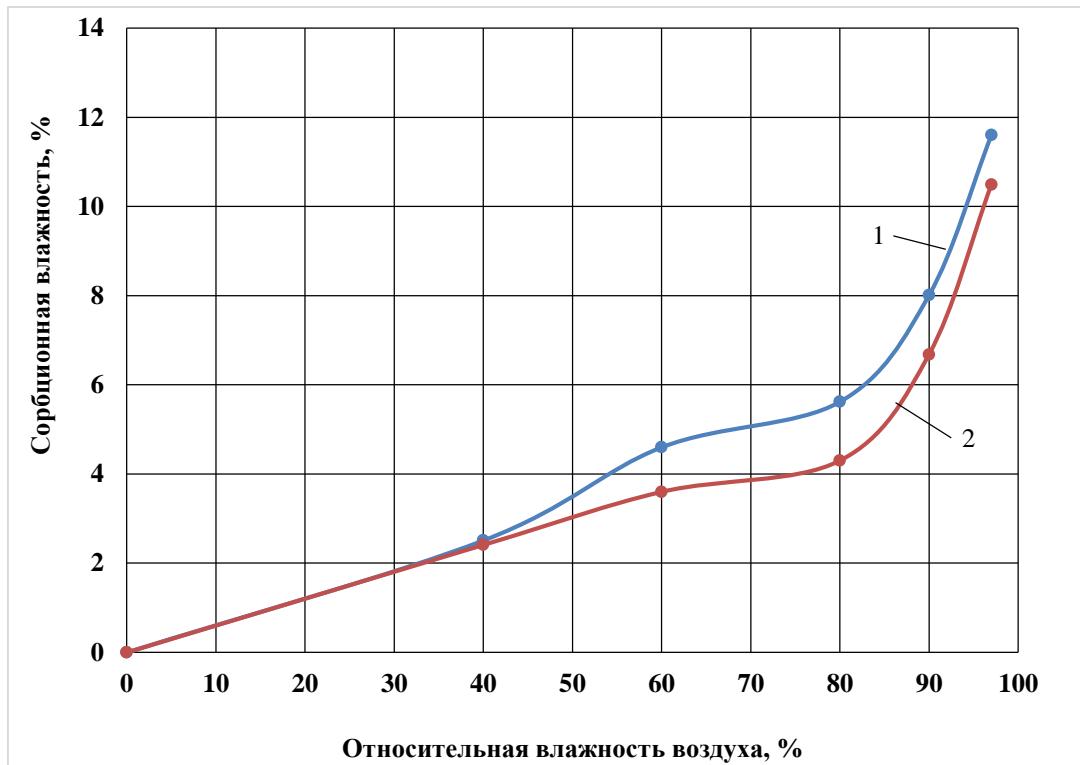
Рисунок 5. – Образец-плита на основе жидкого стекла и дробленного хлопчатника



Рисунок 6. – Образец-плита на основе цемента и дробленного хлопчатника

Необходимо отметить, что полученные показатели прочности, плотности, теплопроводности образцов на основе цемента и дробленого хлопчатника имеют значения, близкие к характеристикам арболита на основе древесной щепы [21].

В процессе эксплуатации здания могут происходить существенные изменения параметров конструкционно-теплоизоляционных стеновых материалов и в первую очередь теплопроводности. Изотермы сорбции водяного пара образцов-плит приведены на рисунке 7. Состав костросоломенной плиты приведён в работе [22].



1 – образец-плита из дробленого хлопчатника; 2 – образец-плита из соломы и костры льна

Рисунок 7. – Изотермы сорбции водяного пара

Выдержка образцов при относительной влажности воздуха 60% в эксикаторе показала, что сорбционная влажность образца стенового материала состава 2 равняется 3,8%, что на 9% меньше, чем у образца состава 1. При относительной влажности воздуха 80% в эксикаторе значение показателя сорбционной влажности образца состава 1 равнялось 5,8%, что больше на 32%, чем у образца состава 2. Выдержка образцов при относительной влажности воздуха 90% в эксикаторе показала, что сорбционная влажность образца стенового материала состава 2 равна 6,6%, что на 20% меньше, чем у образца состава 1. При относительной влажности воздуха 97% в эксикаторе значение показателя сорбционной влажности образца состава 1 равнялось 11,7%, что меньше на 11%, чем у образца состава 2.

В таблице 2 приведены результаты эксперимента по определению влияния показателя влажности на теплопроводность образцов-плит из стеблей хлопчатника и цемента.

Таблица 2. – Определение влияния показателя влажности на теплопроводность образцов-плит

№ образцов	Время выдерживания образца в камере, сутки	Показатели образца		
		плотность, кг/м ³	влажность, %	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
1	0	602	0	0,122
2	2	615	2,2	0,127
3	5	629	4,5	0,132
4	10	642	6,6	0,138
5	30	656	9,0	0,146
6	50	667	10,8	0,152
7	70	675	12,1	0,156

Результаты испытаний показали, что увеличение влажности образца до 12% приводит к росту коэффициента теплопроводности на 28% по сравнению с абсолютно сухим образцом, что должно учитываться при выполнении теплотехнического расчёта.

Заключение. Для стеновых блоков определяющим фактором долговечной эффективной работы является формирование прочной структуры из фракционированных дробленых стеблей хлопчатника.

При относительной влажности воздуха 97% в эксикаторе значение показателя сорбционной влажности образца на основе дроблённого хлопчатника и цемента равнялось 11,7%, что меньше на 11%, чем у образца на основе соломы и костры льна.

Результаты испытаний показали, что увеличение влажности образца на основе дроблённого хлопчатника и цемента до 12% приводит к росту коэффициента теплопроводности на 28% по сравнению с абсолютно сухим образцом, что должно учитываться при выполнении теплотехнического расчёта.

Стеновые блоки на основе стеблей дробленного хлопчатника рекомендуется использовать для возведения наружных и внутренних стен домов высотой 1–2 этажа с устройством легких перекрытий по деревянным балкам и деревянных стропильных систем.

В дальнейших исследованиях предполагается уделить основное внимание разработке составов на основе дробленного хлопчатника с изучением комплекса характеристик, включая температурно-влажностные режимы твердения составов, биостойкость (стойкость к появлению грибов), долговечность, испытания в климатической камере с определением плотностей теплового потока, коэффициента теплопроводности и влажности образцов, проведение натурных испытаний в условиях эксплуатируемых зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Influence of heat treatment and water absorption on mechanical properties of cotton-glass fiber reinforced epoxy hybrid composites: an eco-friendly approach for industrial materials / Silvina Siddika Shifa, Md Mehedi Hasan Kanok, Mohammad Salman Haque et al. // Hybrid Advances. – 2024. – Vol. 5. DOI: 10.1016/j.hyadv.2024.100181.
2. Thermal properties and decomposition products of modified cotton fibers by TGA, DSC, and Py-GC/MS / Mattia Isola, Giovanna Colucci, Aleandro Diana et al. // Polymer Degradation and Stability. – 2024. – Vol. 228. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110937.
3. Research progresses of fibers in asphalt and cement materials: a review / Jing Li, Ling Yang, Lu He et al. // Journal of Road Engineering. – 2023. – Vol. 3, Iss. 1. DOI: 10.1016/j.jreng.2022.09.002.
4. Influence of carbon black and cotton fiber on the mechanical and thermal properties of natural rubber composites: a statistical optimization using Central composite design / Sumit Kumar, Sohan Lal, Sanjiv Arora et al. // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. – 2025.
5. Development and 3D printing of PLA bio-composites reinforced with short yucca fibers and enhanced thermal and dynamic mechanical performance / Mohamed Amine Kacem, Moussa Guebailia, Mohammadreza Lalegani Dezaki et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2025. – Vol. 36. – P. 1243–1258. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.03.184.
6. Jawad K. Oleowi, Qahtan A. Hamad, Noor K. Faheed. Experimental, Theoretical, and Numerical Analysis of Laminated Composite Prosthetic Socket Reinforced with Flax and Cotton Fibers // Biotribology. – 2023. – Vol. 35–36. DOI: 10.1016/j.biorti.2023.100244.
7. Ghadah M. Al-Senani, Salhah D. Al-Qahtani. Preparation of biomolecular anthocyanin-immobilized plasma-cured nonwoven fibers from pomegranate (*Punica granatum L.*) and recycled cotton waste for detection of ammonia // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 460.
8. Modifier-free sol-gel preparation of cotton fiber@SiO₂ superhydrophobic fabric for oil/water separation, / Tao Wen, Jianhao Lin, Zhiming Jiang et al. // Microchemical Journal. – 2024. – Vol. 202. DOI: 10.1016/j.microc.2024.110808.
9. Mechanically robust and thermally insulating natural cotton fiber-reinforced biocomposite panels for structural applications / M. Abu Darda, M.A. Rahman Bhuiyan, M. Ashnaim Bari et al. // RSC Advances. – 2025. – Vol. 15, Iss. 12. – P. 9534–9545. DOI: 10.1039/d5ra00213c.
10. Natural fibers as promising core materials of vacuum insulation panels / Rui Zhang, Zhenglai Shen, Bokyung Park et al. // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 453. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138890.
11. Desert cotton and areca nut husk fibre reinforced hybridized bio-benzoxazine/epoxy bio-composites: thermal, electrical and acoustic insulation applications / Harinei Srinivasan, Hariharan Arumugam, A. Anto Dilip et al. // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129870.
12. Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels prepared with recyclable fibrous cotton core / Ankang Kan, Xuexiang Zhang, Zhaofeng Chen et al. // International Journal of Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 187. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108176.
13. Thermal conductivity assessment of cotton fibers from apparel recycling for building insulation / Adriana Angelotti, Andrea Alongi, Andrea Augello et al. // Energy and Buildings. – 2024. – Vol. 324. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114866.
14. Rahman Bhuiyan M.A., Ashnaim Bari M., Abu Darda M. Thermal barrier performance of natural fiber-reinforced biocomposite panels with the reflective surface for conserving heat energy in buildings / Energy Conversion and Management: X. – 2025. – Vol. 26. DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.100926.
15. High efficiency electricity and gas cogeneration through direct carbon solid oxide fuel cell with cotton stalk biochar / Xiaofeng Gu, Xiaomin Yan, Mingyang Zhou et al. // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 226. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120471.
16. Investigation on formation mechanisms of ash and deposit from cotton stalk vibrating grate boiler combustion based on their characteristics / Fenghai Li, Bing Yu, Wei Zhao et al. // Fuel. – 2022. – Vol. 323. DOI: 10.2139/ssrn.4040985.
17. Solid state fermentation improves the utilization value of cotton stalk / Rui Hu, Duotong Wu, Xiurong Liang et al. // Industrial Crops and Products. – 2025. – Vol. 230.
18. Research on adaptability between crop-stalk fibers and cement / Guozhong Li, Yanzhen Yu, Jianquan Li et al. // Cement and Concrete Research. – 2004. – Vol. 34, Iss. 7. – P. 1081–1085. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.11.026.

19. Maximizing strength and durability in wood concrete (arbolite) via innovative additive control and consumption / A. Yagubkin, D.N. Shabanov, A.M. Niyakovskii et al. // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15. – P. 13365–13379. DOI: 10.1007/s13399-024-06071-6.
20. Должонок А.В., Бакатович А.А. Особенности изменения коэффициента теплопроводности стеновых блоков на растительных отходах в зависимости от влажности материала // Вестник Белгородского гос. техн. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 10. – С. 19–28. DOI: 10.34031/article_5db3379ba2f9e5.82013353.
21. Бозылев В.В., Ягубкин А.Н. Инновационный арболит с заданными свойствами // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О.Н. Лешкевич и др. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 96–112. DOI: 10.23746/2017-9-7.
22. Bakatovich A., Davydenko N., Gaspar F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste // Energy and Buildings. – 2018. – № 180. – P. 72–82. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.

REFERENCES

1. Silvina Siddika Shifa, Md Mehedi Hasan Kanok, Mohammad Salman Haque, Tipu Sultan, Kanij Fatema Pritha, Mubashira, Maruf Al Yeamin, Sudip Dey Dipta. Influence of heat treatment and water absorption on mechanical properties of cotton-glass fiber reinforced epoxy hybrid composites: an eco-friendly approach for industrial materials, *Hybrid Advances*, Volume 5, 2024. DOI: 10.1016/j.hybadv.2024.100181.
2. Mattia Isola, Giovanna Colucci, Aleandro Diana, Agusti Sin, Alberto Tonani, Valter Maurino. Thermal properties and decomposition products of modified cotton fibers by TGA, DSC, and Py-GC/MS, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 228, 2024. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110937.
3. Jing Li, Ling Yang, Lu He, Ruiwen Guo, Xinyu Li, Youchao Chen, Yaseen Muhammad, Yu Liu. Research progresses of fibers in asphalt and cement materials: a review, *Journal of Road Engineering*, Volume 3, Issue 1, 2023.
4. Sumit Kumar, Sohan Lal, Sanjiv Arora, Parvin Kumar, Shikha Rani, Anjali Verma, Anita Kumari. Influence of carbon black and cotton fiber on the mechanical and thermal properties of natural rubber composites: a statistical optimization using Central composite design, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2025.
5. Mohamed Amine Kacem, Moussa Guebailia, Mohammadreza Lalegani Dezaki, Said Abdi, Nassila Sabba, Ali Zolfagharian, Mahdi Bodaghi. Development and 3D printing of PLA bio-composites reinforced with short yucca fibers and enhanced thermal and dynamic mechanical performance, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 36, 2025, Pages 1243–1258. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.03.184.
6. Jawad K. Oleiwi, Qahtan A. Hamad, Noor K. Faheed. Experimental, Theoretical, and Numerical Analysis of Laminated Composite Prosthetic Socket Reinforced with Flax and Cotton Fibers, *Biotribology*, Volumes 35–36, 2023. DOI: 10.1016/j.biотri.2023.100244.
7. Ghadah M. Al-Senani, Salhah D. Al-Qahtani. Preparation of biomolecular anthocyanin-immobilized plasma-cured nonwoven fibers from pomegranate (*Punica granatum* L.) and recycled cotton waste for detection of ammonia, *Journal of Cleaner Production*, Volume 460, 2024.
8. Tao Wen, Jianhao Lin, Zhiming Jiang, Liyou Han, Wenbin Yang, Hanxian Chen, Xinxiang Zhang. Modifier-free sol-gel preparation of cotton fiber@SiO₂ superhydrophobic fabric for oil/water separation, *Microchemical Journal*, Volume 202, 2024. DOI: 10.1016/j.microc.2024.110808.
9. M. Abu Darda, M.A. Rahman Bhuiyan, M. Ashnaim Bari, Shafiqul Islam, M. Jakir Hossen. Mechanically robust and thermally insulating natural cotton fiber-reinforced biocomposite panels for structural applications, *RSC Advances*, Volume 15, Issue 12, 2025, Pages 9534–9545. DOI: 10.1039/d5ra00213c.
10. Rui Zhang, Zhenglai Shen, Bokyung Park, Tianli Feng, Antonio Aldykiewicz, André Desjarlais, Diana Hun, Som Shrestha. Natural fibers as promising core materials of vacuum insulation panels, *Construction and Building Materials*, Volume 453, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138890.
11. Harinei Srinivasan, Hariharan Arumugam, Anto Dilip A, Balaji Krishnasamy, Abdul Aleem M.I, Arun Murugesan, Alagar Muthukaruppan. Desert cotton and areca nut husk fibre reinforced hybridized bio-benzoxazine/epoxy bio-composites: Thermal, electrical and acoustic insulation applications, *Construction and Building Materials*, Volume 363, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129870.
12. Ankang Kan, Xuexiang Zhang, Zhaofeng Chen, Dan Cao. Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels prepared with recyclable fibrous cotton core, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 187, 2023. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108176.
13. Adriana Angelotti, Andrea Alongi, Andrea Augello, Alessandro Dama, Stefano De Antonellis, Antonino Ravidà, Michele Zinzi, Enrico De Angelis. Thermal conductivity assessment of cotton fibers from apparel recycling for building insulation, *Energy and Buildings*, Volume 324, 2024. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114866.
14. Rahman Bhuiyan M.A., Ashnaim Bari M., Abu Darda M. Thermal barrier performance of natural fiber-reinforced biocomposite panels with the reflective surface for conserving heat energy in buildings, *Energy Conversion and Management: X*, Volume 26, 2025. DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.100926.
15. Xiaofeng Gu, Xiaomin Yan, Mingyang Zhou, Gaochang Zou, Zidai Fan, Jiang Liu. High efficiency electricity and gas cogeneration through direct carbon solid oxide fuel cell with cotton stalk biochar, *Renewable Energy*, Volume 226, 2024. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120471.
16. Fenghai Li, Bing Yu, Wei Zhao, Juan Wang, Meiling Xu, Hongli Fan, Jiejie Huang, Yitian Fang. Investigation on formation mechanisms of ash and deposit from cotton stalk vibrating grate boiler combustion based on their characteristics, *Fuel*, Volume 323, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4040985.
17. Rui Hu, Duotong Wu, Xiurong Liang, Zhisheng Wang, Huawei Zou, Fali Wu, Hui Li, Yahui Jiang, Quanhui Peng, Jianxin Xiao, Hongbo Li, Zhenyong Zhou. Solid state fermentation improves the utilization value of cotton stalk, *Industrial Crops and Products*, Volume 230, 2025.

18. Guozhong Li, Yanzhen Yu, Jianquan Li, Changchun Li, Yingzi Wang. Research on adaptability between crop-stalk fibers and cement, *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 7, 2004, Pages 1081–1085. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.11.026.
19. Yagubkin A., Shabanov D.N., Niyakovskii A.M., Romanovskii V.I. Maximizing strength and durability in wood concrete (arbolite) via innovative additive control and consumption. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Volume 15, 2025, Pages 13365–13379. DOI: 10.1007/s13399-024-06071-6.
20. Dolzhonok, A.V., & Bakatovich, A.A. (2019). Особенности изменения коэффициента теплопроводности стекловатных блоков на различных видах сырья в зависимости от влагоемкости материала. *Vestnik Belgorodskogo gos. tekhn. un-ta im. V.G. Shukhova*, 10, 19–28. DOI: 10.34031/article_5db3379ba2f9e5.82013353.
21. Bozylev, V.V., & Yagubkin, A.N. (2017). Innovatsionnyi arboli s zadannymi svoistvami. *Problemy sovremennoj betona i zhelezobetona*: sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS; redkol.: O.N. Leshkevich i dr. – Minsk. – Vyp. 9. – S. 96–112. DOI: 10.23746/2017-9-7.
22. Bakatovich, A., Davydenko, N., & Gaspar, F. (2018). Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. *Energy and Buildings*, 180, 72–82. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.

Поступила 05.12.2025

FACTORS DETERMINING THE LONG-TERM PERFORMANCE OF COTTON WASTE WALL BLOCKS

A. BAKATOVICH¹⁾, A. YAGUBKIN²⁾, N. BAKATOVICH³⁾, J. WEN⁴⁾

^(1), 2), 3) Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,

⁴⁾ School of Urban Construction, Zhejiang Shuren University, China)

This article demonstrates the feasibility of producing thermal insulation and structural materials using crushed cotton stalks. It presents the materials and methods used, limitations of the research, and key factors determining the long-term, efficient performance of wall blocks made from cotton waste. Single-fraction compositions of crushed cotton stalks and multi-fraction compositions of the structure-forming material were studied. The kinetics of moisture content changes in the multi-fraction composition of the structure-forming material was investigated to determine its suitability for use in wall blocks. A fractional composition was selected that allows for the formation of the densest possible structure from crushed cotton stalks. The physical properties of the structural and thermal insulation blocks made from cotton stalks were determined: compressive strength, average density, and thermal conductivity.

Keywords: cotton waste, cotton stem, fractional composition, cement binder, durability, thermal conductivity coefficient, sorption, moisture, structural and thermal insulation material.

**БУДЫНАК БЫЛОГА ДОМА АФІЦЭРАЎ У ПОЛАЦКУ:
ВЫНІКІ ДАСЛЕДАВАННЯЎ 2021–2024 ГАДОЎ**

P.A. ЗАБЕЛА

(ТАА «Навукова-праектны цэнтр «РЭСТАБІЛІС», Мінск)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6285-9003>

У артыкуле прадстаўлены вынікі навуковых даследаванняў, праведзеных у 2021–2024 гадах у межах распрацоўкі праектнай дакументацыі і рэалізацыі праектных рашэнняў па капитальным рамонце з мадэрнізацыяй будынка былога Дома афіцэраў у Полацку. Актуалізаваны звесткі пра гісторыю будаўніцтва аб’екта, прааналізаваны першапачатковыя праектныя рашэнні і вызначаны аналагі, створаныя паводле падобнага тыпавога праекта. Асобная ўвага надаецца пытанню аўтарства: на падставе аналізу архіўных матэрыялаў і кампаратыўнага методу выказаеца гіпотэза пра прычыненасць да праекта архітэктара Іосіфа Каракіса, Мікалая Гайгара і Владзіміра Навасадава. Прадстаўлены графічная рэканструкцыя першапачатковага колеравага рашэння фасадаў будынка. Вызначана гістарычна і архітэктурная значнасць помніка, а таксама акрэслены асноўныя праблемы яго аднаўлення і захавання. Вынікі даследавання спрыяюць больш глубокаму разуменню савецкай грамадской архітэктуры міжсавенінага перыяду і ствараюць аснову для далейшага планавання рэстаўрацыйных прац.

Ключавыя слова: Дом афіцэраў у Полацку, даследаванні, рэканструкцыя, рэстаўрацыя, Іосіф Каракіс, Мікалай Гайгара, гістарычны каларыт архітэктуры, савецкая архітэктура, неакласіцызм, постканструктывізм, ар-дэко.

Уводзіны. У 2024 годзе, пасля больш чым дзесяцігадовага перыяду заняпаду, будынак былога Дома афіцэраў у Полацку быў адноўлены і адкрыты для наведвання. У выніку праведзеных работ ён стаў адным з навучальных карпусоў Полацкага дзяржаўнага ўніверсітета.

Дом афіцэраў з’яўляецца значным аб’ектам у гісторыі горада, які мае не толькі сацыяльна-палітычнае, але і архітэктурна-гарадабудаўнічае значэнне. Нягледзячы на гэта, раней комплексныя даследаванні гэтага будынка не праводзіліся. Заставаліся невядомымі аўтарства праекта, першапачатковыя выгляд будынка, яго архітэктурныя і гістарычныя вартасці, а таксама ступень іхніх зменаў.

Правядзенне капитальнага рамонту з мадэрнізацыяй стала нагодай для ўсебаковага вывучэння будынка. У 2021–2024 гадах былі праведзены комплексныя навуковыя даследаванні, вынікі якіх сталі асновай для распрацоўкі праектнай дакumentацыі і аднаўлення аб’екта.

Даследаванні былі выкананыя спецыялістамі ТАА «Навукова-праектны цэнтр «РЭСТАБІЛІС» (навуковы кіраўнік Р.А. Забела), навукова-даследчага аддзела УК «Нацыянальны Полацкі гісторыка-культурны музей-запаведнік» (загадчык аддзела Ю.А. Аўчыннікава, вядучы навуковы супрацоўнік А.А. Салаўёў), ААТ «Белрэстаўрацыя» (галоўны спецыяліст Л.Л. Чарняўская). Праект распрацаваны ППУП «АнкорПраект» (ГІП С.Ю. Кулеш, ГАП Ю.У. Квачонак). Заказчыкам работ выступаў «Полацкі дзяржаўны ўніверсітэт імя Еўфрасінні Полацкай».

Асноўная частка. Архітэктурна-гістарычны анализ і гіпотэза пра аўтарства праекта. Дом афіцэраў у Полацку (Дом Чырвонай арміі) быў узведзены ў 1930-х гадах у кантэксце агульнасаюзнай праграмы будаўніцтва вайсковых і культурна-асветніцкіх устаноў для Чырвонай арміі. Падобныя аб’екты масава ўзводзіліся на ўсёй тэрыторыі СССР, асабліва ў гарадах з буйнымі вайсковыі гарнізонамі, выконваючыя функцыю культурных і ідэалагічных цэнтраў для ваеннаслужачых і гараджан.

Полацк меў стратэгічнае значэнне як транспартны вузел і памежны рэгіён СССР, што абудзіла размяшчэнне тут значных вайсковых фарміраванняў. Будаўніцтва Дома афіцэраў было ўключана ў больш шырокі працэс сацыялістычнай рэканструкцыі горада, якая ажыццяўлялася паводле Генеральнага плана 1936 года, распрацаванага майстэрнямі «Белдзяржпраекта»¹. Гэты аб’ект стаў адным з першых буйных грамадскіх будынкаў савецкага Полацка.

Дом Чырвонай арміі ў Полацку быў узведзены паводле тыпавога праекта клуба на 750 месцаў, распрацаванага Цэнтральным Ваенпраектам СКУ Рабоча-сялянскай Чырвонай арміі ў 1936 г. (аб’ект № 168/21)².

Дакладная дата будаўніцтва застасцца дыскусійнай. Паводле тлумачальнай запіскі да праекта аднаўлення, асноўныя работы былі выкананы ў 1936–1938 гг.³. Іншыя крыніцы сведчаць, што выдзяленне зямельнага ўчастка пад будаўніцтва адбылося толькі ў 1937 г., завяршэнне будаўнічых работ планавалася на 1939 г., а ўвод у эксплуатацыю адбыўся ў 1940 г.^{4,5}.

¹ Комплексные научные изыскания : Историческая справка / ООО «НПЦ «РЕСТАБИЛИС». – Минск, 2022. – Об. № 69.21.

² Архіў РУП «Інстытут Ваенпраект» – Аб’ект 25/1. Праект № 79351. Аднаўленне клуба на 750 чалавек. 1951–1953 гг.

³ Пашпарт матэрыяльнай гісторыка-культурнай каштоўнасці «Былы дом афіцэраў» Віцебская вобласць, Полацкі раён, г. Полацк, вул. Талстога, 8 / Праектны філіял ААТ «Белрэстаўрацыя» ; вык. Л.Л. Чарняўская. – М., 2024.

⁴ Отчет о физико-химических исследованиях / ООО «НПЦ «РЕСТАБИЛИС». – Минск, 2022. – Об. № 69.21.

⁵ Цэнтральны архіў Міністэрства абароны Рэспублікі Беларусь. – Ф. 3390. Воп. 82042. Спр/B. 1. Арк. 17.

Узведзены мураваны будынак мае П-падобную планіровачную схему і сіметрычную аб'ёмна-прасторавую кампазіцыю. Кампазіцыйным цэнтрам з'яўляецца дзесяцівосевы трохпавярховы аб'ём, цэнтральная частка якога акцэнтавана складаным у плане восьмікалонным порцікам. Па баках асноўнага аб'ёму перпендыкулярна далучаюцца два ніжэйшыя дзесяцівосевыя двухпавярховыя крылы, што фарміруюць дваровы курданёр.

Самым адметным кампазіцыйным элементам інтэр'еру з'яўляецца парадная лесвіца, размешчаная ўздоўж сцяны дваровага фасада ў завяршэнні ўваходнага вестыбюля. Яна ўзнімаецца ў два бакі ад выйсця ў двор, размешчанага па восі вестыбюля. Лесвіца вядзе на другі паверх да вестыбюля актавай залы, які аддзелены ад двухсветлавой прасторы лесвіцы каланадай.

Праведзены тыпалагічны аналіз аб'ектаў на тэрыторыі Беларусі і іншых краін былога СССР дазволіў выявіць чатыры будынкі, якія харктарызуюцца падобнымі аб'ёмна-прасторавымі, кампазіцыйнымі і інтэр'ернымі рашэннямі. Два з іх размешчаныя ў Беларусі (Полацк, Заслонава), два – ва Украіне (Вінніца, Стараканстанцінаў). Усе гэтыя аб'екты ўзведзены ў 1930-х гг. у якасці Дамоў Чырвонай арміі (малюнкі 1, 2).

Будынак у Заслонаве практична ідэнтычны полацкаму. Маюцца дробныя адрозненні ў архітэктурнай дэталізацыі і наяўнасці дадатковых праёмаў, пры агульных кампазіцыйных і стылістычных рашэннях фасадаў і інтэр'ераў.

Будынак у Стараканстанцінаве мае аналагічныя аб'ёмна-планіровачныя і агульныя стылістычныя рашэнні, але дэманструе іншае рашэнне архітэктурнага афармлення фасадаў. Таксама іншым чынам вырашаны порцік, які, у адрозненні ад беларускіх будынкаў, не мае дзвюх цэнтральных калон, але пры гэтым захоўвае агульнае пазнавальнае кампазіцыйнае падабенства з імі.

Будынак у Вінніцы адрозніваецца ад папярэдніх аб'ектаў не толькі архітэктурным аздабленнем фасадаў і прынцыпова іншым рашэннем порціка. Пры аналагічных асноўных планіровачных рашэннях, бакавыя крылы тут даўжэйшыя на чатыры восі, а актавая зала мае большую ўмяшчальнасць за кошт наяўнасці балкона.

Нягледзячы на лакальныя адrozненні, аналіз паказвае, што ўсе чатыры будынкі заснаваныя на адзінай праектнай схеме, а гэта дае падставы выказаць гіпотэзу пра іх агульнае паходжанне і магчымы адноўлекавае аўтарства.

Будынак у Вінніцы лічыцца аўтарскім праектам Іосіфа Юльевіча Каракіса – украінскага савецкага архітэктара [1, с. 110]. У першай палове 1930-х гг. Каракіс працаваў у майстэрнях Ваенпраекта [2]. У 1932 годзе ў яго прафесійнай дзейнасці адзначаліся асаблівія заслугі «ў справе праектавання культурна-побытавых будынкаў і збудавання Чырвонай арміі» [3]. Працуочы ў Ваенпраекце, ён прымаў удзел у распрацоўцы тыповых збудаванняў, прызначаных для патрэб арміі [3, с. 72–76]. Напрыклад, распрацаваны ім у 1932 годзе ў Маскве тыпавы праект Дома авіяцыі планаваўся да будаўніцтва ў 12 гарадах СССР [4].

Дом афіцэраў у Вінніцы быў узведзены ў 1934–1935 гг. і першапачаткова функцыянуваў як гарнізонны вайсковы клуб [1, с. 110]. Мяркуецца, што праект быў распрацаваны ў Ваенпраекце да 1934 г., калі Каракіс яшчэ працаваў у гэтай установе. Да следчыкі яго творчасці адзначаюць, што першапачаткова гэта быў тыпавы праект кінатэатра на 1000 месцаў, створаны для Вінніцы, Крывога Рога і Харкава, які атрымаў першую прэмію на Усесаюзным конкурсе [1, с. 110]. Пры аналізе рэалізаванага праекта ў Вінніцы, звяртае на сябе ўвагу нетыповая для кінатэатраў планіровачная структура: асобныя класы з рэкрэацыйнымі зонамі перад імі, размяшчэнне асноўнай залы на другім паверсе, а таксама дзве меншыя залы ў бакавых крылах. Магчыма, падчас будаўніцтва функцыянальнае прызначэнне будынка было зменена, а праект перапрацаваны. На той час такія змены ў працэсе рэалізацыі былі звычайнай практикай (напрыклад, сучасны Нацыянальны музей гісторыі Украіны першапачаткова праектаваўся Каракісам як мастацкая школа). Верагодна, гаворка ўсё ж ідзе пра выкарыстанне агульных вобразных рашэнняў аднаго тыповога праекта пры распрацоўцы іншага. На сённяшні дзень ані конкурсны праект кінатэатра, ані рэалізаваны праект Дома Чырвонай арміі ў Вінніцы не былі выяўлены.

У архітэктурнай перыёдцы савецкага часу выяўлены малюнак галоўнага фасада будынка, аналагічнага па агульных аб'ёмных рашэннях і архітэктурнай дэталізацыі Дому афіцэраў у Стараканстанцінаве (малюнак 3). Ён быў апубліканы ў «Архітэктурнай газеце» за 1938 год без прывязкі да мясцовасці і падпісаны аўтарствам маскоўскіх архітэктараў Мікалая Іванавіча Гайгарава і Уладзіміра Міхайлавіча Навасадава [5]. Абодва спецыялісты скончылі будучы МАРХІ (Маскоўскі архітэктурны інстытут) у 1931 і 1934 гадах адпаведна. З 1932 года Гайгарай працаваў у майстэрнях Ваенпраекта ў Маскве. Паводле асабістай справы архітэктара, у 1938 годзе яны сумесна з Навасадавым, сапраўды, распрацавалі тыповы праект Дома Чырвонай арміі з залай на 750 месцаў⁶.

На сённяшні дзень да канца застаецца невядомым, як ажыццяўлялася тэрытарыяльна размеркаванне распрацаваных рознымі майстэрнямі Ваенпраекта тыповых праектаў і іх адаптацыя для розных саюзных рэспублік. Пакуль што на тэрыторыі Беларусі невядома ніводнага будынка, пабудаванага па праекце І.Ю. Каракіса ці М.І. Гайгарава з У.М. Навасадавым. Вядомы шэраг даваенных тыповых праектаў дамоў і клубаў Чырвонай арміі, распрацаваных майстэрняй Ваенпраекта пад кіраўніцтвам І.У. Жалтоўскага, рэалізаваных у Мінску і іншых гарадах. Таксама вядома, што тыповыя праекты мусілі ўключаць не толькі планіровачныя рашэнні, але і інтэр'еры, і фасады будынкаў. Пры гэтым прадугледжвалася прымяненне «мясцовых архітэктурных і кампазіцыйных прынцыпаў нацыянальнай архітэктуры», а пры праектаванні інтэр'ераў мусілі выкарыстоўвацца «матывы народнай творчасці» [6]. Застаецца незразумелым, ці распрацоўваліся варыяцыі фасадаў для розных рэспублік тым жа аўтарскім калектывам або, прынамсі, пад кіраўніцтвам аднаго і таго ж спецыяліста.

Атрыманыя звесткі дазваляюць удакладніць паходжанне тыповога праекта, згодна з якім у канцы 1930-х гадоў быў узведзены Дом афіцэраў у Полацку. Існуюць падставы меркаваць, што ён быў распрацаваны на аснове

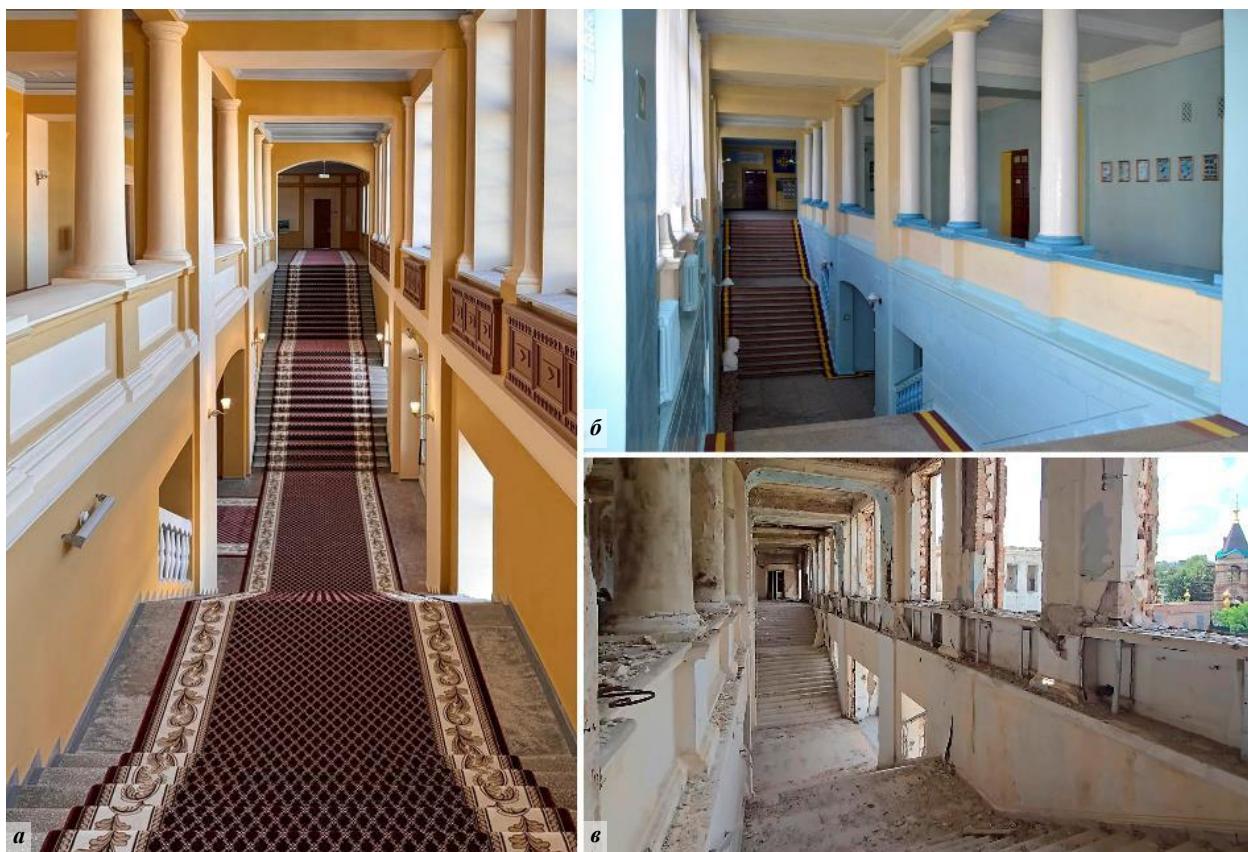
⁶ Российский государственный архив литературы и искусства (РГАЛИ). – Ф. 674. Оп. 9. Д. 8. – дело Н. И. Гайгарава.

планіровачных і аб'ёмна-прасторавых рашэнняў праекта пачатку 1930-х гадоў, аўтарам якога быў І.Ю. Каракіс (з залай на 1000 месцаў), але адаптаваны ў частцы фасаднага афармлення да рэгіянальных асаблівасцей і з улікам змяншэння ёмістасці залы да 750 месцаў. Аўтарамі адпаведнай варыяцыі тыповога праекта, верагодна, выступалі М.І. Гайгараў і У.М. Навасадаў.



*a – Полацк, Беларусь, 2024 г.; б – Заслонава, Беларусь, 2023 г., 1941 г.;
в – Стараканстанцінаў, Украіна, 2018 г., 2011 г.; г – Вінніца, Украіна, 2011 г., 2015 г.*

Малюнак 1. – Агульны выгляд Дамоў Чырвонай арміі, пабудаваных у 1930-х гг.



а – Полацк, Беларусь. 2024 г.; б – Стараканстанцінаў, Украіна, 2017 г.; в – Вінніца, Украіна, 2024 г.

Малюнак 2. – Агульны выгляд галоўнай лесвіцы



*Малюнак 3. – Праект Дома Чырвонай армії. Аўтары М.І. Гайгараў і У.М. Навасадаў.
Апублікованы ў дадатку да Архітэктурнай газеты № 11, 1938 г. [5]. Выявіў У.А. Садоўскі*

Пасляваеннае аднаўленне і функцыянованне. У 1944 г. будынак быў знішчаны пажарам, у выніку чаго засталася толькі мураваная каробка, якая паступова разбуралася пад уздзеяннем атмасферных фактараў. Часта сустракаецца інфармацыя, што ступень разбурэння складаў 70–75%⁷. Пры гэтым не ўдакладняеца харктар знішчэння і методыка вызначэння аб’ёмаў страт.

⁷ Гл. зноскау 1.

Згодна з тэхнічным заключэннем, складзеным у межах праекта паваенага аднаўлення, асноўныя нясучыя канструкцыі захаваліся ў здавальняючым стане. Не было выяўлена істотных змяненняў у цаглянай муроўцы сцен і слупоў. Міжпаверхавыя перакрыцці, якія складаліся з металічных двухтавровых бэлек і жалезабетонных пліт, заставаліся ў адносна добрым тэхнічным стане. У той жа час драўляныя канструкцыі перакрыццяў паддашша і кро-квеннай сістэмы былі цалкам знішчаны пажарам, а астатнія ацалелыя драўляныя канструкцыі былі раскрадзены.

Па выніках абледавання была зроблена выснова, што будынак можа быць аднаўлены пад гарнізонны Дом афіцэроў у ранейшым аб'ёме і вонкавым архітэктурным афармленні⁸.

Паводле некаторых звестак, будынак быў уведзены ў эксплуатацыю ўжо ў 1947 г.⁹. Аднак архіўная дакументацыя сведчыць, што праект аднаўлення быў распрацаваны ў 1951–1953 гг., а тэхнічнае абледаванне каробкі былога Дома Чырвонай арміі з мэтай магчымага аднаўлення было праведзена толькі 25.05.1951 г. Праектныя работы выконваліся ў Мінску ў інстытуце «Ваенпраект» у 1951–1953 гг.¹⁰. Можна меркаваць, што будаўнічыя работы былі завершаны ў сярэдзіне 1950-х гадоў.

Дом афіцэроў функцыянаваў да пачатку 1990-х гадоў, калі ваенныя ўстановы пакінулі будынак. У 1993 г. у ім размясціўся Полацкі філіял Беларускага камерцыйнага інстытута кіравання, а з пачатку 2000-х гадоў – Полацкая дзіцячая школа мастацтваў. У 2011 г. частка канструкцый будынка была прызнана аварыйнай, у выніку чаго будынак быў адселены і закансерваваны¹¹.

21 красавіка 2021 г. будынак былога Дома афіцэроў быў перададзены з раённай уласнасці ў рэспубліканскую і перайшоў на баланс УА «Полацкі дзяржаўны ўніверсітэт імя Еўфрасінні Полацкай». Гэта стала пачаткам правядзення комплексных даследаванняў распрацоўкі праектнай дакumentацыі для яго аднаўлення. У чэрвені 2023 г. быў распачаты капітальны рамонт з мадэрнізацыяй будынка і яго прыстасаваннем пад навучальны корпус універсітэта. Будаўнічыя работы завяршыліся ў чэрвені 2024 г.

Архітэктурна-гістарычныя адметнасці: вонкавы выгляд. З часу пасляваеннага аднаўлення ў 1950-х гг. будынак не падвяргаўся маштабным перабудовам, а яго эксплуатацыйны стан падтрымліваўся выключна за кошт бягучага рамонту. Гэта спрыяла паступовай дэградацыі гістарычнага выгляду, але не прывяло да яго кардынальнай змены: будынак у значнай ступені захаваў гістарычную адметнасці архітэктуры сярэдзіны XX ст., якія былі зафіксаваны і падрабязна вывучаны падчас правядзення комплексных навуковых даследаванняў.

Праведзеная архіўныя і натурныя даследаванні сведчаць, што архітэктурнае ablіčча фасадаў захавалася да пачатку работ на аб'екце без прынцыповых змен, за выключэннем колеравага рашэння і дробных страт, выкліканных уздзеяннем часу і адсутнасцю належнага дагляду.

Будынак з'яўляецца прыкладам архітэктурнай постканструктыўізму. У спалучэнні аб'ёмаў розных функцыональных частак і агульнай кампазіцыі прасочваеца выразная стылістыка канструктыўізму. Пры гэтым будынак харкторызуецца сіметрыяй, уласцівой класічнай архітэктуре. Фасады, выкананыя ў канструктыўісцкіх працпорціях і кампазіцыйных прыёмах, аздобленыя класічным дэкорам. Галоўны фасад найбольш набліжаны да неакласічнай архітэктуре дзяякоўцы выкарыстанню актыўнага порціка з працпорціямі класічнай ордарнай сістэмы. Дэталёвая перапрацоўка дэкаратыўных элементаў сведчыць пра ўплыў стылістыкі ар-дэко. Асаблівую цікавасць уяўляюць стылізаваныя капітэлі, якія ў працпорціях і сілуэце нагадваюць класічныя ордарныя формы, але пры гэтым дэманструюць іх стылістичнае пераасэнаванне.

Падчас паваенага аднаўлення будынка змяненні не закранулі дэкаратыўнага афармлення фасадаў. Згодна з актам агляду будынка 1951 года, нават праз пяць гадоў пасля пажару тынкоўка фасадаў захоўвалася ў здавальняючым стане на плошчы да 75% (патрабаваліся толькі бягучыя рамонт і перацірка), а 25% тынкоўкі неабходна было выкананы нанова¹². Форма дэкаратыўных элементаў у дэталях адпавядае фотафіксацыі аб'екта, выкананай перад паваенным аднаўленнем будынка.

Падчас правядзення работ у 2023–2024 гг. гістарычнае аддзелка было захаваная і адрестаўраваная. Быў аднаўлены раней страчаны парапет над уваходам дваровага фасада. Дэталіроўка парапета над уваходам галоўнага фасада патрабуе аднаўлення ў будучым.

Архітэктурна-гістарычныя адметнасці: інтэр'еры. Згодна з абледаваннем 1951 года, у адрозненне ад фасадаў, тынкоўка ўнутры будынка знаходзілася ў нездавальняючым стане. Фотафіксацыя таго часу сведчыць пра абшырныя сляды замакання ў тынкоўкі сцен і столі, а на асобных паверхнях аддзелка ўжо цалкам адсутнічае¹³.

Аналіз фотаздымкаў^{14,15} дае ўяўленне пра агульную стылістыку першапачатковых інтэр'ераў і харктор паваенных зменаў. Як і фасады, інтэр'еры былі набліжаны да агульнай неакласічнай стылістыкі з дадаткам мадэрнісцкіх элементаў. Увагу прыцягваюць у першую чаргу калоны і пілястры ў розных памяшканнях. Яны ўяўляюць сабой ар-дэко-стылізацыю класічных ордараў і камбінацыю розных гістарычных стыляў: на пілястрах у актавай залі былі геаметрычна стылізаваныя іанічныя капітэлі з актыўна высунутымі па баках валютамі, а на каланадзе галоўнай лесвіцы – камбінацыя дарычнай і егіпецкай капітэлі з артаментальнымі паліхромнымі дэкаратыўнымі размалёўкамі (малюнак 4).

⁸ Гл. зноска 3.

⁹ Гл. зноска 1.

¹⁰ Гл. зноска 2.

¹¹ Гл. зноска 1.

¹² Гл. зноска 2.

¹³ Гл. зноска 2.

¹⁴ Гл. зноска 2.

¹⁵ Государственный архив Российской Федерации. – Ф. Р-7021. Оп 128, 151: «Альбом разрушений в городе Полоцк...».



a – колоны вестыбюля пры актавай зале: камбінацыя дарычнай і егіпецкай капітэлі з артаментальнымі паліхромнымі дэкаратыўнымі размалёўкамі;
б – геаметрычна стылізаваныя іянічныя капітэлі актавай залы

Малюнак 4. – Рэшткі першапачатковага аздаблення інтэр’ераў. Фрагменты фота 1950-х гг.¹⁶

Падчас паваеннай рэканструкцыі былі захаваны даваенныя планіровачныя і кампазіцыйныя рашэнні інтэр’ераў, аднак усё дэкаратыўнае афармленне было выкананае нанова ўжо ў цалкам класічных формах, уласцівых паваеннай архітэктуры.

На момант пачатку праектных і даследчых работ у 2021 годзе інтэр’ернае аздабленне захавалася амаль у поўным аб’ёме, хоць колеравая гама была цалкам змененая, а стан аддзелкі другога паверха праз рэгулярнае замаканне – перадаварыйны. У ходзе даследаванняў была выкананая падрабязная фіксацыя аўтэнтычных элементаў. Падчас правядзення работ яны былі адрестаўраваныя або заменены дакладнымі копіямі. Акрамя таго, памяшканням вярнулі насычаны гістарычны неакласічны каларыт на падставе вынікаў фізіка-хімічных даследаванняў¹⁷.

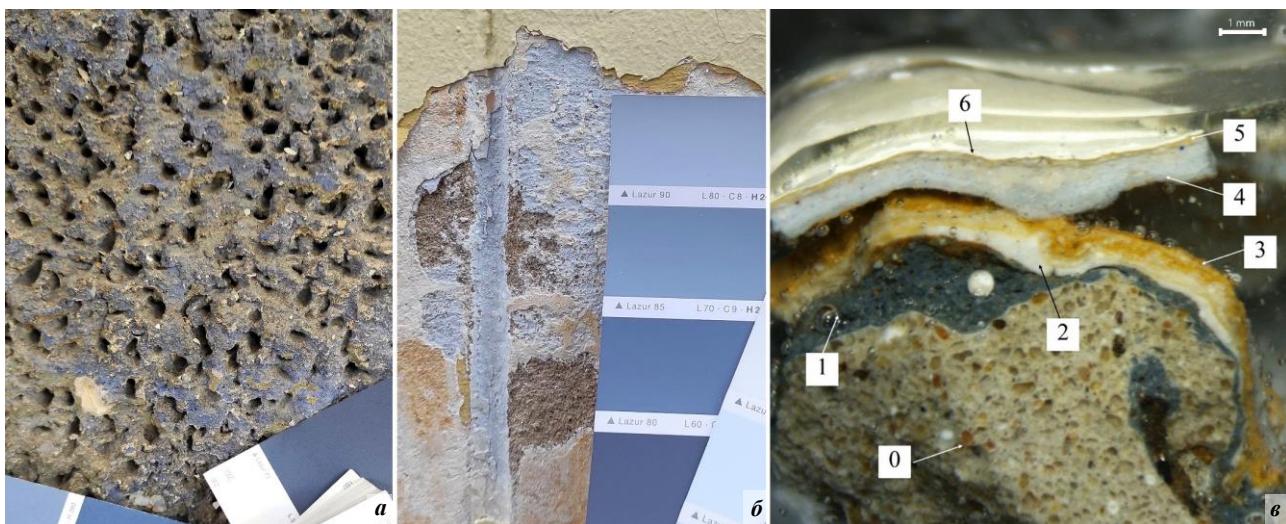
У будучыні спатрэбіца дадатковае аднаўленне некаторых прафіляваных цяг і ўдакладненне прынцыпу раскаляроўкі элементаў у вестыбулю другога паверха на падставе гістарычных матэрыялаў. Аднак ужо цяпер адноўленыя інтэр’еры Дома афіцэраў з’яўляюцца яго адметнасцю і ў высокай ступені адлюстроўваюць стылістычныя асаблівасці неакласічнай архітэктуры 1940–1950-х гадоў.

Колеравае рашэнне фасадаў. Асобны комплекс даследаванняў быў прысвечаны вызначэнню колеравага рашэння фасадаў будынка. Праведзеныя фізіка-хімічныя даследаванні дазволілі выявіць і храналагічна суднесці фарбавальныя слай на розных элементах фасадаў, а таксама вызначыць іх колеры.

Для ўдакладнення вынікаў лабараторных даследаванняў на фасадах былі раскрыты ўчасткі розначавага аздаблення, што дазволіла дакладней вызначыць яго колеравы тон і падабраць сучасныя аналагі фарбаў на аснове выфарбовак (малюнак 5). Дзякуючы фотафіксацыі аб’екта, зробленай у 1941–1944 і 1950–1970-х гадах, быў праанализаваны прынцып раскаляроўкі асобных элементаў фасадаў і выяўлены адметныя прыёмы іх афармлення. Вынікі даследаванняў далі магчымасць выкананць дакладныя графічныя рэканструкцыі вонкавага выгляду будынка на момант яго будаўніцтва і пасля наступных рамонтаў.

¹⁶ Гл. зноски 2.

¹⁷ Гл. зноски 4.



a – раскрытие гисторичных фарбавальных пластоў на бучардзе руста;
б – раскрытие гисторичных фарбавальных пластоў плоскасці сцяны будынка;

в – стратиграфічны аналіз фарбавальных пластоў цэнтральнай часткі руста (мікрафотадымак):
0 – тынок; **1** – першы фарбавальны шэра-сіні слой; **2** – падрыхтоўчы слой; **3** – фарбавальны слой цёмна-охрысты;

4 – падрыхтоўчы слой; **5** – фарбавальны слой светла-жоўты; **6** – фарбавальны слой малочна-белы

Малюнак 5. – Раскрыці і стратиграфічны аналіз гисторичных фарбавальных пластоў на фасадзе будынка

Асноўны колер плоскасцяў сцен першапачаткова быў стрыманым блакітным (аналаг Lazur 90 – каталог колераў Caparol 3D-System Plus). Выступаючы дэкор фасадаў вылучаўся двумя колерамі: цёмным шэра-сінім (аналаг Lago 15) і светлым малочна-белым (аналаг Palazzo 120). Цёмным афарбоўваліся карніз і асноўная цягі, фактурны цэнтр рустоў, сандрыкі вокнаў і цокаль. Светлымі былі калоны і пілястры, рамкі і зубцы парапетаў, выступаючы дэкор цэнтральнай часткі галоўнага і дваровага фасадаў, зубцы антаблемента, падаконныя дэкарацыі першага паверха, а таксама рамкі вокнаў другога паверха.

Пры даследаваннях улічвалася, што падчас вайны фасады будынка былі пакрытыя маскіровачнай афарбоўкай цёмнай фарбай, каб імітаваць ваенныя пашкоджанні, робячы будынак менш прыкметным. Фарба была нанесеная нераўнамерна па фасадах тонкім пластом, хутчэй за ўсё, распылам. Выяўленыя слоі шэра-сіній і блакітнай вапнавай фарбы, наадварот, уяўлялі сабой шчыльны раўнамерны пласт і адносіліся менавіта да аздабленчых слоў.

Акрамя самога колеравага рашэння варта адзначыць і іншыя адметнасці афарбоўкі і аздаблення фасадаў. Асаблівую ўвагу прыцягвае двухколернае рашэнне прафіляваных арачных цяг над вокнамі першага паверха, абрамленняў і філёнгага вокнаў другога паверха галоўнага фасада, дзе элементы былі афарбаваныя ў два колеры з расфарбоўкай па абломах. Таксама верхняя цягі фрыза (пад карнізам) мелі блакітны колер, аналогічны асноўнаму колеру фасадаў, а не колеры, выкарыстаныя для вылучэння аб'ёмных дэкарацый (малюнак 6). Такі прыём візуальная «адрываваў» цёмны карніз ад светлага фрыза.

Яшчэ адной адметнасцю было выкарыстанне фактурнай тынкоўкі на глухіх плоскасцях па баках уваходнай каланады. Пры адолькавым колеры фасада рознасць фактур стварала візуальны эффект «шахматнай дошкі» (гл. малюнак 6). Падобны прыём вядомы ў паваеннай архітэктуры пры аздабленні руставаных плоскасцяў фасадаў, напрыклад, на будынках па вул. К. Маркса, 50, вул. Чырвонаармейская, 6, пр. Незалежнасці, 65 у Мінску. Блізкае кампазіцыйнае рашэнне можна назіраць у афармленні фасадаў Дома культуры «Mір» у Саратаўе.

Колеравае рашэнне фасадаў Дома афіцэраў у Полацку вартае асаблівой увагі не толькі з эстэтычнага, але і з гісторыка-архітэктурнага гледзішча. Яно адразніваецца ад звычайных для архітэктуры постканструктыўізму і савецкага неакласіцызму рашэнняў, бо не адпавядае дамінуючай стылістыцы і архітэктурнай палітыцы таго часу.

Неакласічная савецкая архітэктура традыцыйна харектарызуецца выкарыстаннем охрыстых, тэракотовых, шэрых адценняў, якія адсылаюць да колераў натуральнага каменю, з невялікай колькасцю ці адсутнасцю контрастных дэкаратыўных элементаў.

Выкарыстанне блакітных адценняў у афарбоўцы фасадаў будынкаў 1930-х гадоў з'яўляецца нетыповым. Блакітныя і сінія адценні выкарыстоўваліся рэдка ў якасці асноўных колераў фасадаў у архітэктуры постканструктыўізму і неакласіцызму. Такі каларыт афарбоўкі больш харектэрны для інтэр'eraў або акцэнтных дэкаратыўных уставак (малюнак 7).

Прыміненне больш шырокай палітры і контрастных спалучэнняў сведчыць пра ўплыў яшчэ мадэрнісцкіх плыняў у творчасці архітэктара. Але цікавым з'яўляецца факт рэалізацыі падобных рашэнняў пасля 1936 г., нягледзячы на фактычную забарону “не класічнай” архітэктуры. Магчыма, выбар больш яскравых і нестандартных адценняў быў спрычинены пажаданнямі саміх заказчыкаў зрабіць будынак больш эфектным і прывабным, падкрэсліць яго важнасць.

У любым выпадку, першапачтковае аздабленне фасадаў робіць Дом афіцэраў у Полацку рэдкім і каштоўным прыкладам нестандартнага колеравага падыходу ў савецкай архітэктуры 1930-х гадоў і патрабуе больш падразнага даследавання.



**Малюнак 6. – Фрагмент галоўнага фасада. Фота 1941–1944 гг.
Выразна бачныя прынцып расфарбоўкі элементаў і фактурная «шахматная» адззелка**



Малюнак 7. – Арыгінальнае колеравае рагшэнне будынка. Графічная рэканструкцыя (фотамантаж)

Пры рэканструкцыі 1951–1953 гг. будынак быў пафарбаваны ў адзін цёмны охрысты колер (аналаг Maril 105), без выдзялення іншым колерам дэкаратыўных элементаў – распаўсюджаны прыём савецкай некласічнай архітэктуры. Пра гэта сведчаць вынікі фізіка-хімічных даследаванняў, а таксама гістарычныя чорна-белыя фотаздымкі 1950–1960-х гг., на якіх не назіраецца адрозненне ў насычанасці тона розных плоскасцяў і элементаў¹⁸.

Мяркуючы па гістарычных фотаздымках будынка, у 1970–1980-я гады колеравае рашэнне і прынцып раскаляроўкі былі зменены: плоскасці фасадаў ужо пафарбаваны насычанай жоўтай охрай, а выступаючы дэкор і калоны – пабеленыя^{19,20}. Гэты прынцып, з нязначнымі змяненнямі тона і насычанасці афарбоўкі, захоўваўся і пры далейшых рамонтах да сярэдзіны 2000-х гадоў, калі плоскасць сцяны першага паверха была вылучана блакітным колерам.

Такім чынам, ад моманту будаўніцтва полацкі Дом афіцэраў меў трох прынцыпова розныя колеравыя схемы. Аналіз іх гістарычнай вартасці і наяўнага горадабудаўнічага канцэпту дазволіў прыняць рашэнне пра неабходнасць аднаўлення каларыту 1930-х гг. Першас колеравае рашэнне мае найбольшую гістарычную і стылістичную значнасць, а таксама статыстычную ўнікальнасць. Яно з'яўляецца неад'емнай часткай архітэктурнай канцэпцыі фасадаў, якія захаваліся без пазнейшых змен. Пасля паваеннага аднаўлення будынак не займеў новага, трывалага ў часе архітэктурнага аблічча, а яго адасоблене размяшчэнне спрыяле самастойнаму ўспрыманню ў структуры гарадской забудовы.

На фінальнай стадыі будаўніцтва заказчыкам работ было ўзнята пытанне аб карэкціроўцы раней распрацаўванага і ўзгодненага колеравага рашэння фасадаў у блакітных танах на охрыстае – больш звыклае і блізкае да колеравай гамы, якая існавала да пачатку работ. У сувязі з гэтым у праектную дакументацыю былі ўнесены адпаведныя змены. Пры захаванні насычанасці і асноўнага прынцыпу размеркавання колераў па фасадах быў зменены іхны тон: блакітны – на жоўтую охру, шэра-сіні – на тэракотовы.

Навуковым кірауніком аб'екта было падрыхтавана аргументація неабходнасці змены праектных рашэнняў (з лютага 2024 года гэтыя абавязкі выконвала А.А. Байнак). У якасці асноўнага аргументу прыводзілася хібае дапушчэнне, што фасады будынка былі моцна пашкоджаны ў выніку разбурэння 1944 года, а яго сучасны выгляд сфармаваўся падчас паваеннай рэканструкцыі, калі ў Беларусі “фармаваўся манументальны і ўрачысты архітэктурны стыль, які адлюстроўваў веліч Перамогі”. Таксама адзначалася, што новыя колеры выбраны на падставе аналізу аналагічных аб'ектаў таго часу, а светла-жоўтыя і аранжавыя адценні забяспечваюць гарманічнае ўспрыманне будынка ў гарадскім асяроддзі. Таму, згодна з аргументаціяй А.А. Байнак, рэстаўрацыя мусіць арыентавацца на пасляваенны выгляд будынка, а не на арыгінальнае колеравае рашэнне 1930-х гадоў²¹. Аднак вынікі праведзеных даследаванняў, апісаныя вышэй, сведчаць пра навуковую неабгрунтаванасць такога падыходу.

У выніку рэалізаваныя рашэнні сфармавалі новы вобраз аб'екта, які мае ўскоснае дачыненне як да першапачатковага аўтарскага рашэння, так і да паваеннага выгляду будынка.

З аднаго боку, безумоўна станоўчым аспектам з'яўляецца захаванне авангардных рашэнняў кантраснай расфарбоўкі і адпаведнай насычанасці колераў аўтарскага праекта. З іншага боку, у гістарычным «блакітным» варыянце два колеры аднаго тону з рознай насычанасцю стваралі больш цэласнае і гарманічнае ўспрыманне будынка, а таксама з'яўляліся ўнікальнымі гістарычнымі прыкладамі архітэктурнай палітры свайго часу.

Заключэнне. Праведзены ў 2021–2024 гг. даследаванні сталі першай комплекснай спробай вывучэння Дома афіцэраў у Полацку. У ходзе работ былі даследаваны будаўнічая гісторыя аб'екта, яго архітэктурны і мастацкі асаблівасці, вызначаны асноўныя вартасці і выкананы дакладная фіксацыя фасадаў і інтэр'ераў. Вынікі даследаванняў пакладзены ў аснову праекта капітальнага рамонту з мадэрнізацыяй, што дазволіла максімальна захаваць аўтэнтычныя элементы і аднавіць страчаныя дэталі гістарычнага аблічча.

На сучасным этапе Дом афіцэраў уведзены ў эксплуатацыю, забяспечана захаванне гістарычнага аб'екта і яго функцыянальнае выкарыстанне. Аднак асобныя аспекты гісторыі будынка застаюцца недастаткова вывучанымі і патрабуюць далейшага даследавання. Акрамя таго, існуюць рэстаўрацыйныя пытанні, якія неабходна ўлічваюць пры планаванні наступных рамонтна-рэстаўрацыйных работ.

Дом афіцэраў узвядзены паміж 1937–1940 гг. паводле тыповога праекта клуба на 750 месцаў, распрацаўнага Цэнтральным Ваенпраектам. Пытанне аўтарства застаецца адкрытым: верагодна, што да распрацоўкі праекта меў дачыненне юкрайнскі савецкі архітэктар І.Ю. Каракіс, аднак дакладная ступень яго ўдзелу, асабліва ў фарміраванні фасадных рашэнняў, патрабуе далейшага даследавання.

Будынак з'яўляецца прыкладам архітэктуры постканструктывізму, у якім першапачатковыя канструктыўісцкія рашэнні спалучаюцца з класічнай ордарнай кампазіцыяй, мадэрнізаванай характэрнай для ар-дэко формамі дэталяў і дэкаратыўных элементаў. Адметнасцю з'яўляецца арыгінальнае колеравае рашэнне фасадаў у блакітных танах

¹⁸ Нацыянальны Полацкі гісторыка-культурны музей-запаведнік (НПГКМЗ). – фота з фондаў.

¹⁹ Гл. зноску 1.

²⁰ У Дома Офіцэров // Retro View of Mankind's Habitat. – URL: <https://pastvu.com/p/854105> (дата обращэння: 20.05.2025).

²¹ Обоснование принятых проектных решений по объекту: «Капитальный ремонт с модернизацией здания по адресу: г. Полоцк, ул. Толстого, 8». Внесение изменений (корректировка цветового решения фасадов) / ЧПУП «АнкорПроект»; науч. рук. Е.А. Байнак. – Полоцк, 2024.

з кантрасным вылучэннем дэкаратыўных элементаў. Такое спалучэнне класічных архітэктурных форм і мадэрнісцкай дэкаратыўнасці адлюстроўвае пошук індывідуальнасці і дадатковай выразнасці ў межах савецкай неакласічнай архітэктуры. Гэта робіць будынак важным аб'ектам для вывучэння архітэктурных тэндэнций 1930-х гадоў.

Нягледзячы на вясенны разбурэнні, фасады захавалі дэталі першапачатковага праекта. Дэкаратыўнае афармленне інтэр’ераў было зменена падчас аднаўлення будынка ў 1951–1953 гг. Наяўныя гістарычныя матэрыялы даюць агульнае стылістычнае ўяўленне пра характар унутранага аздаблення. Дадатковае вывучэнне архітэктурных крыніц да 1944 года можа даць больш дакладную інфармацыю пра першапачатковыя інтэр’ерныя рашэнні.

У перспектыве неабходна працягнуць працу над аднаўленнем страчаных элементаў фасадаў і інтэр’ераў, якія не былі ўзноўлены падчас апошніх рамонтна-рэстаўрацыйных работ. Важней задачай застасеца аднаўленне першапачатковага колеравага рашэння, якое з'яўляецца адным з ключавых складнікаў мастацкай і стылістычнай самабытнасці будынка. Гэтыя меры дазволяюць не толькі аднавіць яго аўтэнтычны архітэктурны воблік, але і ўзбагаціць культурную спадчыну Полацка яшчэ адным унікальным аб'ектам.

ЛІТАРАТУРА

1. Юнаков О. Архитектор Иосиф Каракис. – Нью-Йорк: Алмаз, 2016. – 544 с.
2. Олейник Е. Архитектор, который решил формулу Киева // Архитектура и Престиж. – 2002. – № 2(22). – С. 114.
3. Червинский Д. Жизнь замечательных людей: Вековой юбилей зодчего // Киев Еврейский. – 2002. – № 8(25) август. – С. 6.
4. Екимов. Дом Авиции: [о строительстве дома авиации в Воронеже] // Воронежская Коммуна. – 1935.
5. Корнефельд Я.А. Да здравствует ХХ годовщина Красной армии! / Техн. ред. З.Г. Амальрик // Архитектурная газета. Приложение к № 11. – М., 1938. – Февраль.
6. Георгиевский М. Типовые проекты строительства массовых здания Красной Армии : Иллюстрированное приложение к «Строительной газете» / отв. ред. А.А. Мандругин. – Москва, 1940. – № 4(56) январь.

REFERENCES

1. Yunakov, O. *Arkhitektor Iosif Karakis*. – N'yu-Iork: Almaz, 2016. – 544 s. (In Russ.).
2. Oleinik E. *Arkhitektor, kotoryi reshil formulu Kieva* // *Arkhitektura i Prestizh*. – 2002. – № 2(22). – S. 114. (In Russ.).
3. Chervinskii D. *Zhizn' zamechateľnykh lyudej: Vekovoi yubilei zodchego* // *Kiev Evreiskii*. – 2002. – № 8(25) avgust. – S. 6. (In Russ.).
4. Ekimov. Dom Avitssi: o stroitel'stve doma aviatsii v Voronezhe // *Voronezhskaya Kommuna*. – 1935. (In Russ.).
5. Kornefel'd Y.A. Da zdravstvuet KhKh godovshchina Krasnoi armii! / Tekhn. red. Z.G. Amal'rik // *Arkhitekturnaya gazeta. Prilozhenie k № 11*. – 1938. – Fevral'. (In Russ.).
6. Georgievskii M. *Tipovye proekty stroitel'stva massovykh zdaniya Krasnoi Armii: Illyustrirovannoe prilozhenie k «Stroitel'noi gazete»* / otv. red. A.A. Mandrugin. – Moskva, 1940. – № 4(56) yanvar'. (In Russ.).

Поступила 24.11.2025

ЗДАНИЕ БЫВШЕГО ДОМА ОФИЦЕРОВ В ПОЛОЦКЕ: ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ 2021–2024 ГОДОВ

P.A. ЗАБЕЛЛО
(ООО «Научно-проектный центр «РЕСТАБИЛИС», Минск)

В статье представлены результаты научных исследований, проведённых в 2021–2024 годах в рамках разработки проектной документации и реализации проектных решений по капитальному ремонту с модернизацией здания бывшего Дома офицеров в Полоцке. Актуализированы сведения об истории строительства объекта, проанализированы первоначальные проектные решения и выявлены аналогичные объекты, созданные по схожим типовым проектам. Особое внимание уделено проблеме авторства: на основе анализа архивных материалов и применения сравнительного метода выдвигается гипотеза о причастности к проекту архитекторов Иосифа Каракиса, Николая Гайгарова и Владимира Новосадова. Представлена графическая реконструкция первоначального цветового решения фасадов здания. Определена историческая и архитектурная ценность памятника, а также обозначены ключевые задачи по его восстановлению и сохранению. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию советской общественной архитектуры межвоенного периода и формируют основу для дальнейшего планирования реставрационных работ.

Ключевые слова: Дом офицеров в Полоцке, научные исследования, реконструкция, реставрация, Иосиф Каракис, Николай Гайгаров, исторический колорит архитектуры, советская архитектура, неоклассицизм, постконструктивизм, ар-деко.

**BUILDING OF THE FORMER OFFICERS' HOUSE IN POLACK:
RESULTS OF RESEARCH CONDUCTED IN 2021–2024****R. ZABELA***(Center of architectural conservation “RESTABILIS”, Minsk)*

The article presents the results of research conducted between 2021 and 2024 during the development of design documentation and the implementation of design solutions for the capital repair and modernization of the former Officers' House in Polack. The study clarifies the history of the building's construction, analyzes its original architectural design, and identifies analogues created according to a similar standard project. Particular attention is devoted to the issue of authorship: based on archival materials and comparative analysis, a hypothesis is proposed regarding the participation of architects Joseph Karakis, Nikolay Gaigarov, and Vladimir Novosadov in the project. The article also includes a graphic reconstruction of the original façade color scheme. The historical and architectural value of the monument is defined, and the main challenges related to its restoration and preservation are outlined. The results contribute to the broader understanding of Soviet public architecture of the interwar period and provide a basis for further conservation planning.

Keywords: Polack, Officers' House in Polack, research, reconstruction, restoration, Joseph Karakis, Nikolai Gaigarov, historical color scheme of architecture, Soviet architecture, neoclassicism, post-constructivism, art deco.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ГАЗОРASПРЕДЕЛЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. А.М. НИЯКОВСКИЙ¹⁾,

Н.В. СТРУЦКИЙ²⁾, С.В. КУХТА³⁾, В.А. ЗАФАТАЕВ⁴⁾

(^{1),3,4)} Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

²⁾ Государственное предприятие «НИИ Белгипротопгаз», Минск)

¹⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5106-6278>, ⁴⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8058-2263>

²⁾ nickolasstrutsky@gmail.com

Рассмотрено применение обобщенных показателей для оценки функционирования региональных систем инженерной инфраструктуры, таких, как системы газоснабжения и газораспределения. Определена содержательная структура агрегированного показателя безопасности, устойчивости и энергоэффективности газоснабжения. На основе анализа применяемых математических способов трансформации, согласования и агрегировании данных, используемых при расчете показателей в системах оценивания, разработан математический аппарат для расчета агрегированного показателя уровня функционирования газоснабжающей организации.

Ключевые слова: газораспределительная система, газоснабжающая организация, показатели эффективности функционирования, энергоэффективность, эконометрика, статистический анализ, математическое моделирование, агрегированное оценивание, большие данные, кластерный анализ.

Введение. Газораспределительная система представляет собой сложный многоуровневый производственно-технологический комплекс, интегрирующий технические, экономические и социально-организационные компоненты. В её структуре взаимосвязаны процессы организационного управления, информационного, технологического и технологического обеспечения, коммуникационного взаимодействия и финансово-экономического регулирования.

В силу указанной комплексности формирование объективной, научно обоснованной и верифицируемой оценки эффективности функционирования таких систем относится к числу наиболее сложных и актуальных задач современной технической науки. Её решение требует разработки специализированной методологии комплексного анализа, учитывающей разнородные факторы и критерии [1].

Эффективное управление газораспределительной системой возможно лишь при условии непрерывного мониторинга её текущего состояния и протекающих в ней процессов на основе верифицированной информации и её глубокого аналитического осмысливания. Этой теме и, в частности, вопросам формирования системы ключевых показателей эффективности (КП) для газораспределительного предприятия, удалено значительное внимание в научно-технической литературе, например, в исследованиях¹ [1–8] и многих других. Мировым энергетическим советом (World Energy Council, WEC) и Агентством по охране окружающей среды и энергетики (Agence de la transition écologique, ADEME) была создана база данных ODYSSEE с целью контроля национального энергопотребления и внедрения лучших практик в сфере энергосбережения и повышения энергоэффективности². Однако, несмотря на значительное количество таких исследований, в настоящее время отсутствует общепринятая унифицированная методологическая основа для формирования интегрального индикатора, позволяющего производить оценку функционирования подобных систем³.

Общепринятым подходом к построению систем оценивания крупных производственных комплексов на современном этапе является построение агрегированного (обобщенного) показателя, развертка которого представляет собой многоуровневую иерархическую систему, в которой показатели вышестоящих уровней определяются через показатели нижестоящих уровней. Для обеспечения сопоставимости показателей, на каждом уровне производится их преобразование к единому виду и последующее взвешивание (ранжирование) [9]. К примеру, в структуре Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации для оценки работы централизованных систем горячего и холодного водоснабжения определяется агрегированный показатель надежности, качества, энергетической эффективности объектов централизованных систем горячего водоснабжения, холодного водоснабжения и (или) водоотведения⁴.

¹ Бочков, А. В. Методология обеспечения безопасности функционирования и устойчивости единой системы газоснабжения в чрезвычайных ситуациях: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Бочков Алексей Владимирович. – М., 2019. – 385 л.

² ODYSSEE Database. Key Indicators. – URL: <http://www.indicators.odysseemure.eu/online-indicators.html> (date of the application 12.11.2025).

³ См. сноску 1.

⁴ Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 4 апреля 2014 г. № 162/пр «Об утверждении перечня показателей надежности, качества, энергетической эффективности объектов централизованных систем

Методика расчета плановых и фактических показателей надежности и качества услуг по транспортировке газа по газораспределительным сетям утверждена Приказом Минэнерго России № 926 от 15.12.2014.⁵ В соответствии с ней при расчетах показателей используются следующие данные: о фактических значениях показателей надежности и качества услуг по транспортировке газа по газораспределительным сетям (не менее чем за 3 года); объем затрат, предусмотренных инвестиционными программами газораспределительных организаций и направленных на поддержание (повышение) надежности и качества услуг по транспортировке газа по газораспределительным сетям; природно-климатические и территориальные условия, технологические и технические характеристики газораспределительных сетей.

Мировым энергетическим советом (World Energy Council, WEC) и Агентством по охране окружающей среды и энергетики (Agence de la transition écologique, ADEME) была создана база данных ODYSSEE с целью контроля национального энергопотребления и внедрения лучших практик в сфере энергосбережения и повышения энергоэффективности⁶.

Это только отдельные, но характерные примеры использования метода агрегированного оценивания структурообразующих систем инженерно-технической инфраструктуры. Подобный подход может быть использован и для оценки функционирования региональной газораспределительной системы.

Цель данной работы: формирование основных подходов к разработке методики определения агрегированного показателя безопасности, устойчивости и энергоэффективности газоснабжения для региональной газоснабжающей организации (на примере УП «Брестоблгаз» ГПО «Белтопгаз»).

Объект исследования: системы газоснабжения, газоснабжающие организации.

Предмет исследования: эффективность функционирования систем газоснабжения в контексте деятельности газоснабжающих организаций.

Методы и методология: сравнительный анализ, теоретические исследования, математическое моделирование, эконометрический анализ, статистический анализ, численные методы.

Основная часть. С учетом специфики деятельности притай к анализу региональной газоснабжающей организации и на основании предварительного анализа предоставленных исходных данных, разрабатываемый агрегированный показатель должен быть представлен в виде иерархической структуры, включающей в себя несколько взаимно подчиненных уровней: *факторы ← критерии ← метрики ← оценочные элементы*. В представленной схеме факторы являются верхним, а оценочные элементы – нижним уровнями. Факторы определяются набором критериев. В свою очередь, критерии характеризуются одной или несколькими метриками. Если критерий представлен одной метрикой, то метрика выступает в роли критерия, и уровень метрик по такому критерию исключается. Метрики составляются из оценочных элементов (единичных показателей), определяющих заданное в метрике определенное свойство. Число оценочных элементов, входящих в метрику, может быть любым. Выбор оценочных элементов в метрике проводится методами кластерного анализа на основании исходных данных, представленных анализируемой организацией.

Число принимаемых в расчет факторов теоретически может быть любым. На данном этапе проводимых исследований можно предложить пять главных **факторов**, определяющих функционирование областного газового хозяйства:

- 1) структурная сложность;
- 2) безопасность;
- 3) устойчивость;
- 4) функциональность;
- 5) энергоэффективность.

Каждому фактору соответствует определенный набор критериев. В частности, фактор «Структурная сложность» может включать следующие **критерии**:

- бытовые потребители газа;
- бытовое газоиспользующее оборудование;
- промышленные и коммунальные потребители газа;
- трубопроводная сеть;
- узлы редуцирования газа;
- средства защиты от коррозии;
- инфраструктура СУГ.

горячего водоснабжения, холодного водоснабжения и (или) водоотведения, порядка и правил определения плановых значений и фактических значений таких показателей» / Информационно-правовой портал Гарант. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70606956/?ysclid=m3d1e8yi3d75980272> (дата обращения 12.11.2025).

⁵ Приказ Министерства энергетики РФ от 15 декабря 2014 г. № 926 «Об утверждении Методики расчета плановых и фактических показателей надежности и качества услуг по транспортировке газа по газораспределительным сетям» / Информационно-правовой портал Гарант. – URL: <https://base.garant.ru/70857632/?ysclid=mhxho97r4t979395054> (дата обращения 12.11.2025).

⁶ См. сноску 2.

В свою очередь, критерий «Бытовые потребители газа» формируется *метриками*, например:

- газифицированные квартиры в многоквартирных жилых домах;
 - газифицированные квартиры в индивидуальных жилых домах.

В состав метрик «Газифицированные квартиры в многоквартирных жилых домах» и «Газифицированные квартиры в индивидуальных жилых домах» могут быть, например, включены следующие **оценочные элементы**:

- число потребителей, газифицированных природным газом;
 - число потребителей, газифицированных сжиженным углеводородным газом (СУГ) от групповых установок;
 - число потребителей, газифицированных СУГ от индивидуальных баллонных установок.

Таким образом, конечном итоге в фактор «Структурная сложность» войдут все объекты и элементы региональной системы газораспределения и газопотребления, взаимодействие с которыми и составляет содержание деятельности газоснабжающей организации: подача газа потребителям и техническое обслуживание объектов инфраструктуры.

Аналогичным образом производится кластеризация остальных выделенных факторов. Синтезированная в результате этого иерархическая структура агрегированного показателя функционирования региональной газораспределительной системы представлена на рисунке 1.

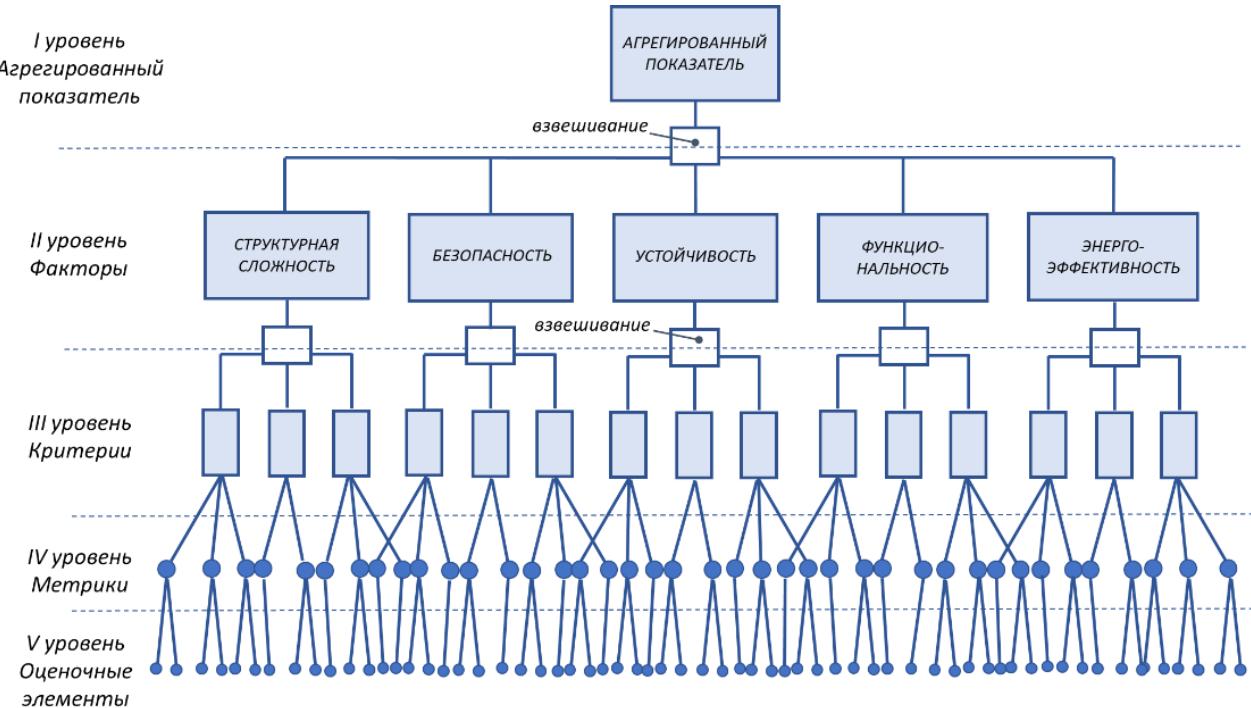


Рисунок 1. – Иерархическая структура агрегированного показателя функционирования региональной системы газоснабжения и газораспределения

Для численной оценки показателей на всех уровнях принимают единую нормализованную шкалу от нуля до единицы. Показатели на каждом вышестоящем уровне (кроме уровня оценочных элементов) определяются показателями нижестоящего уровня, то есть:

- результаты оценки каждого фактора определяются результатами оценки соответствующих ему критериев;
 - результаты оценки каждого критерия определяются результатами оценки соответствующих ему метрик;
 - результаты оценки каждой метрики определяются результатами оценки определяющих ее оценочных элементов.

В процессе оценивания на каждом уровне (кроме оценочных элементов) проводят вычисления показателей функционирования системы, т.е. определение количественных значений:

- абсолютных показателей (P_{ij}), где j – порядковый номер показателя данного уровня для i -го показателя вышестоящего уровня;
 - относительных показателей (K_{ij}), являющихся функцией показателя P_{ij} и базового значения P_{ij}^{δ} существующего аналога или эталонного образца (эталона).

Каждый показатель подлежащего уровня может характеризоваться двумя числовыми параметрами – количественным значением и весовым коэффициентом (V_{ij}). Сумма весовых коэффициентов показателей уровня (I),

относящихся к i -му показателю вышестоящего уровня ($l-1$), есть величина постоянная. Сумма весовых коэффициентов V_{ij} принимается равной единице в соответствии с выражением:

$$\sum_{j=1}^n V_{ij} = \text{Const} = 1, \quad (1)$$

где n – число показателей уровня l , относящихся к i -му показателю вышестоящего уровня ($l-1$).

Общая оценка в целом формируется экспертами по набору полученных значений оценок факторов функционирования газораспределительной системы.

Для проведения *экспертного опроса* составляется таблица значений базовых показателей. Определение усредненной оценки m_{kq} , оценочного элемента по нескольким его значениям (m_s) проводят по формуле:

$$m_{kq} = \frac{\sum_{s=1}^t m_s}{t}, \quad (2)$$

где k – порядковый номер метрики;

q – порядковый номер оценочного элемента;

s – индекс суммирования;

t – число значений оценочного элемента.

Итоговую оценку k -й метрики j -го критерия P_{ij}^M проводят по формуле:

$$P_{jk}^M = \frac{\sum_{i=1}^Q m_{ki}}{Q}, \quad (3)$$

где M – признак метрики;

Q – число оценочных элементов в k -й метрике.

Абсолютный показатель критерия i -го фактора качества P_{ij} определяют по формуле:

$$P_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (P_{jk}^M \cdot V_{jk}^M)}{\sum_{k=1}^n V_{jk}^M}, \quad (4)$$

где n – число метрик, отнесенных к j -му критерию.

Относительный показатель j -го критерия i -го фактора K_{ij} вычисляют по формуле:

$$K_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_{ij}^\delta}. \quad (5)$$

Значение фактора R_i^ϕ вычисляют по формуле:

$$R_i^\phi = \frac{\sum_{j=1}^N (K_{ij} \cdot V_{ij}^K)}{\sum_{j=1}^N V_{ij}^K}, \quad (6)$$

где ϕ – признак фактора;

N – число критериев качества, отнесенных к i -му фактору;

K – признак критерия.

Итоговый агрегированный показатель определяют путем сравнения полученных расчетных значений показателей с соответствующими базовыми значениями эталона.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. В результате анализа литературных источников и полученных статистических данных о деятельности газоснабжающей региональной организации определена структура агрегированного показателя функционирования системы газоснабжения и газораспределения, отличающаяся от известных тем, что включает следующие взаимосвязанные компоненты: 1) *основные факторы*, 2) *набор критерииев*, описывающих каждый фактор; 3) *совокупность метрик*, составляющих каждый критерий, и 4) *оценочные элементы*.

2. На основании проведенных исследований установлены взаимосвязи показателей и предложена иерархическая структура агрегированного показателя для оценки уровня функционирования региональной системы газоснабжения и газораспределения, включающая следующие основные факторы: структурную сложность, безопасность, устойчивость, функциональность, энергоэффективность.

3. Предложены математический аппарат и методика экспертной оценки факторов, критериев, метрик и оценочных элементов, позволяющие произвести комплексную оценку функционирования региональной системы газоснабжения и газопотребления путем применения агрегированного показателя.

4. На основании полученной структуры агрегированного показателя разработаны электронные таблицы, позволяющие выполнить формирование метрик, группировку критериев и их расчет, группировку факторов и их вычисление. В перспективе, при условии создания единой статистически-отчетной электронной формы, агрегированная оценка может стать основой интеллектуальной системы поддержки принятия решений для технических специалистов и руководителей газовой отрасли, основанной на автоматизированном анализе больших данных.

ЛИТЕРАТУРА

- Струтский Н.В. О методологии комплексной оценки функционирования газораспределительной системы // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электрон. сб. ст. VI междунар. науч. конф., Новополоцк, 30–31 окт. 2024 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: Д.Н. Лазовский (председ.) и др. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – С. 264–268. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/47321>.
- Малая Э.М., Сергеев С.А. Устройство и эксплуатация технических систем. – Волгоград: Наука, 2018. – 345 с.
- Новиков П.Е. Математические методы оценки работоспособности газовой сети. – Белгород: Мысль, 2017. – 278 с.
- Савельев Е.Н. Основы прогнозирования работоспособности газовых сетей. – Псков: Свиязь, 2015. – 187 с.
- Харитонов Г.А., Борисов А.В. Методика обработки многократно усеченной информации об отказах газовых сетей // Современные технологии в теплоэнергетике: материалы Международной научно-практической конференции. – Орел, 2018. – С. 48–57.
- Романов А.И. Надежность и качество функционирования газовых сетей // Методология научных исследований объектов газоснабжения: материалы Международной научно-практической конференции. – Курск, 2017. – С. 89–98.
- Kabir G., Sadiq R., Tesfamariam S. A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management // Structure and Infrastructure Engineering. – 2014. – № 10(9). – Р. 1176–1210.
- Костливцева Н.М., Езангина И.А. Ключевые показатели эффективности в системе мониторинга эффективности деятельности компании нефтегазовой отрасли // Гуманитарный научный вестник. – 2021. – № 5. – С. 167–174. URL: <http://naukavestnik.ru/doc/2021/05/Kostlivtseva.pdf>.
- Васильева Л.В. Анализ методических подходов к построению интегральных экономических показателей // Экономические исследования и разработки. – 2017. – № 12. – С. 8–18.

REFERENCES

- Strutskii, N. V. (2025). O metodologii kompleksnoi otsenki funktsionirovaniya gazoraspredelitel'noi sistemy [On the methodology of the comprehensive assessment of the functioning of the gas distribution system]. In D. N. Lazovskii (Eds.) *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii: Elektronnyi sbornik statei VI mezhunarodnoi nauchnoi konferentsii, Novopolotsk, 30–31 oktyabrya 2024 g.* [Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations: Electronic collection of articles of the VI International Scientific Conference, Novopolotsk, October 30–31, 2024] (264–268). Polotskii gosudarstvennyi universitet imeni Evfrosinii Polotskoii. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/47321>.
- Malaya, E. M., & Sergeev, S. A. (2018). *Ustroistvo i ekspluatatsiya tekhnicheskikh sistem* [Design and operation of technical systems]. Volgograd: Nauka. (In Russ.).
- Novikov, P. E. (2017). *Matematicheskie metody otsenki rabotosposobnosti gazovoi seti* [Mathematical methods for assessing the serviceability of a gas network]. Belgorod: Mysl'. (In Russ.).
- Savel'ev, E. N. (2015). *Osnovy prognozirovaniia rabotosposobnosti gazovykh setei* [Fundamentals of predicting the serviceability of gas networks]. Pskov: Svitiaz'. (In Russ.).
- Kharitonov, G. A., & Borisov, A. V. (2018). Metodika obrabotki mnogokratno usechennoi informatsii ob otkazakh gazovykh setei [A method for processing multiply censored information about failures of gas networks]. In *Sovremennye tekhnologii v teploenergetike: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern technologies in thermal power engineering: Proceedings of the International scientific-practical conference] (48–57). Orel. (In Russ.).
- Romanov, A. I. (2017). Nadezhnost' i kachestvo funktsionirovaniia gazovykh setei [Reliability and quality of gas networks operation]. In *Metodologiya nauchnykh issledovanii ob "ektov gazonabzhenii": materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Methodology of scientific research of gas supply facilities: Proceedings of the International scientific-practical conference] (89–98). Kursk. (In Russ.).

7. Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2014). A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(9), 1176–1210.
8. Kostlivtseva, N. M., & Ezangina, I. A. (2021). Kluchevye pokazateli effektivnosti v sisteme monitoringa effektivnosti deiatel'nosti kompanii neftegazovoi otrassli [Key performance indicators in the performance monitoring system of an oil and gas company]. *Gumanitarnyi nauchnyi vestnik*, (5), 167–174. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <http://naukavestnik.ru/doc/2021/05/Kostlivtseva.pdf>.
9. Vasil'eva, L. V. (2017). Analiz metodicheskikh podkhodov k postroeniiu integral'nykh ekonomicheskikh pokazatelei [Analysis of methodological approaches to constructing integrated economic indicators]. *Ekonomicheskie issledovaniia i razrabotki*, (12), 8–18. (In Russ.).

Поступила 11.12.2025

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE GAS DISTRIBUTION SYSTEM PERFORMANCE QUALITY

A. NIYAKOVSKII¹⁾, N. STRUTSKY²⁾, S. KUKHTA³⁾, V. ZAFATAYEU⁴⁾

(^{1),3),4)} Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,

²⁾ State Enterprise NII Belgiprotogaz, Minsk)

This paper examines the application of generalized indicators for assessing the performance of regional engineering infrastructure systems, such as gas supply and distribution systems. The substantive structure of an aggregated indicator for the safety, resilience, and energy efficiency of gas supply is defined. Based on an analysis of mathematical methods used for data transformation, harmonization, and aggregation in indicator calculation for evaluation systems, a mathematical framework for calculating an aggregated indicator of the performance quality for a gas supply organization has been developed.

Keywords: gas distribution system, gas supply organization, performance indicators, energy efficiency, econometrics, statistical analysis, mathematical modeling, aggregated assessment, big data, cluster analysis.

ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЕРЕРАБОТАННОЙ КОРЫ ОСИНЫ

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

В статье проведены исследования гранулометрического состава коры осины, измельчённой в сухом и увлажнённом состоянии, определено процентное содержание волокон луба и частиц корки по фракциям. Изучено влияние фракционного состава и средней плотности структурообразующих материалов из коры осины, включая частицы корки и волокна луба, на коэффициент теплопроводности полученных составов. Установлено, что наибольший теплоизолирующий эффект достигается на тонких волокнах длиной 0,5–2,5 мм фракции 0,16–0,63 мм и 0,63–1,25 мм лубяного слоя коры. При плотности волокон луба коры осины 125–175 кг/м³ теплоизоляционные составы обеспечивают коэффициент теплопроводности на уровне 0,044–0,046 Вт/(м·°C).

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, плотность, кора осины, луб, корка.

Введение. Современным направлением развития строительной отрасли Республики Беларусь является разработка и внедрение новых экологически безопасных строительных материалов, минимизирующих вред для здоровья человека и окружающей среды на всех стадиях жизненного цикла – от производства и эксплуатации до утилизации. Ряд научных и практических публикаций [1–3] подчёркивает важность развития «зелёного строительства» в стране, а также повышения энергоэффективности зданий и использования возобновляемых природных ресурсов.

Эффективное теплосбережение при минимальном воздействии на окружающую среду возможно обеспечить путём использования отходов биомассы в качестве возобновляемых и экологически чистых теплоизоляционных материалов для строительства [4]. Традиционные теплоизоляционные материалы (минеральная вата, пенополистирол, пенополиуретан) обладают высокими эксплуатационными характеристиками, но их производство сопровождается значительными энергозатратами, выделением вредных веществ и создает проблемы при утилизации по окончании срока службы [5].

Альтернативой выше указанным материалам может рассматриваться древесная кора как структурообразующий материал для тепловой изоляции. Кора представляет собой низкоплотную пористую биоструктуру, содержащую значительное количество воздушных включений и обладающую низкой теплопроводностью. Исследования последних лет подтверждают потенциал древесной коры для производства эффективных теплоизоляционных изделий [4–10].

Для производства легких теплоизоляционных панелей возможно использование измельчённой коры сосны как структурообразующего материала, а также мочевиноформальдегидной смолы в качестве связующего [11]. Панели формуются с использованием пресса. Коэффициент теплопроводности панелей составил 0,06–0,09 Вт/(м·°C), при средней плотности 350–500 кг/м³.

Командой ученых из Technical University in Zvolen (Словакия) исследовалась возможность получения композитных плит из коры лиственницы методом горячего прессования [12]. Связующим компонентом являлся мочевиноформальдегидный клей. К недостаткам данной разработки можно отнести высокое значение коэффициента теплопроводности от 0,065 до 0,107 Вт/(м·°C) при средней плотности 362–688 кг/м³. Необходимо отметить, что при производстве и эксплуатации изделий, содержащих мочевиноформальдегидные смолы, выделяется формальдегид – токсичный канцероген, способный вызывать раздражение слизистых, аллергические реакции, головные боли, а при длительном воздействии повышает риск развития онкозаболеваний [13; 14].

Возможность получения плитной тепловой изоляции без добавления синтетического связующего изучена командой ученых из Австрии и Румынии [15]. В качестве структурообразующего материала использованы волокна коры ели. Самосцепление волокон в процессе влажного формирования плит с последующей сушкой, обеспечивало цельность готового материала. Значение коэффициента теплопроводности находится в пределах 0,044–0,063 Вт/(м·°C) при средней плотности плит 164–276 кг/м³. К недостаткам полученных плит можно отнести сравнительно низкую прочность материала в среднем 0,07 Н/мм², а также высокое водопоглощение материала, достигающее 380%.

Использование частиц еловой коры в качестве наполнителя для теплоизоляции деревянной каркасной стены предложено в работе [16]. После сушки кору измельчали и фракционировали, получая частицы размером 8–30 мм. Коэффициент теплопроводности засыпного утеплителя в экспериментальной стене составил 0,056–0,062 Вт/(м·°C) при средней плотности 212–276 кг/м³.

Венгерскими учёными изучались прессованные изоляционные панели из термически модифицированной коры тополя [17]. Для плит, полученных методом горячего прессования, коэффициент теплопроводности находился в пределах 0,064–0,067 Вт/(м·°C) при средней плотности 336–352 кг/м³. Отмечается, что предварительная термическая обработка коры снижает водопоглощение и набухание готовых плит.

В University of Natural Resources and Life Sciences (Австрия) предложено использовать измельчённую кору ели в качестве структурообразующего материала для тепловой изоляции [18]. Процесс изготовления плит заключался в механическом вспенивании компонентов в планетарном смесителе: частиц коры, древесного клея, поверхностно-активного вещества и воды. Значения коэффициента теплопроводности колеблются от 0,075 до 0,125 Вт/(м·°C), а средняя плотность находится в пределах 100–650 кг/м³. Процент водопоглощения достигает 450%, что указывает о необходимости гидрофобизации с целью защиты материала при долговременной эксплуатации.

Теплоизоляционный материал на основе коры эвкалипта разработан учёными из University of Concepcion в Чили [19]. В качестве связующего компонента использовалась фенолформальдегидная смола. Плиты формовались методом горячего прессования при температуре 110 °C. Коэффициент теплопроводности изоляции варьировался в пределах 0,064–0,077 Вт/(м·°C) при средней плотности от 80 до 300 кг/м³, толщина плит составляла 50 мм.

Сотрудники лаборатории «Green constructions» Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой исследовали возможность получения тепловой изоляции, содержащей измельчённую бересту в качестве структурообразующего материала и жидкого стекла как связующего компонента [20; 21]. Полученные теплоизоляционные плиты обеспечивают коэффициент теплопроводности 0,044–0,052 Вт/(м·°C) при плотности 145–180 кг/м³.

Целью настоящего исследования является обоснование возможности применения коры осины в качестве сырья для производства экологически чистых теплоизоляционных материалов, включая изучение основных физических свойств. Кора осины отличается развитой пористостью, низкой плотностью и доступностью на территории Беларуси, что делает её перспективным сырьём для получения экологически чистых теплоизоляционных материалов без применения синтетических связующих веществ.

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

Кора осины включает в себя две области – наружная (корка) и внутренняя (луб). Согласно исследованию [22] массовая доля коры по отношению к массе ствола составляет от 13,3 до 16,9% в зависимости от возраста дерева. В коре осины в среднем содержится: целлюлозы (14,8–22,7%); гемицеллюлозы (26,6–28,4%); лигнина (21,8–27,7%); экстрактивных веществ (16,2–23,9%) [23]. Экстрактивные вещества коры осины могут использоваться в качестве природного источника антиоксидантов. Экстракт горячей воды коры обладает большей антиоксидантной способностью, чем синтетический антиоксидант бутилированный гидрокситолуол (BHT).

Корковый слой состоит из пробки и других покровных слоёв, отличается зеленовато-серым цветом, гладкой текстурой поверхности, а также сравнительно небольшой толщиной. Лубяной слой коры представлен сито-видными трубками (лубянные волокна), часто желтоватого или зеленоватого цвета, более эластичный.

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

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

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

Результаты лабораторных исследований.

Определение плотности и коэффициента теплопроводности коры осины, измельчённой вручную.

На начальном этапе исследования определение коэффициента теплопроводности выполнялось для образцов, полученных путем послойной укладки полос коры с горизонтальным чередованием направления волокон, что обеспечивало моделирование структуры, максимально близкой к природному материалу. Размеры пластин составляли по ширине 30–40 мм, длине 100–250 мм и толщине 2–5 мм (рисунок 1). Далее образцы подвергались ручному измельчению с использованием секатора, в результате получали прямоугольные пластинки меньших размеров (рисунки 2–4).

Результаты определения коэффициента теплопроводности для образцов коры осины, измельчённой вручную, а также зависимости данного показателя от средней плотности материала показаны на рисунке 5.



Рисунок 1. – Кора в виде пластин
(фракция 30–40 мм)



Рисунок 2. – Кора в виде пластин
(фракция 20–30 мм)



Рисунок 3. – Кора в виде пластин
(фракция 10–20 мм)



Рисунок 4. – Кора в виде пластин
(фракция 5–10 мм)

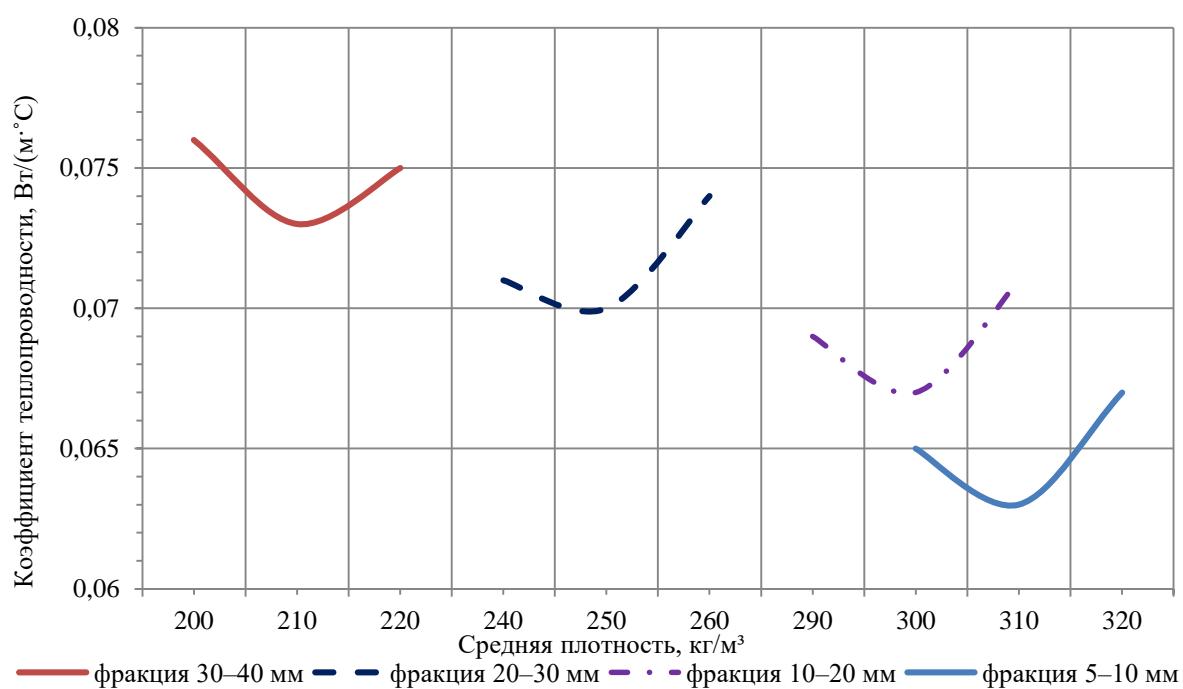


Рисунок 5. – Изменение коэффициента теплопроводности
в зависимости от средней плотности фракционированной коры осины

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить закономерности изменения коэффициента теплопроводности коры осины в зависимости от фракционного состава и средней плотности смеси. Отмечается, что для фракции 30–40 мм при увеличении средней плотности смеси с 200 до 210 кг/м³ коэффициент теплопроводности демонстрирует тенденцию к снижению, достигая минимального значения 0,073 Вт/(м·°C). Дальнейшее уплотнение материала приводит к повышению коэффициента теплопроводности. Так, при плотности 220 кг/м³ коэффициент теплопроводности равен 0,075 Вт/(м·°C).

Аналогичный характер изменения наблюдается у коры фракции 20–30 мм. В диапазоне плотностей 240–250 кг/м³ происходит незначительное снижение коэффициента теплопроводности до 0,07 Вт/(м·°C). Однако дальнейшее увеличение плотности (260 кг/м³) демонстрирует обратную тенденцию – прирост показателя на 5,7%, соответствующего 0,073 Вт/(м·°C).

В случае фракции 10–20 мм минимальное значение коэффициента теплопроводности равное 0,067 Вт/(м·°C) зафиксировано при плотности коры 300 кг/м³. Повышение средней плотности материала до 310 кг/м³ приводит к увеличению коэффициента теплопроводности на 6%, и показатель достигает значения 0,071 Вт/(м·°C).

Для фракции 5–10 мм при насыпной плотности 300 кг/м³ коэффициент теплопроводности равен 0,065 Вт/(м·°C). При плотности 310 кг/м³ коэффициент теплопроводности снижается до 0,063 Вт/(м·°C). При дальнейшем росте плотности (320 кг/м³) коэффициент теплопроводности повышается на 6,3% и равен 0,067 Вт/(м·°C).

Сопоставительный анализ минимальных значений коэффициента теплопроводности между различными фракциями показал отчётливую зависимость. При переходе от фракции 30–40 мм к фракции 20–30 мм коэффициент теплопроводности снижается на 4,1% с 0,073 Вт/(м·°C) до 0,07 Вт/(м·°C). Уменьшение фракции до 10–20 мм приводит к дальнейшему понижению на 4,3%, а при сокращении размера частиц до 5–10 мм – ещё на 6%. Таким образом, общее снижение коэффициента теплопроводности с 0,073 Вт/(м·°C) до 0,063 Вт/(м·°C) при переходе от крупной к мелкой фракции составляет 13,7%.

Анализ полученных данных показывает, что уменьшение размера частиц способствует более плотному контакту между ними и сокращению общего объёма и размеров воздушных пустот, за счёт чего повышаются теплоизоляционные свойства материала. Наиболее низкие значения коэффициента теплопроводности равного 0,063 Вт/(м·°C) достигает фракция 5–10 мм при средней плотности 310 кг/м³.

Определение гранулометрического состава механически измельчённой коры осины. В рамках экспериментальных работ проведена подготовка образцов коры осины, включающая предварительное измельчение и последующее фракционирование материала. Гранулометрическое исследование позволило выделить отдельные фракции, отличающиеся не только размером, но и формой частиц.

Для исследования влияния влажности материала на процесс разрушения коры и получения частиц разного размера, кора измельчалась в двух состояниях: высушенной до естественной влажности 5–6% и при влажности 20–30%. Гранулометрический состав по фракциям приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Гранулометрический состав коры осины после механического измельчения

Влажность коры, %	Содержание фракции, %					
	5–10 мм	2,5–5 мм	1,25–2,5 мм	0,63–1,25 мм	0,16–0,63 мм	пылевидный отсев
5–6	14,1	32,8	11,5	15,1	20,5	6
20–30	12,8	31,8	13,9	17,7	20,7	3

Из дроблённой в сухом состоянии коры максимальное количество 32,8% приходится на фракцию 2,5–5 мм. Пятая часть полученной массы приходится на фракцию 0,16–0,63 мм, а пылевидный отсев составляет 6%. Таким образом, можно отметить, что кора в сухом состоянии разрушается, как твердый хрупкий материал. На крупные фракции 2,5–10 мм приходится 46,9%, на мелкие 0,16–1,25 мм – 35,6% при разнице в 11,4%. Причём количество наиболее мелкой фракции 0,16–0,63 мм составляет 20,5%.

При повышении влажности до 20–30% фиксируется уменьшение содержания частиц фракции 2,5–10 мм. Доля фракции 2,5–5 мм несущественно понижается, а содержание средних частиц фракции 1,25–2,5 мм возрастает на 20,9%. Количество частиц фракции 0,63–1,25 мм увеличивается на 17,2%. Процентное содержание фракции 0,16–0,63 мм незначительно увеличивается, а содержание пылевидного отсева снижается в 2 раза.

Таким образом, при увеличении влажности кора разрушается с уменьшением содержания крупных фракций 2,5–10 мм и увеличением количества средних и мелких фракций. Кроме того, существенно сокращается образование пыли. Разница между количеством крупных и мелких фракций сокращается почти в 2 раза до 6,2%.

В процессе измельчения коры осины формируется неоднородная смесь отличающихся по форме частиц – фрагменты коркового слоя различной фракции и волокна луба, длиною 0,5–25 мм. Корковый слой характеризуется зернистой структурой и твердостью частиц, тогда как луб представлен волокнами, обладающими меньшей плотностью и большей гибкостью. Различие в форме и массе частиц обуславливает разное поведение компонентов при механическом воздействии и фракционировании.

После первичного рассева на фракции полученные навески представляли собой смесь зерновидных частиц корки и волокон луба. Для более точного определения соотношения этих компонентов в каждой фракции, проводился вторичный рассев для каждой фракции. При этом движение сита осуществлялось в горизонтальной плоскости. Частицы коркового слоя в виде зёрен свободно проходили через ячейки, в то время как волокна лубяного слоя оставались на поверхности сита. В результате определено процентное содержание волокон луба и зерен корки в каждой фракции, а также содержание корки и луба в пределах одной фракции (таблица 2).

Таблица 2. – Гранулометрический состав коры осины после разделения на корку и луб

Слои коры	Содержание фракции, %				
	5–10 мм	2,5–5 мм	1,25–2,5 мм	0,63–1,25 мм	0,16–0,63 мм
корка	14,3*/82,4**	33,4/77,1	12,8/68	16,6/68,3	22,9/84,1
луб	9,9/17,6	32/22,9	19,4/32	24,8/31,7	13,9/15,9

Примечание: * – доля фракции в пределах соответствующего компонента (луб или корка);

** – содержание корки или луба в данной фракции.

В составе корки фракция 2,5–5 мм является наибольшей по количеству – 33,4%, также значительное содержание 22,9% имеют частицы корки фракции 0,16–0,63 мм. На крупные фракции 2,5–10 мм приходится 47,7% частиц корки, а на мелкие фракции 0,16–1,25 мм – 39,5%.

Для волокон луба основная масса 32% и 24,8% приходится на фракции 2,5–5 мм и 0,63–1,25 мм. Наименьшее содержание 9,9% и 13,9% приходится на волокна крупной фракции 5–10 мм и мелкой фракции 0,16–0,63 мм.

Анализируя процентное содержания корки и луба, отмечается преобладание частиц корки в пределах 68–84,1% во всем исследуемом диапазоне фракций. Для фракций 1,25–2,5 мм и 0,63–1,25 мм характерно максимальное содержание волокон луба 32% и 31,7% соответственно. В мелких фракциях на волокна луба приходится от 15,9% до 31,7% от общей массы коры.

Определение плотности и коэффициента теплопроводности коры осины, измельчённой механически.

Для каждой полученной фракции коры осины определяли значения насыпной плотности структурообразующего материала, а также коэффициента теплопроводности.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить зависимости между размером частиц, плотностью структурообразующего материала и коэффициентом теплопроводности механически измельчённой коры осины (рисунок 6).

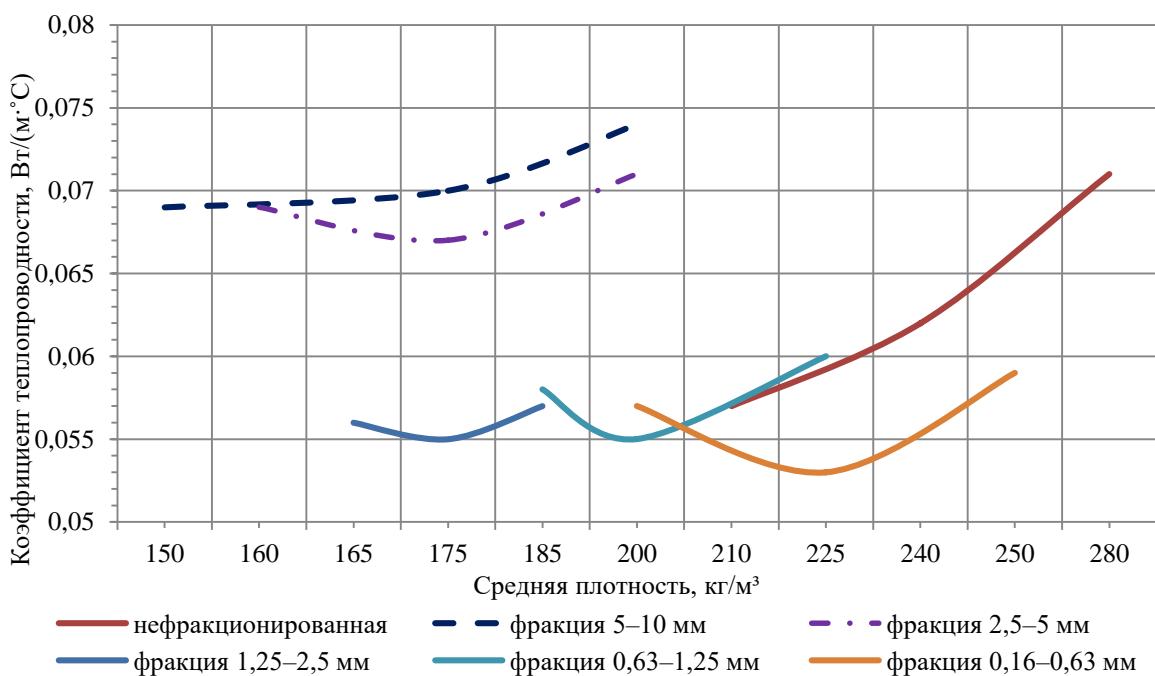


Рисунок 6. – Изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от средней плотности механически измельчённой фракционированной коры осины

В отличие от предыдущей серии испытаний, кору предварительно подвергали механическому измельчению и последующему фракционированию, что позволило получить экспериментальные составы со значительно меньшими размерами частиц.

Для нефракционированного состава наблюдается постепенное увеличение коэффициента теплопроводности при росте плотности: от 0,057 Вт/(м·°C) при 210 кг/m³ до 0,071 Вт/(м·°C) при 280 кг/m³. Повышение плотности на 33% сопровождается увеличением коэффициента теплопроводности на 24,6%, что указывает на снижение общего объема замкнутой пустотности в структуре материала. Таким образом, наименьший коэффициент теплопроводности достигается при плотности 210 кг/m³.

При изменении плотности со 150 до 175 кг/m³ фракция 5–10 мм демонстрирует практически идентичные показатели коэффициента теплопроводности, при дальнейшем увеличении плотности до 200 кг/m³ коэффициент теплопроводности равен 0,074 Вт/(м·°C), что соответствует приросту на 7,2%. Из чего следует, что более плотная укладка крупных частиц вызывает увеличение площади соприкосновения частиц в контактных точках.

Для фракции 2,5–5 мм при плотности 160 кг/m³ коэффициент теплопроводности составляет 0,069 Вт/(м·°C). Незначительное снижение коэффициента теплопроводности до 0,067 Вт/(м·°C) фиксируется при плотности 175 кг/m³. Дальнейшее повышение плотности до 200 кг/m³ влечёт увеличение коэффициента теплопроводности на 6% относительно минимального значения и достигает 0,071 Вт/(м·°C).

Коэффициент теплопроводности для фракции 1,25–2,5 мм находится в пределах 0,056–0,057 Вт/(м·°C) в граничных значениях плотностей 165–200 кг/m³. Минимальное значение коэффициента теплопроводности 0,055 Вт/(м·°C) соответствует плотности 175 кг/m³. По полученным данным видно, что для фракции 1,25–2,5 мм в сравнении с фракцией 2,5–5 мм показатели коэффициента теплопроводности значительно уменьшились на 17,9–19,7% и находятся в пределах 0,055–0,057 Вт/(м·°C).

Аналогичная зависимость наблюдается для фракции 0,63–1,25 мм. При увеличении плотности до 200 кг/m³ коэффициент теплопроводности снижается на 5,2% с 0,058 до 0,055 Вт/(м·°C). Дальнейший рост плотности до 225 кг/m³ вызывает увеличение коэффициента теплопроводности до 0,06 Вт/(м·°C), то есть наблюдается прирост на 9,1% относительно минимального значения.

Значение коэффициента теплопроводности фракции 0,16–0,63 мм при плотности 225 кг/m³ снижается на 7% относительно показателя равного 0,057 Вт/(м·°C) при плотности 200 кг/m³. При плотности 250 кг/m³ коэффициент теплопроводности повышается на 11,3% до значения 0,059 Вт/(м·°C). Таким образом, минимальное значение коэффициента теплопроводности равное 0,053 Вт/(м·°C) достигается при плотности 225 кг/m³.

Для мелких фракций 0,16–2,5 мм минимальный коэффициент теплопроводности равен 0,053–0,055 Вт/(м·°C). Однако наблюдается зависимость, что с уменьшением фракции повышается показатель плотности, соответствующий минимальному коэффициенту теплопроводности. Данная зависимость обусловлена тем, что чем мельче частицы, тем более плотная матрица формируется из структурообразующего материала, с замкнутыми пустотами минимальных размеров, а увеличение точек контактов между частицами компенсируется повышением количества замкнутых микропустот.

Исследование коэффициента теплопроводности коркового слоя коры. После отделения коркового слоя от коры осины для каждой фракции корки в насыпном состоянии определяли коэффициент теплопроводности (таблица 3).

Таблица 3. – Коэффициент теплопроводности фракций корки осины

№ состава	Размер фракции, мм	Насыпная плотность, кг/m ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
1	5–10	195	0,073
2	2,5–5	255	0,069
3	1,25–2,5	305	0,071
4	0,63–1,25	345	0,076
5	0,16–0,63	385	0,079

Анализ экспериментальных данных показал, что использование корки приводит к увеличению насыпной плотности смеси и коэффициента теплопроводности в сравнении с результатами испытаний по коре (см. таблицу 3). Для фракции 5–10 мм при насыпной плотности 195 кг/m³ коэффициент теплопроводности составляет 0,073 Вт/(м·°C). При переходе к размеру частиц 2,5–5 мм (состав 2) насыпная плотность увеличилась на 60 кг/m³, а коэффициент теплопроводности понизился на 5,5% до 0,069 Вт/(м·°C).

Насыпная плотность частиц фракции 1,25–2,5 мм достигает 305 кг/m³ и вызывает незначительное повышение коэффициента теплопроводности.

Для фракции 0,63–1,25 мм насыпная плотность равна 345 кг/m³, коэффициент теплопроводности 0,076 Вт/(м·°C). Увеличение коэффициента теплопроводности по сравнению с фракцией 1,25–2,5 мм составляет 7%, что подтверждает тенденцию на формирование более плотной структуры из корки с уменьшением фракции за счёт структурирования матрицы из плотных частиц корки с большим количеством контактных точек и сокращением количества мелких замкнутых пустот.

Мелкие частицы корки фракции 0,16–0,63 мм демонстрируют высокий коэффициент теплопроводности 0,079 Вт/(м·°C) при насыпной плотности 385 кг/м³, что на 14,5% выше показателей состава 2, имеющего минимальный показатель. Из результатов исследования коры и корки следует, что значительное влияние на понижение коэффициента теплопроводности оказывает лубяной слой коры осины.

Исследование коэффициента теплопроводности лубяного слоя коры осины. После удаления частиц коркового слоя из смеси исследовали изменение коэффициентов теплопроводности в зависимости от плотности на разных фракциях волокон луба осины. По результатам исследований построены зависимости изменения коэффициента теплопроводности от плотности для фракций волокон в диапазоне 0,16–10 мм (рисунок 7).

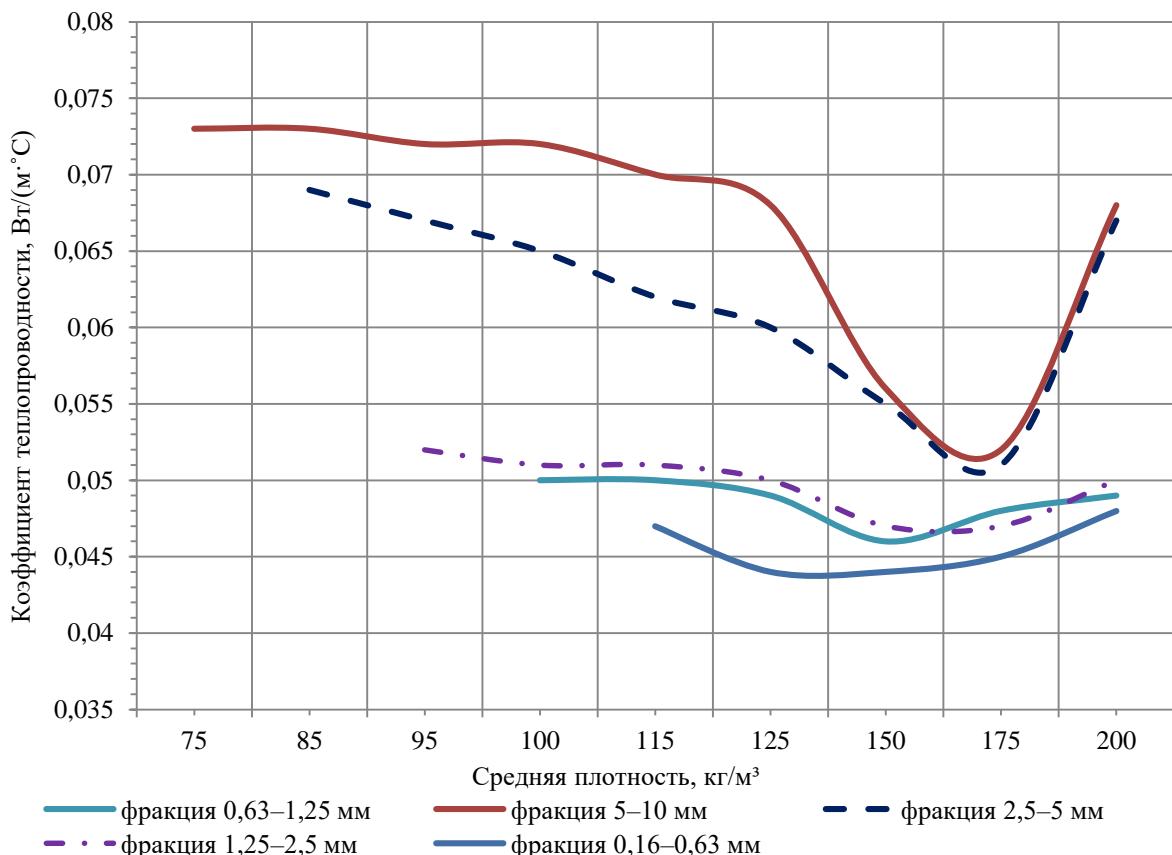


Рисунок 7. – Изменение коэффициента теплопроводности волокон луба осины в зависимости от средней плотности образцов по фракциям

По полученным зависимостям установлены общие закономерности. Повышение плотности до определённого значения обеспечивает снижение коэффициента теплопроводности, а дальнейшее повышение плотности вызывает подъём показателя. С уменьшением фракции существенно сокращается разница между максимальными и минимальными показателями коэффициента теплопроводности в исследуемом диапазоне плотностей.

Наиболее крупные волокна фракции 5–10 мм при насыпной плотности 75 кг/м³ характеризуются коэффициентом теплопроводности 0,073 Вт/(м·°C). При увеличении плотности в 2 раза коэффициент теплопроводности понижается до 0,056 Вт/(м·°C), то есть фиксируется снижение показателя на 23,3%. Коэффициент теплопроводности уменьшается на 28,8% относительно исходного показателя, достигая значения 0,052 Вт/(м·°C) при плотности 175 кг/м³. Однако дальнейшее возрастание плотности до 200 кг/м³ вызывает повышение коэффициента теплопроводности до 0,068 Вт/(м·°C), что связано с увеличением количества и площади контактных точек между волокнами с одновременным уменьшением количества и объёма замкнутых пустот при уплотнении волокнистой структуры.

Наблюдается аналогичная зависимость для фракции 2,5–5 мм. Коэффициент теплопроводности при плотности 85 кг/м³ составляет 0,069 Вт/(м·°C), тогда как при 125 кг/м³ снижается до 0,06 Вт/(м·°C), то есть на 13%. Минимальное значение коэффициента теплопроводности 0,055 Вт/(м·°C) зафиксировано при плотности 150 кг/м³, что отражает понижение показателя на 20,3% относительно исходного значения. При дальнейшем уплотнении до 200 кг/м³ коэффициент теплопроводности достигает 0,067 Вт/(м·°C).

Полученные результаты по волокнам фракции 1,25–2,5 мм отличаются отсутствием значительных изменений между максимальными и минимальными показателями коэффициента теплопроводности. От значения 0,052 Вт/(м·°C) при плотности 95 кг/м³ коэффициент теплопроводности постепенно уменьшается до 0,047 Вт/(м·°C) в диапазоне плотностей 150–175 кг/м³, что соответствует снижению на 9,6%. Дальнейшее увеличение плотности до 200 кг/м³ приводит к возрастанию коэффициента теплопроводности на 6,4%, достигая показателя 0,05 Вт/(м·°C).

Мелкие волокна фракции 0,63–1,25 мм и 0,16–0,63 мм обеспечивают минимальные значения коэффициента теплопроводности. Так, для фракции 0,63–1,25 мм коэффициент теплопроводности при насыпной плотности 100 кг/м³ составляет 0,05 Вт/(м·°C). Увеличение средней плотности структурообразующего материала до 150 кг/м³ приводит к постепенному снижению коэффициента теплопроводности на 8%, с достижением минимального показателя равного 0,046 Вт/(м·°C). Последующее повышение плотности вызывает прирост коэффициента теплопроводности на 8,6% относительно минимального значения. При плотности 115 кг/м³ волокна фракции 0,16–0,63 мм обеспечивают коэффициент теплопроводности на уровне 0,047 Вт/(м·°C), а при плотности 125 кг/м³ зафиксировано снижение до 0,044 Вт/(м·°C), что соответствует уменьшению показателя на 6,4%. Повышение плотности до 200 кг/м³ вызывает увеличение коэффициента теплопроводности до 0,048 Вт/(м·°C).

Таким образом, наилучшие показатели коэффициента теплопроводности 0,044–0,046 Вт/(м·°C) достигаются на мелких фракциях волокон луба при плотностях 125–175 кг/м³, обеспечивающих разнонаправленную ориентацию тонких волокон, формирующих развитую структуру замкнутых микропустот в матрице материала.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Согласно результатам исследований, применение крупных пластинчатых частиц коры осины в качестве утеплителя не обеспечивает высоких теплоизоляционных показателей ограждающих конструкций, так как минимальные коэффициенты теплопроводности коры соответствуют 0,063–0,074 Вт/(м·°C) при плотности 200–320 кг/м³.

2. Проведённые исследования гранулометрического состава показали, что наилучшие условия механического измельчения коры осины обеспечиваются при влажности материала 20–30%, при которой увеличивается доля средних и мелких фракций, а также минимизируется образование пылевидных частиц.

3. Эксперименты с механически измельчённой корой осины позволили установить, что для фракции 0,63–1,25 мм при плотности 200 кг/м³ наименьший коэффициент теплопроводности равен 0,056 Вт/(м·°C), а для фракции 0,16–0,63 мм при плотности 225 кг/м³ коэффициент теплопроводности соответствует 0,053 Вт/(м·°C). Полученные показатели коэффициента теплопроводности свидетельствуют о недостаточно эффективной изолирующей способности механически измельчённой коры осины.

4. Минимальные значения коэффициента теплопроводности коркового слоя коры осины равные 0,069–0,071 Вт/(м·°C) зафиксированы при насыпной плотности структурообразующего материала 255–305 кг/м³. Полученные результаты выше минимальных значений коэффициента теплопроводности измельчённой коры осины на 20,3–30,1%, что указывает на низкую теплоизолирующую способность коркового слоя.

5. Наибольший теплоизолирующий эффект достигается на тонких волокнах фракции 0,16–0,63 мм и 0,63–1,25 мм лубяного слоя коры. При плотности волокон 125–175 кг/м³ теплоизоляционные составы обеспечивают коэффициент теплопроводности на уровне 0,044–0,046 Вт/(м·°C), что на 17–17,9% ниже минимальных показателей измельчённой коры осины. По результатам исследований, волокна луба коры осины могут рассматриваться как перспективное природное сырьё для получения эффективных теплоизоляционных композитов.

ЛИТЕРАТУРА

- Шакель Е.Ю., Рессоха Е.В. Развитие «зеленого» строительства в Республике Беларусь // Повышение качества жизни и обеспечение конкурентоспособности экономики на основе инновационных и научно-технических разработок: сборник статей VII Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения – 2024», Минск, 3–5 декабря 2024 г.: в 3 т. – Минск: БГТУ, 2024. – Т. 3. – С. 365–368.
- Кисель Е.И., Срываина Л.Г. Перспективы развития «зеленого» строительства в Республике Беларусь // Актуальные проблемы современных экономических систем – 2022: сборник научных трудов / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; редкол.: А.Г. Проровский и др. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 86–92.
- Потаев Г.А., Сысоева В.А. Современное состояние и перспективы развития «зеленого» градостроительства в Республике Беларусь // Архитектура: сборник научных трудов. – 2018. – Вып. 11. – С. 116–123.
- Lisowski P., Glinicki M.A. Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 57–74. DOI: 10.1007/s13399-023-05192-8.
- A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources / M. Ouda, A.A. Abu Sanad, A. Abdelaal et al. // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 16. – P. 2876.
- Lisowski P., Glinicki M.A. Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 57–74.
- Živković V., Novosel A., Krstić H. Innovative Solutions: Comparative Study of Laboratory and In Situ Measurements of Thermal Properties of Bark Insulated Exterior Walls // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 5. – P. 810. DOI: 10.3390/buildings15050810.
- Enhanced resistance to fire of the bark-based panels bonded with clay / E.M. Tudor, C. Scheriau, M.C. Barbu et al. // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 16. – P. 5594. DOI: 10.3390/app10165594.
- Pásztor Z., Ronyecz I. The thermal insulation capacity of tree bark // Acta Silvatica et Lignaria Hungarica. – 2013. – Vol. 9. – P. 111–117.
- Giannatas G., Kamperidou V., Barboutis I. Tree bark utilization in insulating bio-aggregates: a review // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2021. – Vol. 15, № 6. – P. 1989–1999. DOI: 10.1002/bbb.2291.
- Substantial bark use as insulation material / G. Kain, M.C. Barbu, A. Teischinger et al. // Forest Products Journal. – 2012. – Vol. 62, № 6. – P. 480–487.

12. Thermophysical Properties of Larch Bark Composite Panels / L. Kristak, I. Ruziak, E.M. Tudor et al. // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 2287. DOI: 10.3390/polym13142287.
13. Salthammer T., Mentese S., Marutzky R. Formaldehyde in the Indoor Environment // Chemical Reviews. – 2010. – Vol. 110, № 4. – P. 2536–2572. DOI: 10.1021/cr800399g.
14. Formaldehyde carcinogenicity research: 30 years and counting for mode of action, epidemiology, and cancer risk assessment / J.A. Swenberg, B.C. Moeller, K. Lu et al. // Toxicologic Pathology. – 2013. – Vol. 41, № 2. – P. 181–189. DOI: 10.1177/0192623312466459.
15. Binderless Thermal Insulation Panels Made of Spruce Bark Fibres / J. Gößwald, M.-C. Barbu, A. Petutschnigg et al. // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 1799. DOI: 10.3390/polym13111799.
16. Using bark as heat insulation material / G. Kain, M.C. Barbu, S. Hinterreiter et al. // Bioresources. – 2013. – № 8. – C. 3718–3731.
17. Insulation panels made from thermally modified bark / Z. Pásztor, D. Tsalagkas, N. Horváth et al. // Acta silvatica et lignaria hungarica: an international journal in forest, wood and environmental sciences. – 2019. – Vol. 15, № 1. – P. 23–34. DOI: 10.2478/aslh-2019-0002.
18. Bark based porous materials obtained with a simple mechanical foaming procedure / M. Busquets Ferrer, A. Solt-Rindler, O. Vay et al. // European Journal of Wood and Wood Products. – 2023. – Vol. 81. – P. 61–71. DOI: 10.1007/s00107-022-01856-w.
19. Efficient Bio-Based Insulation Panels Produced from Eucalyptus Bark Waste / C. Fuentealba, C. Segovia, M. Pradella-Miquel et al. // Forests. – 2024. – Vol. 15, № 9. – P. 1628. DOI: 10.3390/f15091628.
20. Обромпальский Р.Л., Бакатович А.А., Бакатович Н.В. Основные характеристики тепловой изоляции, содержащей берёзовую бересту // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электрон. сб. ст. VI междунар. науч. конф., Новополоцк, 30–31 окт. 2024 г. / Полоцк. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: Д.Н. Лазовский (председ.) и др. – Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – С. 227–231.
21. Бакатович А.А., Обромпальский Р.Л. Оценка эффективности березовой коры по физическим показателям в качестве сырьевого источника для производства тепловой изоляции // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2024. – № 2. – С. 24–30. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-24-30.
22. Дейнеко И.П., Фаустова Н.М. Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // Химия растительного сырья. – 2015. – № 1. – С. 51–62.
23. Clonal variation in the bark chemical properties of hybrid aspen: Potential for added value chemicals / P. Korkalo, R. Korpinen, E. Beuker et al. // Molecules. – 2020. – Vol. 25, № 19. – P. 4403.

REFERENCES

1. Shakel' E.Y., Rossokha E.V. Razvitie «zelenogo» stroitel'stva v Respublike Belarus' // Povyshenie kachestva zhizni i obespechenie konkurentosposobnosti ekonomiki na osnove innovatsionnykh i nauchno-tehnicheskikh razrabotok: sbornik statei VII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Minskie nauchnye chteniya – 2024», Minsk, 3–5 dekabrya 2024 g.: v 3 t. – Minsk: BGTU, 2024. – T. 3. – S. 365–368. (In Russ.).
2. Kisel' E.I., Sryvkina L.G. Perspektivnye razvitiya «zelenogo» stroitel'stva v Respublike Belarus' // Aktual'nye problemy sovremennykh ekonomicheskikh sistem – 2022: sbornik nauchnykh trudov / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet; redkol.: A.G. Prorovskii i dr. – Brest: BrGTU, 2022. – S. 86–92. (In Russ.).
3. Potaev G.A., Sysoeva V.A. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya «zelenogo» gradostroitel'stva v Respublike Belarus' // Arkhitektura: sbornik nauchnykh trudov. – 2018. – Vyp. 11. – S. 116–123. (In Russ.).
4. Lisowski P., Glinicki M.A. Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 57–74. DOI: 10.1007/s13399-023-05192-8.
5. A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources / M. Ouda, A.A. Abu Sanad, A. Abdelaal, A. Krishna, M. Kandah, J. Kurdi // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 16. – P. 2876.
6. Lisowski P., Glinicki M.A. Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 57–74.
7. Živković V., Novosel A., Krstić H. Innovative Solutions: Comparative Study of Laboratory and In Situ Measurements of Thermal Properties of Bark Insulated Exterior Walls // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 5. – P. 810. DOI: 10.3390/buildings15050810.
8. Enhanced resistance to fire of the bark-based panels bonded with clay / E.M. Tudor, C. Scherian, M.C. Barbu, R. Réh, L. Krišták, T. Schnabel // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 16. – P. 5594. DOI: 10.3390/app10165594.
9. Pásztor Z., Ronyecz I. The thermal insulation capacity of tree bark // Acta Silvatica et Lignaria Hungarica. – 2013. – Vol. 9. – P. 111–117.
10. Giannatos G., Kamperidou V., Barboutis I. Tree bark utilization in insulating bio-aggregates: a review // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2021. – Vol. 15, № 6. – P. 1989–1999. DOI: 10.1002/bbb.2291.
11. Substantial bark use as insulation material / G. Kain, M.C. Barbu, A. Teischinger, M. Musso, A. Petutschnigg // Forest Products Journal. – 2012. – Vol. 62, № 6. – P. 480–487.
12. Thermophysical Properties of Larch Bark Composite Panels / L. Kristak, I. Ruziak, E.M. Tudor, M.C. Barbu, G. Kain, R. Reh // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 2287. DOI: 10.3390/polym13142287.
13. Salthammer T., Mentese S., Marutzky R. Formaldehyde in the Indoor Environment // Chemical Reviews. – 2010. – Vol. 110, № 4. – P. 2536–2572. DOI: 10.1021/cr800399g.
14. Formaldehyde carcinogenicity research: 30 years and counting for mode of action, epidemiology, and cancer risk assessment / J.A. Swenberg, B.C. Moeller, K. Lu, J. E. Rager, R. C. Fry, T. B. Starr // Toxicologic Pathology. – 2013. – Vol. 41, № 2. – P. 181–189. DOI: 10.1177/0192623312466459.
15. Binderless Thermal Insulation Panels Made of Spruce Bark Fibres / J. Gößwald, M.-C. Barbu, A. Petutschnigg, E.M. Tudor // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 1799. DOI: 10.3390/polym13111799.
16. Using bark as heat insulation material / G. Kain, M.C. Barbu, S. Hinterreiter, K. Richter, A. Petutschnigg // Bioresources. – 2013. – № 8. – C. 3718–3731.

17. Insulation panels made from thermally modified bark / Z. Pásztor, D. Tsalagkas, N. Horváth, Z. Börcsök // *Acta silvatica et lignaria hungarica: an international journal in forest, wood and environmental sciences.* – 2019. – Vol. 15, № 1. – P. 23–34. DOI: 10.2478/aslh-2019-0002.
18. Bark based porous materials obtained with a simple mechanical foaming procedure / M. Busquets Ferrer, A. Solt-Rindler, O. Vay, C. Hansmann, W. Gindl-Altmutter // *European Journal of Wood and Wood Products.* – 2023. – Vol. 81. – P. 61–71. DOI: 10.1007/s00107-022-01856-w.
19. Efficient Bio-Based Insulation Panels Produced from Eucalyptus Bark Waste / C. Fuentealba, C. Segovia, M. Pradena-Miquel, A.G. César // *Forests.* – 2024. – Vol. 15, № 9. – P. 1628. DOI: 10.3390/f15091628.
20. Obrompal'skii R.L., Bakatovich A.A., Bakatovich N.V. Osnovnye kharakteristiki teplovoi izolyatsii, soderzhashchei berezovuyu berestu // *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii [Elektronnyi resurs]: elektron. sb. st. VI mezhdunar. nauch. konf., Novopolotsk, 30–31 okt. 2024 g.* / Polotsk. gos. un-t im. Evfrosinii Polotskoi; red-kol.: D.N. Lazovskii (predsed.) i dr. – Novopolotsk: Polotsk. gos. un-t im. Evfrosinii Polotskoi, 2025. – S. 227–231. (In Russ.).
21. Bakatovich A.A., Obrompal'skii R.L. Otsenka effektivnosti berezovoi kory po fizicheskim pokazatelyam v kachestve syr'evogo istochnika dlya proizvodstva teplovoi izolyatsii // *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Priladnye nauki.* – 2024. – № 2. – S. 24–30. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-24-30. (In Russ., abstr. in Engl.).
22. Deineko I.P., Faustova N.M. Elementnyi i gruppovoyi khimicheskii sostav kory i drevesiny osiny // *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* – 2015. – № 1. – S. 51–62. (In Russ.).
23. Clonal variation in the bark chemical properties of hybrid aspen: Potential for added value chemicals / P. Korkalo, R. Korpinen, E. Beuker, T. Sarjala, J. Hellström, J. Kaseva, T. Jyske // *Molecules.* – 2020. – Vol. 25, № 19. – P. 4403.

Поступила 16.12.2025

INFLUENCE OF FRACTIONAL COMPOSITION AND AVERAGE DENSITY ON THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF PROCESSED ASPEN BARK

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

The article studies the granulometric composition of aspen bark, crushed in a dry and moist state, and determines the percentage content of bast fibers and bark particles by fraction. The effect of the fractional composition and average density of structure-forming materials from aspen bark, including bark particles and bast fibers, on the thermal conductivity of the resulting compositions is studied. It was found that the greatest thermal insulation effect is achieved with thin fibers of 0.5–2.5 mm in length, fractions of 0.16–0.63 mm and 0.63–1.25 mm of the bast layer of the bark. With an aspen bark bast fiber density of 125–175 kg/m³, the thermal insulation compositions provide a thermal conductivity of 0.044–0.046 W/(m·°C).

Keywords: thermal conductivity coefficient, density, aspen bark, bast, rind.

УЧЁТ «СТЕСНЁННОЙ» ДИЛАТАНСИИ ПРИ ПОВЫШЕНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ОСНОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИБРЫ

канд. техн. наук, доц. Т.М. УЛАСИК, Л.Ю. МЕДВЕДЕВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

В статье представлен анализ причин повышения несущей способности искусственного основания, дисперсно армированного фиброй. Приведены сравнительные характеристики проявления дилатансии в грунтовом массиве. Сделан акцент на поведение используемого материала (фибры конкретной конфигурации) при формировании напряжения сдвига на контактной поверхности армирующего элемента. Рассматриваются условия, при которых контактная поверхность фибры соотносится с процентным содержанием фибры в определённом объёме грунта. Выявлены основные закономерности проявления «стесненной» дилатансии несвязного грунта при контакте с волокнами, реализующими контактное трение в основании будущей конструкции.

Ключевые слова: фибра, дисперсное армирование, стеклопластиковая арматура, «стесненная» дилатансия, дилатантные напряжения, напряжение сдвига, контактное трение, контактная поверхность, несвязный грунт, несущая способность.

Введение. Площадки строительства будущих сооружений не всегда отвечают требованиям проектируемых на них сооружений и могут быть представлены массивом грунта, общий модуль деформации которого E_0 не удовлетворяет расчету фундаментных конструкций на определение вероятной осадки. В строительной практике применяют различные инженерные решения, ведущие к повышению несущей способности основания. Например: глубинное уплотнение, которое практикуют при наличии слабых, малопрочных грунтов; механическое уплотнение с использованием трамбовок; виброуплотнение; использование вяжущих смесей и др. [1, с. 158]. Особый интерес представляет метод дисперсного армирования несвязного грунта с использованием армирующего элемента в виде фибры¹, изготовленной из стеклопластика. Каждая из названных технологий имеет свою стоимость в зависимости от объёмов выполняемых работ, которая формируется из наличия оборудования, механизмов и материалов. Фибра, как армирующий элемент, отличается легкостью, простотой в применении. Важно понимать, как работает фибра в искусственном основании и что позволяет существенно повлиять на увеличение несущей способности основания при её применении.

Основная часть. Механизм реализации контактного трения по поверхности армирующего элемента в виде фибры. В монографии профессора Соболевского Д.Ю. [2], посвящённой проявлению дилатансии в несвязном грунте, указывается на то, что армирование в грунте направлено на «...упрочнение его в направлениях потенциальных сдвигов» [2, с. 179]. Таким образом, когда в искусственный массив вводят армирующие элементы в виде фибры, располагающейся в этом массиве хаотично, мы предполагаем, что число этих сдвигов будет соответствовать месту расположения каждого отдельного армирующего элемента – фибры. В совместных работах коллег [3–5], подробно рассмотрен процесс реализации контактного трения в условиях «стеснения».

Соболевский Д.Ю. подчеркивает, что повышение несущей способности грунта, армированного каким-либо способом, «...обеспечивается при выполнении двух условий: напряжения сдвига на контактных поверхностях не должны превышать своего предельного значения; напряжения сдвига не должны вызывать разрыва самих армоэлементов...» [2, с. 173]. В соответствии с нормативными требованиями к армоэлементам² для обеспечения максимального эффекта упрочнения грунта общий модуль упругости армирующего элемента $E_{0,s}$ должен быть существенно (как правило, на два порядка) больше модуля деформации упрочняемого (вмещающего) грунта $E_{0,g}$. На рисунке 1 показано, как выглядит фибра в реальности.

Компонент упрочняемого исходного (вмещающего) грунта должен обеспечивать улучшение его прочностных и деформативных свойств. Армирующие элементы размещают в упрочняемом грунте дисперсно в виде дискретных коротких фибр по всему армированному объему грунта. Все это и будет соответствовать одному из вышеуказанных условий.

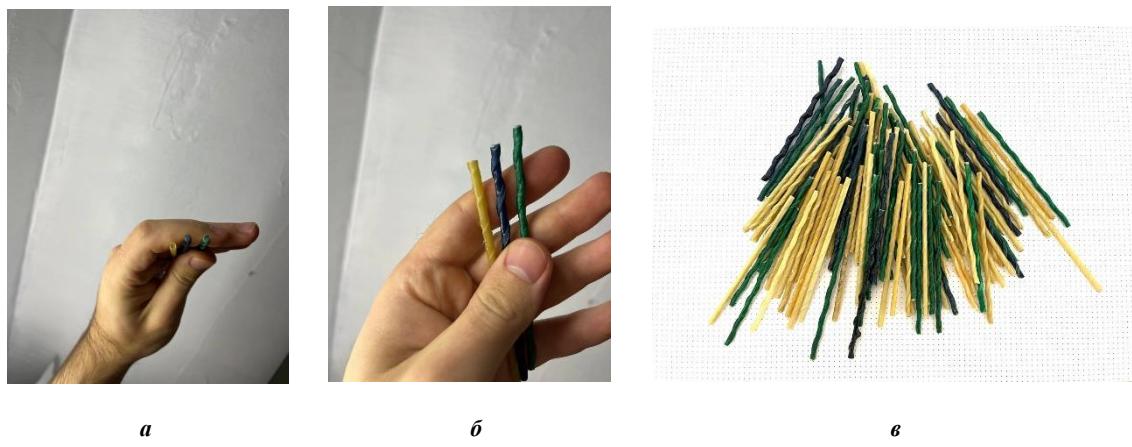
В грунтовом массиве находятся рассеянные в определенном объеме фибры и каждая из них имеет определенную величину поверхности, контактирующую с грунтом. В соответствии с исследованиями [2, с. 71] предельное контактное сопротивление сдвига в несвязном грунте определяется:

$$\tau_u = \sigma_{no} \operatorname{tg}\varphi + \Delta\sigma_d \operatorname{tg}\varphi, \quad (1)$$

где σ_{no} – начальное нормальное напряжение;
 φ – угол внутреннего трения грунта;
 $\Delta\sigma_d$ – дилатантное напряжение.

¹ ТКП 45-5.01-268-2012 (02250). Основания и сооружения из армированного грунта. Правила проектирования и устройства. – Введ. 01.05.2013. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2012. – 49 с.

² См. сноска 1.



*a – демонстрируется сечение фибры; б – показаны размер и очертания фибры;
в – фибра в россыпи*

**Рисунок 1. – Фибра из стеклопластиковой арматуры периодического профиля
(фото предоставлены аспирантом кафедры «Геотехника и строительная механика» Медведевым Л.Ю.)**

Обозначим дилатантное напряжение, формирующееся при контакте с фиброй, $\Delta\sigma'_d$ и оценим качественное и количественное проявление дилатансии в определённом грунтовом массиве. В этом случае мобилизованное контактное трение будет определяться по формуле 2:

$$\tau_d = \Delta\sigma'_d \operatorname{tg}\phi. \quad (2)$$

В исследованиях [2, с. 51] были получены результаты приращения нормального напряжения при формировании сдвигов вдоль контактной поверхности в различных условиях. В таблице 1 показаны сравнительные, интерпретированные с использованием [2, с. 198–200] к нашим исследованиям.

**Таблица 1. – Интерпретация результатов исследований поведения несвязанных грунтов
в условиях объёмного стеснения**

Ширина поверхности сдвига, м	Наименование грунта	Угол внутреннего трения грунта, град	Дилатантное напряжение $\Delta\sigma'_d$, КПа	Мобилизованное контактное трение τ_d , КПа
0,025	Песок мелкий, плотный	28	54	30
0,05		28	101	56
0,1		30	199	115
0,025	Песок средней крупности, средней плотности	28	65	36
0,05		28	130	72
0,1		30	251	145
0,025	Песок крупный, плотный	28	117	65
0,05		28	234	130
0,1		30	448	259

Приведенные в таблице 1 вычисленные значения дилатантного напряжения, возникающие в несвязном грунте при наличии армирующих элементов, имеющих размеры, соотносимые с размерами поверхности сдвига (фибра имеет длину 100 мм), указывают на возможность возникновения $\Delta\sigma'_d$, за счет которого и возникает контактное трение на поверхности фибры. Указанное в таблице 1 дилатантное напряжение может рассматриваться отдельно для каждого армирующего элемента. Очевидно, что чем крупнее фракции грунта, тем значение этого распорного, действующего перпендикулярно к поверхности армированного элемента, дилатантного напряжения больше.

Профессор Соболевский Д.Ю. отмечает, что «физическим свойством, связывающим прочность и деформативность зернистой среды, является дилатансия» [2, с. 100]. Повышение несущей способности основания неизменно связано с общим модулем деформации E_o , а также с изменением структуры массива грунта, при наличии в нем определенных включений, естественного (например, крупные зёрна гравия, щебень) и искусственного характера (армирующие элементы). Реальные условия применения фибры, как армирующего элемента, могут быть охарактеризованы разнородным составом окружающего грунта, включающего в себя и крупные зёрна грунта и мелкую фракцию. Процесс возникновения дилатантных напряжений связан будет непосредственно с контактной поверхностью фибры, с её ориентацией в объёме грунта. В работах [6–8] описаны условия проявления «стеснённой» дилатансии в массиве грунта и именно подобные условия возникают при внедрении фибры в искусственное основание.

В [5–8] указывается, что работает не только контактная поверхность, но и грунты искусственных оснований, которые, как правило, обеспечивают высокие значения по контактной поверхности армирующего элемента и которые представляют собой крупнообломочный материал. И главным в процессе армирования будет совместная работа фибры как армирующего элемента и грунта, в котором развиваются распорные $\Delta\sigma_d'$ дилатантные напряжения.

Важным фактором формирования распорных напряжений является одна из характеристик физического состояния грунта – влажность [2, с. 60], присутствие которой в несвязном грунте приводит к падению эффекта зацепления зёрен друг за друга и за контактную поверхность. Оптимальной влажностью, при которой ещё реализуется зацепление зёрен грунта, является влажность 8%. При этом любой несвязный грунт можно оценить по степени влажности $S_r \leq 0,5$ как маловлажный³. Увеличение влажности работает в массиве грунта как смазка, которая препятствует полноценному зацеплению зёрен и полной реализации контактного трения. Мобилизованное контактное трение может снижаться на 10% и более, если грунт переходит в насыщенное водой состояние и S_r может находиться в диапазоне от 0,8 до 1. В готовом искусственном основании распорные напряжения будут реализованы уже на стадии подготовки основания, когда ведется разравнивание грунта и его уплотнение. Нагрузка на массив в этом случае вертикальная. Принимая условно форму фибры в виде цилиндра с диаметром 4 мм и длиной 100 мм (на поверхности фибры присутствует также спиральная обмотка, хорошо заметная на рисунке 1), можно определить, какую площадь поверхности сдвига будет иметь один армирующий элемент и его некоторое количество. Соотнесём это с объёмом грунта, например, в 1 м³ и, определив количество фибр в указанном объёме, спрогнозируем, какую общую площадь сдвига будут иметь все указанные фибры при различных вариантах армирования, включающем некое процентное соотношение объема грунта и самой фибры. Простой расчет показывает, что количество фибр в 1 м³ может составить до 64 шт., при равномерном распределении. На одном из объектов строительства в г. Витебске применялась технология дисперсного армирования⁴, процент фибры в объёме грунта в 1 м³ составил 0,1%. На рисунке 2 показано соотношение общей контактной поверхности фибры S для случаев физического нахождения её в объёме грунта (в 1 м³) в количестве U, равном 0,1; 0,2 и 0,3% от общего объёма.

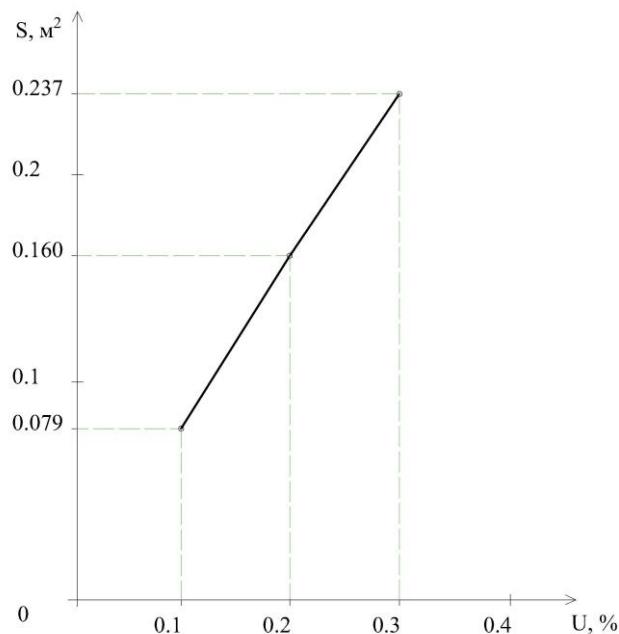


Рисунок 2. – Соотношение площади контактной поверхности фибры S и ее процентного содержания в грунте U

Если в армировании массива используется фибра (арматура композитная стеклопластиковая), у которой наружный диаметр составляет 8,2 мм (без учёта оплеточной нити), при длине в 152 мм, то, следовательно, в этом случае площадь контактной поверхности для одной фибры возрастает практически втрое. Для различных модификаций фибры характерно включение в процесс зацепления зёрен грунта спиральной обмотки, имеющейся на поверхности каждого армирующего элемента.

В соответствии со свойствами фибры она способна выдерживать высокие температуры (до 200 °C), а предел прочности при поперечном срезе 195,4 МПа, что указывает не только на высокую прочность, но и возможность фибры работать как армирующий элемент, при разном расположении в грунте, где гарантированно (данные

³ Грунты. Классификация [Classification of soils]. – Минск: Стройтехнорм, 2019. – 40 с. – См. стр. 14.

⁴ См. сноску 1.

таблицы 1) развиваются значительно меньшие контактные напряжения. В таблице 2 приведены некоторые промышленные характеристики (от изготовителя по «Техническому Свидетельству ТС 01.5251.24 о пригодности материалов и изделий для применения в строительстве») фибры (арматуры композитной стеклопластиковой) диаметром 8,2 мм.

Таблица 2. – Отдельные показатели арматуры композитной стеклопластиковой АКС8

Наименование показателя	Обозначение ТНПА, устанавливающего методы испытаний (особые условия)	Фактически полученные значения
Масса 1 м.п., г	СТБ ISO 15630-1	98,6
Плотность, г/см ³	ГОСТ 15139	2,02
Временное сопротивление разрыву, МПа	СТБ 1103 ГОСТ 11262	1329
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	СТБ 1103 ГОСТ 4648	1180

Производство работ на одном из объектов строительства в г. Витебске с использованием фибры показано на рисунке 3. Фибра отсыпана в грунт для дальнейшего устройства основания.



Рисунок 3. – Возвведение искусственного основания с применением фибры
(фото предоставлено аспирантом кафедры «Геотехника и строительная механика» Медведевым Л.Ю.)

Используемая для армирования фибра обладает разносторонними характеристиками (см. таблицу 2), которые предполагают её интенсивное использование в связи с небольшой массой, прочностью и долговечностью работы в основании, в том числе и с учётом экологической безопасности применяемого армирующего материала.

Заключение. Проведенные нами расчёты и анализ поведения армирующих элементов в виде фибры в искусственном основании показывают, что повышение несущей способности основания включает ряд факторов:

1. Применяемые в практике возведения искусственных оснований армирующие элементы в виде фибры различных модификаций обладают контактной поверхностью, позволяющей реализовать контактное трение в виде дилатантного напряжения $\Delta\sigma'_d$ (см. таблицу 1).
2. Влажность грунтового массива является одним из определяющих факторов для развития мобилизованного контактного трения τ_d (см. таблицу 1).
3. Максимальная реализация контактного трения происходит в диапазоне характеристики степени влажности $S_r \leq 0,5$.
4. Простота использования арматуры композитной стеклопластиковой указывает на возможность реализации проектов по улучшению свойств грунтовых оснований с учетом гранулометрического состава несвязанного вмещающего грунта.
5. Вмещающий грунт можно дополнить гравием, песком крупным, щебнем для более полной реализации зацепления зёрен грунта и увеличения значений контактного трения на поверхности армирующих элементов в виде фибры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пойта П.С. Шведовский П.В., Клебанюк Д.Н. Основания и фундаменты: учебное пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 2020. – 400 с.
2. Соболевский Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.

3. Уласик Т.М. Влияние «стесненной» дилатанции на несущую способность свайных фундаментов // Вестник Полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 30–33.
4. Уласик Т.М., Балыш А.В. Моделирование работы одиночной буронабивной сваи в условиях дополнительного «стеснения» // Вестник Полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 43–48.
5. Соболевский Д.Ю., Попов О.В. Сопротивление сдвига несвязного грунта по боковой поверхности инъекционных анкеров и свай // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала: межвуз. сб. научн. тр. – Пермь, 1987. – С. 78–85.
6. Popov O. The influence of diameter of injection piles on contact friction in non-cohesive soils // Prog. 3-rd International Geotechnical Conference on Soil Mech. and Found. Engin. – Bratislava, 1997. – Р. 113–114.
7. Sobolevsky D.Y. Strength of Dilating Soil and Load-Holding Capacity of Deep Foundations. – Rotterdam: Taylor & Francis, 1995. – 243 p.
8. Соболевский Д.Ю., Уласик Т.М., Балыш А.В. Влияние объёма «стеснения» несвязного грунта на контактное сопротивление по боковой поверхности одиночной буронабивной сваи // Проблемы современного бетона и железобетона: сборник научных трудов. – Вып. 10. – Минск: Колосград, 2018. – С. 250–260.

REFERENCES

1. Poyta, P.S., Shvedovsky, P.V., & Klebanyuk, D.N. (2020). *Base and foundations: a Textbook*. Minsk: Higher School. (In Russ.).
2. Sobolevsky, D.Y. (1994). *Prochnost I nesushchay sposobnost dilatiruyshchego grunta [Strength and load bearing capacity of the dilating soil]*. Minsk: Navuka I tekhnika. (In Russ.).
3. Ulasik, T.M. (2015). Vliyanie «stesnennoi» dilatansii na nesushchuyu sposobnost' svainykh fundamentov. *Herald of Polotsk State University*, (16), 30–33. (In Russ.).
4. Ulasik, T.M., & Balysh, A.V. (2017). Modelirovanie raboty odinochnoi buronabivnoi svai v usloviyakh dopolnitel'nogo «stesneniya». *Herald of Polotsk State University*, (8), 43–48. (In Russ.).
5. Sobolevsky, D.Y., & Popov, O.V. (1987). Soprotivlenie sdvigu nesvyasnogo grunta po bokovoy poverkhnosti inektsionnykh ankerov i svay [Resistance to shear of non-cohesive soil along the lateral surface of injection anchors and piles]. In *Bases and foundations in the geological conditions of the Urals (78–85)*. Perm. (In Russ.).
6. Popov, O. (1997). The influence of diameter of injection piles on contact friction in non-cohesive soils. In *Prog. 3-rd International Geotechnical Conference on Soil Mech. and Found. Engin* (113–114). Bratislava.
7. Sobolevsky, D.Y. (1995). *Strength of Dilating Soil and Load-Holding Capacity of Deep Foundations*. Rotterdam: Taylor & Francis.
8. Sobolevsky, D.Y., Ulasik, T.M., & Balysh, A.V. (2018). The influence of the volume of "constraint" of cohesionless soil on the contact resistance along the lateral surface of a single bored pile. In *Collection of scientific papers "Problems of modern concrete and reinforced concrete", Issue 10* (250–260). Minsk: Kolorgrad. (In Russ.).

Поступила 15.12.2025

INCREASING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF ARTIFICIAL FOUNDATIONS USING FIBER

T. ULASIK, L. MEDVEDEV
(Belarusian National Technical University, Minsk)

This article presents an analysis of the factors that increase the bearing capacity of an artificial foundation reinforced with dispersed fiber. Comparative characteristics of dilatancy in soil are presented. Emphasis is placed on the behavior of the material used (fibers of a specific configuration) during the formation of shear stress on the contact surface of the reinforcing element. The conditions under which the fiber contact surface relates to the percentage of fiber in a given soil volume are considered. The main patterns of "constrained" dilatancy in cohesionless soil are identified when in contact with fibers, which mediate contact friction in the foundation of the future structure.

Keywords: fiber, dispersed reinforcement, fiberglass reinforcement, “constrained” dilatancy, dilatant stresses, shear stress, contact friction, contact surface, non-cohesive soil, bearing capacity.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЕНОВЫХ БЛОКОВ ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ

А.Н. ЯГУБКИН, канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Статья посвящена определению влияния влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы. Для образцов в эксикаторах получены изотермы сорбции водяного пара. Установлена кинетика сорбции водяных паров образцами различных составов. Построены зависимости коэффициента теплопроводности от влажности разработанного и запатентованного стенового материала. Для зависимостей выполнена аппроксимация линейной функцией с высоким коэффициентом корреляции. По результатам мониторинга стеновых блоков, находящихся под прямым атмосферным воздействием, сделано заключение о долговечности. Результаты исследования могут использоваться для учёта влияния влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность при подборе составов для производства строительных блоков из растительного сырья, а также в качестве материала для учебного процесса строительных специальностей высших и среднеспециальных учебных заведений.

Ключевые слова: растительное сырье, пшеничная солома, стеновой материал, средняя плотность, сорбция, эксикатор, влажность, коэффициент теплопроводности, мониторинг, долговечность.

Введение. В современной динамически развивающейся экономике Республики Беларусь, подверженной действиям санкций, особую актуальность приобретают производства со 100% локализацией, использующие быстро возобновляемые экологически чистые материалы. Кроме того, после окончания срока службы такого материала или изделия из него он должен легко и безопасно утилизироваться. К таким материалам, несомненно, относится пшеничная солома. А в качестве изделия из неё выступают стеновые блоки на цементном вяжущем.

Однако большинство исследователей материалов на растительном сырье [1–4] говорят о том, что для надежной и долговечной эксплуатации, отсутствия плесени и грибков влажность материала должна составлять не более 15%.

В статье выполнена первая попытка представить результаты о влиянии влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы, которые были разработаны и запатентованы в Полоцком государственном университете имени Евфросинии Полоцкой^{1,2,3}.

Объект исследования – теплопроводность и долговечность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе.

Предмет исследования – влияние влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе.

Практическая значимость заключается в учёте влияния влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность при подборе составов для производства строительных блоков из цементного вяжущего и растительного сырья, а также в возможности применения результатов исследования в качестве материала для учебного процесса строительных специальностей высших и среднеспециальных учебных заведений.

Материалы и методы исследований. Пшеничную солому (д. Черноручье-1, Республика Беларусь) как структурно образующий материал добавляли в форме пластин фракции длиной от 10 до 50 мм. Фракционирование выполняли на измельчителе «Алькор-1» (Китайская Народная Республика). В работе использовался портландцемент марки 42,5Н ГОСТ 30108-2020, ПЦ500Д0 (выпущенный на ОАО «Белорусский цементный завод», г. Костюковичи, Республика Беларусь). В качестве химической добавки применяли гиперпластификатор «Frem S-SB» на поликарбоксилатной основе (произведена на ЗАО «Завод добавок и смазок «ФРЭЙМ», Республика Беларусь). Мелким заполнителем выступил песок по ГОСТ 8736-2014. Водопроводной водой, соответствующей требованиям СТБ 1114⁴, затворяли смеси для изготовления образцов и блоков.

¹ ТУ BY 300220696.063-2023. Блоки строительные конструкционно-теплоизоляционные на растительном заполнителе. Технические условия. – Введ. 06.06.2023. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2023. – 11 с.

² Конструкционно-теплоизоляционный материал: Евразийский патент №048617. – Опубл. 19.12.2024. – М.: Евразийская патентная организация, 2024. – 3 с.

³ Строительный конструкционно-теплоизоляционный материал: Евразийский патент №047578. – Опубл. 08.08.2024. – М.: Евразийская патентная организация, 2024. – 3 с.

⁴ СТБ 1114-98. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. – Введ. 01.01.99. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь; РУП «Стройтехнорм», 1998. – 20 с.

Для взвешивания пшеничной соломы, цементного вяжущего, песка, воды затворения, образцов и блоков применяли весы марки МТ 15 В1ЖА (Российская Федерация). Химическую добавку и образцы для определения сорбционной влажности отвешивали на весах лабораторных марки ВК-300 (Российская Федерация).

Для определения размеров образцов при расчётах средней плотности, определении коэффициента теплопроводности использовали штангенциркуль цифровой ШЦЦ-1 (Российская Федерация).

Средняя плотность определялась на образцах-кубах с размером ребра 150 мм в соответствии с ГОСТ 12730.1⁵. Коэффициент теплопроводности измеряли с помощью прибора ИТП-МГ4 «250» (Российская Федерация) на основании СТБ 1618⁶. При этом образцы размером 250×250×40 мм предварительно высушивались в сушильном шкафу SNOL 60/300 (Литва) до постоянной массы.

Для определения сорбционной влажности образцы-кубики с размером ребра 20 мм выпиливались из блоков, затем высушивались до постоянной массы и помещались в эксикаторы. В эксикаторах искусственно создавалась паровоздушная среда с целью обеспечения относительной влажности воздуха в пределах 40–97%, для этого применяли химический раствор серной кислоты с разной концентрацией.

В первые 2 месяца испытаний образцы взвешивали каждые 15 дней, а затем каждые 10 дней до достижения постоянной массы и определяли их влажность. Температура воздуха в эксикаторах и лаборатории составляла +20±0,5°C.

Влияние влажности на коэффициент теплопроводности определяли по методике⁷. Согласно этой методике зависимость коэффициента теплопроводности от влажности получается по зависимости (1).

$$\lambda_w = \lambda \cdot (1 + k \cdot W), \quad (1)$$

где λ – теплопроводность высушенного до постоянной массы образца, Вт/(м·°C);

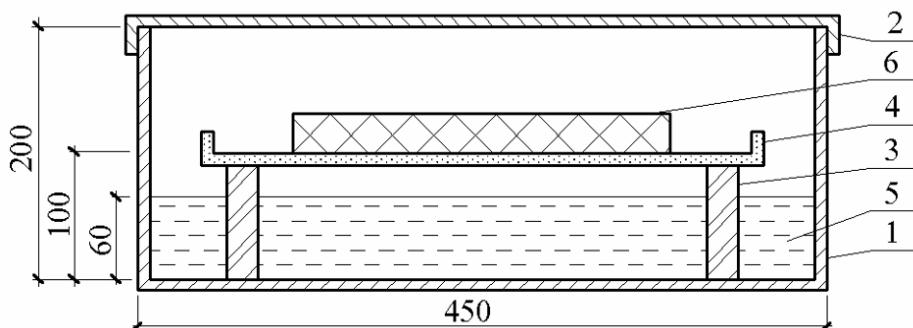
W – весовая влажность образца исследуемого материала (влагосодержание), %;

k – коэффициент, определяемый для каждого теплоизоляционного материала экспериментальным путем.

Составы образцов для испытаний представлены в таблице 1. Средняя плотность образцов в сухом состоянии для состава 1 равна 950 кг/м³, для состава 2 составила 1335 кг/м³. Коэффициент теплопроводности для образца состава 1⁸ равен 0,08 Вт/(м·°C), для образца состава 2⁹ составил 0,225 Вт/(м·°C). После этого образцы погружали в герметичные камеры с водой, залитой ниже уровня плиты на 40 мм (рисунок 1).

Таблица 1. – Составы образцов для проведения испытаний

Шифр состава	Расход цемента, кг на 1 м ³	Расход песка, кг на 1 м ³	Расход воды, кг на 1 м ³	Расход соломы, кг на 1 м ³	В/Ц	Вид и расход добавки, % от массы цемента
1	625	–	375	225	0,6	Frem S-SB, 1,5
2	400	800	300	100	0,75	Frem S-SB, 1,5



1 – емкость для заливки воды; 2 – крышка для герметизации; 3 – пластиковые стойки;
4 – пластиковая сетка; 5 – вода; 6 – образец для испытаний

Рисунок 1. – Схема установки для оценки влияния влажности на коэффициент теплопроводности

⁵ ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. – Введ. 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 5 с.

⁶ СТБ 1618-2006. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме. – Введ. 01.07.2006. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь; РУП «Стройтехнорм», 2006. – 12 с.

⁷ Рубашкина, Т.И. Исследование эффективности современных утеплителей в многослойных ограждающих конструкциях зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Рубашкина Татьяна Ивановна. – Чита, 2009. – 152 л. – См. стр. 137.

⁸ См. сноску 2.

⁹ См. сноску 3.

Согласно методике¹⁰ выдержку образцов над водой осуществляли в течение 2, 5, 10, 25 и 60 суток. Для определения средней плотности и коэффициента теплопроводности образцы извлекались из камер через указанные интервалы времени. Эти интервалы показывают характерные изменения влажности и коэффициента теплопроводности в изучаемых образцах.

Ограничения исследования связаны в основном с погрешностями приборов и оборудования, а также с вариацией при определении средней плотности. При этом погрешность весов лабораторных марки ВК-300 составила $\pm 0,015$ г, для весов МТ 15 В1ЖА равнялась ± 2 г, штангенциркуль цифровой ШЦЦ-І имел погрешность $\pm 0,03$ мм, погрешность прибора ИТП-МГ4 «250» соответствовала $\pm 5\%$. Для оборудования стабильность температуры сушильного шкафа SNOL 60/300 по данным производителя не превышала $\pm 1^{\circ}\text{C}$. При определении средней плотности образцов и блоков коэффициент вариации равнялся 10%.

Основная часть. Цель исследований – определение влияния влажности на теплопроводность и долговечность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- определение сорбционной влажности образцов стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе;
- определение влияния влажности на теплопроводность образцов блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе;
- заключение о влиянии состава и влажности на долговечность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе.

На рисунках 2–3 приведены изотермы сорбции и кинетика сорбции водяных паров при различной относительной влажности воздуха.

При относительной влажности воздуха 40% в экскаторе в течение первых 15 суток значение показателя сорбционной влажности образца состава 2 равнялось 1,6%, что меньше на 19%, чем у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,1 раза показатель образца состава 2 (2,0%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 2,4%, а у состава 2 – 2,2%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 9% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 2,4% в возрасте 70 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 2,6% через 70 суток.

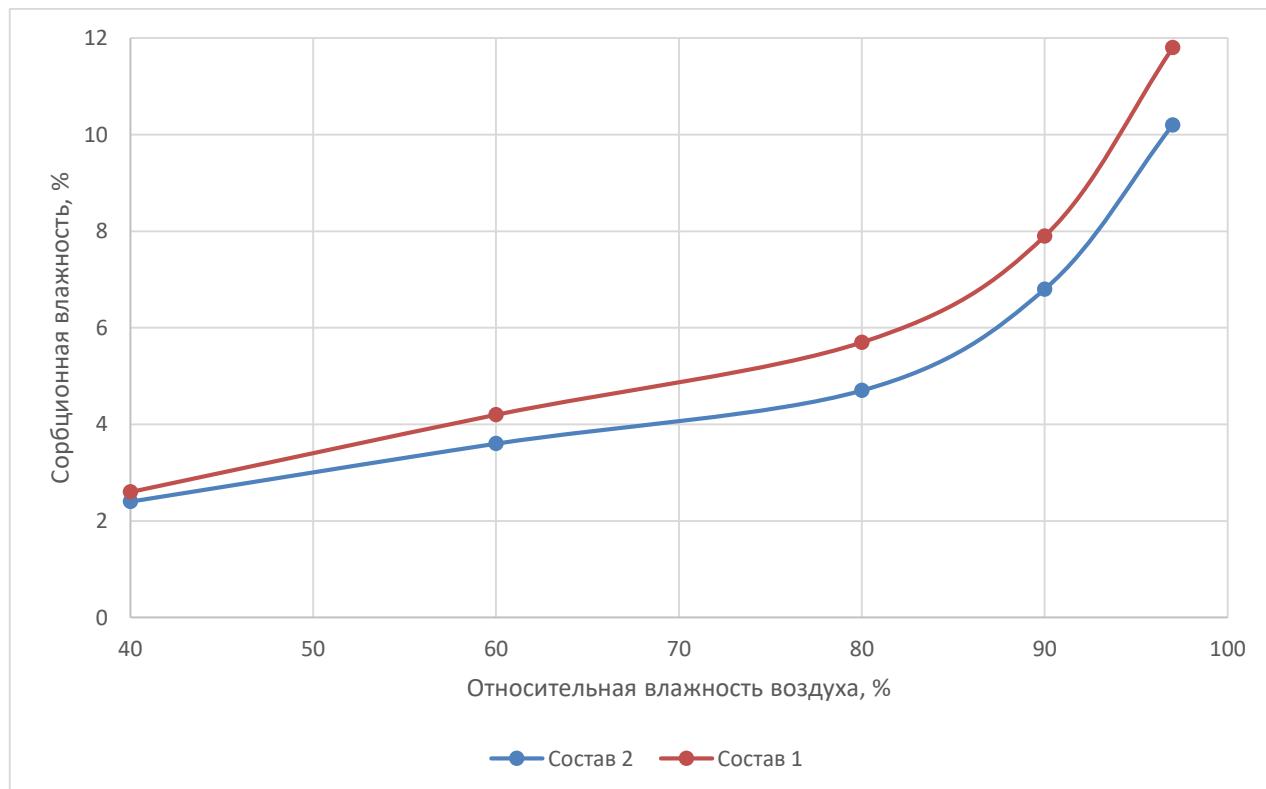


Рисунок 2. – Изотермы сорбции водяного пара

¹⁰ См. сноска 7.

Выдержка образцов при относительной влажности воздуха 60% в эксикаторе показала, что в первые 15 суток сорбционная влажность образца стенового материала состава 2 составила 2,4%, что на 17% меньше, чем у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,1 раза показатель образца состава 2 (3,2%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 3,9%, а у состава 2 – 3,3%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 15% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 3,6% в возрасте 70 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 4,2% через 80 суток.

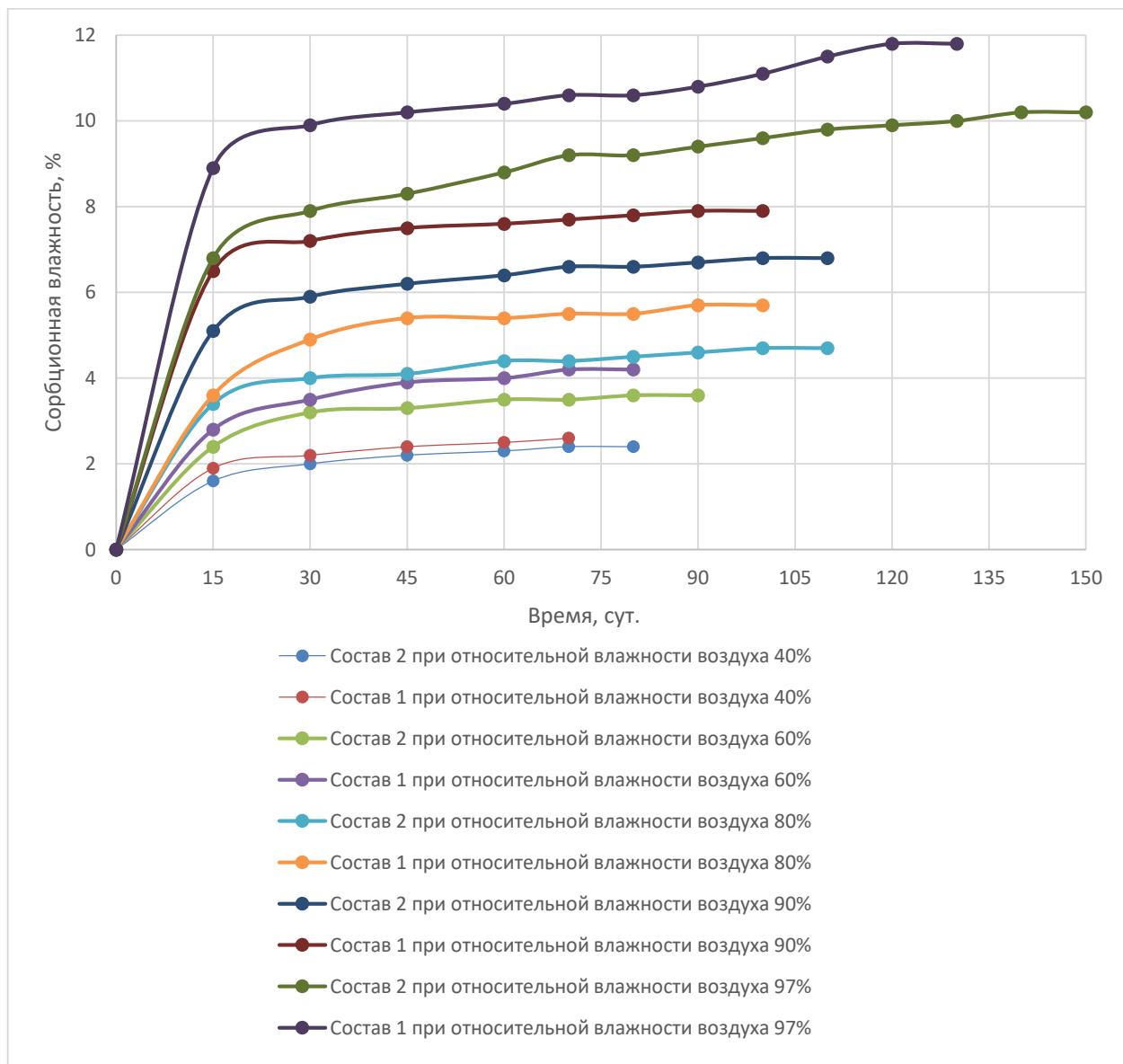


Рисунок 3. – Кинетика сорбции водяных паров образцами

При относительной влажности воздуха 80% в эксикаторе в течение первых 15 суток значение показателя сорбционной влажности образца состава 2 равнялось 3,4%, что меньше на 6%, чем у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,2 раза показатель образца состава 2 (4,0%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 5,4%, а у состава 2 – 4,1%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 23% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 4,7% в возрасте 100 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 5,7% через 70 суток.

Выдержка образцов при относительной влажности воздуха 90% в эксикаторе показала, что в первые 15 суток сорбционная влажность образца стенового материала состава 2 составила 5,1%, что на 27% меньше чем

у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,22 раза показатель образца состава 2 (5,9%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 7,5%, а у состава 2 – 6,2%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 19% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 6,8% в возрасте 100 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 7,9% через 90 суток.

При относительной влажности воздуха 97% в эксикаторе в течение первых 15 суток значение показателя сорбционной влажности образца состава 2 равнялось 6,8%, что меньше на 30%, чем у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,25 раза показатель образца состава 2 (7,9%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 10,2%, а у состава 2 – 8,3%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 18% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 10,2% в возрасте 140 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 11,8% через 120 суток.

Результаты лабораторных испытаний влияния влажности на теплопроводность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Показатели влажных образцов различных составов

№ образца	Время выдерживания образца в установке, сутки	Показатели влажного образца			Коэффициент изменения теплопроводности образца
		Средняя плотность, кг/м ³	Влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	
Состав 1					
1	2	968	1,9	0,085	1,06
2	5	983	3,5	0,093	1,16
3	10	1012	6,5	0,101	1,26
4	25	1043	9,8	0,107	1,34
5	60	1049	10,4	0,112	1,40
Состав 2					
1	2	1358	1,7	0,235	1,04
2	5	1378	3,2	0,263	1,17
3	10	1404	5,2	0,273	1,21
4	25	1438	7,7	0,289	1,28
5	60	1452	8,8	0,297	1,32

На основании данных эксперимента, приведенных в таблице 2, построены графики зависимостей (рисунки 4, 5) коэффициентов изменения теплопроводности от влажности образцов. По графикам с помощью линейной аппроксимации получены эмпирические зависимости 2–3 для составов 1, 2 соответственно:

$$\lambda_w = \lambda \cdot (1,0088 + 0,0365 \cdot W); \quad (2)$$

$$\lambda_w = \lambda \cdot (1,0095 + 0,0366 \cdot W). \quad (3)$$

Выполненный анализ зависимостей, приведённых на рисунках 4–5, показывает, что коэффициент изменения теплопроводности образца стенового блока на цементном вяжущем и пшеничной соломе от влажности аппроксимируется линейной функцией с коэффициентами корреляции $R^2 = 0,9818$ (состав 1) и $R^2 = 0,9637$ (состав 2).

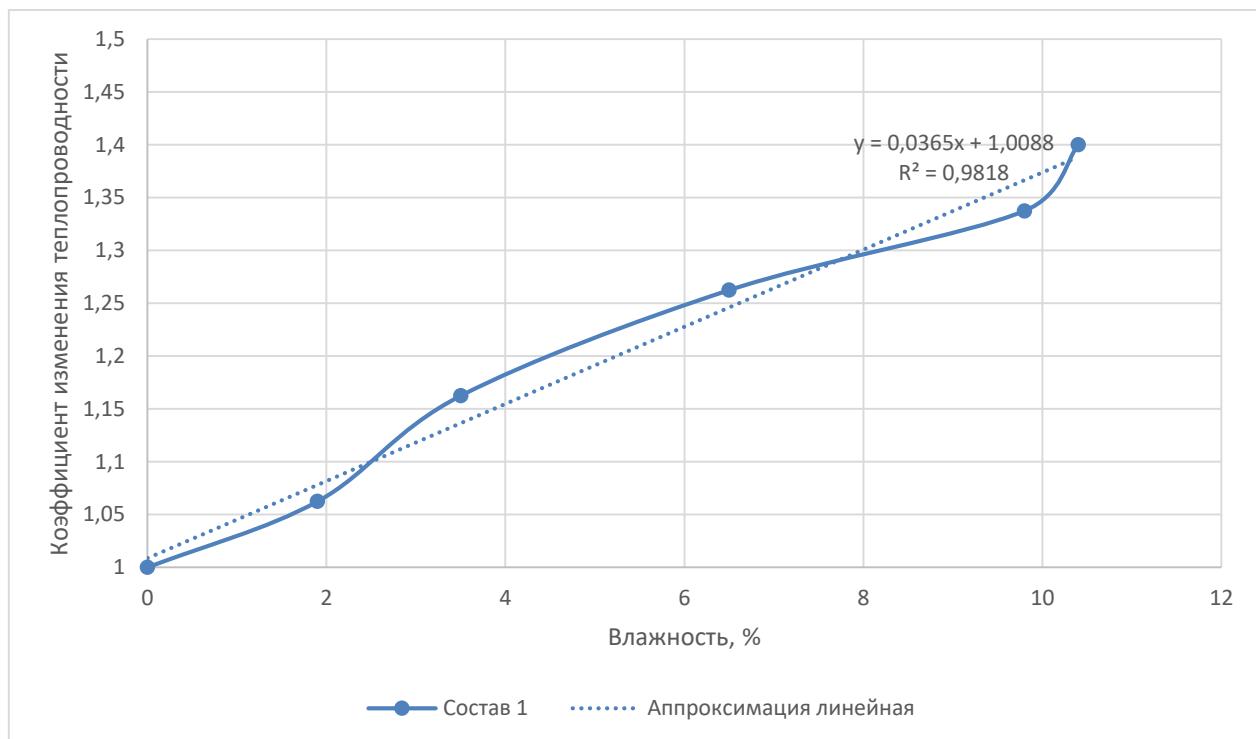


Рисунок 4. – График зависимости коэффициента изменения теплопроводности от влажности образца из стенового блока (состав 1)

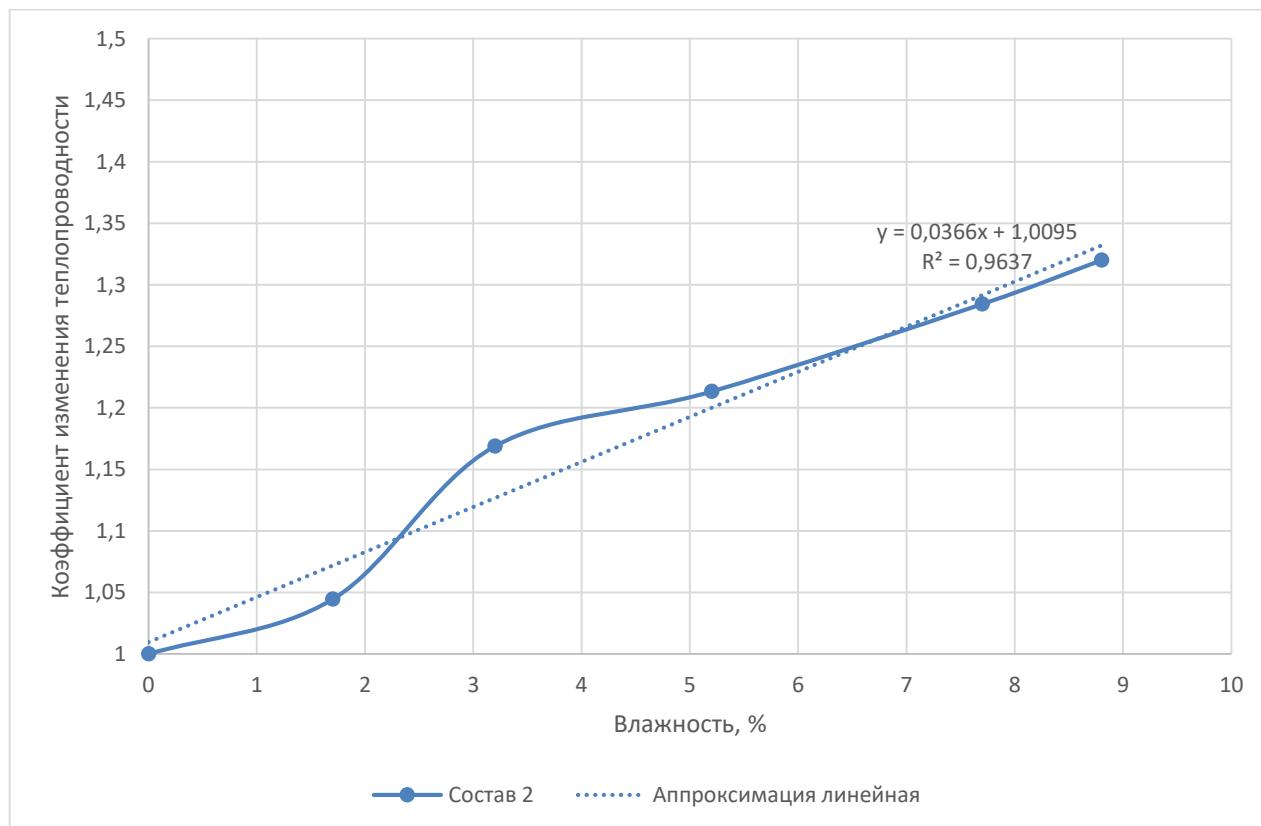


Рисунок 5. – График зависимости коэффициента изменения теплопроводности от влажности образца из стенового блока (состав 2)

На рисунке 6 представлены фотографии блоков (составы 1, 2), находящихся под прямым атмосферным воздействием (деревня Жихари Полоцкий район, Витебская область, Республика Беларусь) в течение 7 лет (с 2018 г.).



Рисунок 6. – Блоки под прямым атмосферным воздействием (составы 1, 2)

На основании выполненного мониторинга сделано заключение о влиянии состава и влажности на долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы, которое приведено ниже.

Заключение. Максимальная сорбционная влажность образцов блоков из пшеничной соломы составляет не более 12% по массе и достигается в течение 130–150 суток. Процессы гниения в пшеничной соломе по данным научных исследований начинаются при влагосодержании 15% по массе и выше. Таким образом, разработанные составы блоков из пшеничной соломы позволяют избежать процессов разложения в процессе эксплуатации.

Представленные эмпирические зависимости позволяют прогнозировать изменение коэффициента теплопроводности от влажности при эксплуатации зданий. Влажностный режим работы стеновых блоков – необходимое условие для обеспечения долговечности и её оценки. Зависимости могут использоваться для проектирования стеновых ограждений зданий различного назначения.

Мониторинг, проводимый в течении последних 7 лет, показывает, что блоки, расположенные на открытой бетонной площадке и подвергающиеся постоянным атмосферным воздействиям, находятся в хорошем работоспособном состоянии. Следы разрушения блоков по массиву материала не наблюдаются, что позволяет сделать заключение о высокой долговечности блоков на разработанных и запатентованных составах.

ЛИТЕРАТУРА

- Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications / M. Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha et al. // Materials. – 2014. – № 7. – P. 3034–3048. DOI: 10.3390/ma7043034.
- Rotz C.A., Muck R.E. Changes in Forage Quality During Harvest and Storage // Forage Quality, Evaluation, and Utilization. – 1994. – Chapter 20. – P. 828–868. DOI: 10.2134/1994.foragequality.c20.
- Martinson K., Coblenz W., Sheaffer C. The Effect of Harvest Moisture and Bale Wrapping on Forage Quality, Temperature, and Mold in Orchardgrass Hay // Journal of Equine Veterinary Science. – 2011. – № 31(12). – P. 711–716. DOI: 10.1016/j.jevs.2011.05.003.
- Moisture and Storage Effects on Dry Matter and Quality Losses of Alfalfa in Round Bales / M. Collins, W. H. Paulson, M. F. Finner et al. // American Society of Agricultural Engineers. – 1987. – № 30(4). – P. 913–917. DOI: 10.13031/2013.30498.

REFERENCES

- Bouasker, M. Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications / M. Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha, M. Al-Mukhtar // Materials. – 2014. – № 7. – P. 3034–3048. DOI: 10.3390/ma7043034.
- Rotz, C.A., Muck, R.E. Changes in Forage Quality During Harvest and Storage // Forage Quality, Evaluation, and Utilization. – 1994. – Chapter 20. – P. 828–868. DOI: 10.2134/1994.foragequality.c20.
- Martinson, K., Coblenz, W., Sheaffer, C. The Effect of Harvest Moisture and Bale Wrapping on Forage Quality, Temperature, and Mold in Orchardgrass Hay // Journal of Equine Veterinary Science. – 2011. – № 31(12). – P. 711–716. DOI: 10.1016/j.jevs.2011.05.003.
- Collins, M. Moisture and Storage Effects on Dry Matter and Quality Losses of Alfalfa in Round Bales / M. Collins, W. H. Paulson, M. F. Finner, N. A. Jorgensen, C. R. Keuler // American Society of Agricultural Engineers. – 1987. – № 30(4). – P. 913–917. DOI: 10.13031/2013.30498.

Поступила 30.11.2025

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF HUMIDITY ON THE THERMAL CONDUCTIVITY
AND DURABILITY OF WALL BLOCKS MADE OF WHEAT STRAW**

A. YAGUBKIN, A. BAKATOVICH
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

This article examines the influence of humidity on the thermal conductivity and durability of wheat straw wall blocks. Water vapor sorption isotherms were constructed for samples placed in desiccators. The kinetics of water vapor sorption by samples of various compositions were determined. The dependences of thermal conductivity on humidity for the developed and patented wall material were obtained. These dependences were approximated by a linear function with a high correlation coefficient. Based on the results of monitoring wall blocks exposed directly to the atmosphere, a conclusion was reached regarding their durability. The results of the study can be used to take into account the influence of humidity on the thermal conductivity coefficient and durability when selecting compositions for the production of building blocks from plant-based raw materials, as well as a material for the educational process of construction specialties in higher and secondary specialized educational institutions.

Keywords: plant material, wheat straw, wall material, average density, sorption, desiccator, humidity, thermal conductivity coefficient, monitoring, durability.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504.5:662.998

DOI 10.52928/2070-1683-2025-43-4-68-75

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ АЭРОЗОЛЯМИ ИСКУССТВЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТ ИЗОЛИРОВЩИКОМ НА ТЕРМОИЗОЛЯЦИИ

A.A. ЗУЕВА¹⁾, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА²⁾(¹) Филиал «Новополоцкое управление ОАО «Белтеплоизоляция»,(²) Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)²⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5025-7419>

Предложены способы снижения эмиссии в окружающую среду аэрозоля преимущественно фиброгенного действия искусственных минеральных волокон с целью защиты изолировщиков на термоизоляции при проведении теплоизоляционных работ, внедрение которых позволит понизить уровень профессионального риска и предотвратить развитие профессиональных и производственно обусловленных заболеваний при выполнении указанных видов строительно-монтажных работ. Предлагаемый комплекс технических мероприятий для снижения пылевой нагрузки на изолировщика на термоизоляции включает использование современных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, с добавлением связующих веществ, снижающих пылеобразование; применение специальных увлажнителей или антипылящих растворов для предварительной обработки материалов; использование систем тонкодисперсного распыления воды в рабочих зонах; установку мобильных вытяжных систем или локальной аспирации, применение электроножей с вытяжкой пыли; использование респираторов с фильтрами класса Р3 для защиты органов дыхания; применение портативных устройств для замеров концентраций пыли в воздухе рабочей среды в реальном времени.

Ключевые слова: загрязнение окружающей среды, теплоизоляционные работы, минеральная вата, аэрозоль фиброгенного действия, изолировщик на термоизоляции.

Введение. Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду в строительстве жилых и промышленных зданий, тепловых агрегатов и трубопроводов широко используют различные теплоизоляционные материалы, которые характеризуются малой плотностью и низкой теплопроводностью. Наиболее широкое распространение получили неорганические теплоизоляционные материалы, такие как минеральная и стеклянная вата. В частности, при проведении теплоизоляционных работ в промышленности для изоляции горячих поверхностей технологических трубопроводов и промышленного оборудования в большинстве случаев применяют минеральную вату, имеющую структуру ваты и изготовленную из расплава горной породы, шлака и стекла. На этапе монтажа изолировщиками на термоизоляции волокнистых теплоизоляционных изделий из минеральной и стеклянной ваты оказывается прямое воздействие на окружающую среду мелкодисперсными твёрдыми частицами кремнийсодержащих волокон в виде аэрозоля преимущественно фиброгенного действия. В процессе укрепления минеральной ваты объем выброса пылевых частиц волокон минеральной ваты доходит до 2,8 г/с, при среднем диаметре волокон 2...9 мкм количество микроскопических взвешенных пылевых частиц в одном м³ воздуха варьируется в диапазоне от 50 тыс. до 300 тыс.¹ [1–9]. При этом пылевым частицам минеральной ваты, находящимся во взвешенном состоянии в местах проведения теплоизоляционных работ, свойственна неправильная форма, имеются как обломки сферических тел, так и волокнистой структуры отдельных частиц с твердыми острыми краями, что можно заметить на рисунке 1 [10].

Ввиду того, что в процессе укладки и монтажа (демонтажа) минеральной ваты выделившаяся мелкодисперсная пыль не оседает в атмосфере продолжительное время, пылевые частицы в виде аэрозолей преимущественно фиброгенного действия загрязняют не только рабочую зону изолировщика на термоизоляции, но и воздушную среду вблизи источника выделения. Форма и дисперсность взвешенных частиц пыли минеральной ваты определяет глубину проникновения в дыхательные пути, физико-химическую активность и патогенность, провоцируя при хроническом ингаляционном воздействии развитие профессиональных патологий: воспалений и фиброза легких, пылевого бронхита, пневмокониозов, рака легких и др. [2; 11]. Кроме того, из теплоизоляционных материалов при проведении работ по изоляции в окружающую среду могут попадать другие вредные вещества, обусловленные наличием в рецептуре связующих компонентов на основе фенолоформальдегидных и карбамидных смол. В связи с этим, при проведении изоляционных работ с применением изделий на основе стеклянного или минерального волокна контролируют содержание фенола по предельно допустимой концентрации вредных веществ

¹ AUB-DRW-10305-D. AUB Umweltdeklaration. Unkaschierte bzw. Unbeschichtete Kunstharsgebundene Steinwolle-Dammstoffe. Königswinter: Arbeitsgemeinschaft Umweltvertragliches Bauprodukt e.V. – 2005. – 14 p. URL: www.bau-umwelt.com.

в воздухе рабочей зоны ($\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$), которая составляет $0,3 \text{ мг}/\text{м}^3$, и мелкодисперсных твёрдых частиц аэрозоля преимущественно фиброгенного действия стеклянного или минерального волокна $\text{ПДК}_{\text{р.з.}} - 4 \text{ мг}/\text{м}^3$. При этом содержание пыли минеральной ваты в воздухе рабочей зоны изолировщика на термоизоляции в процессе укладки и монтажа (демонтажа) теплоизоляционных материалов зачастую превышает $\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$ до 4 раз [12–16]. В связи с этим разработка эффективных способов снижения эмиссии в окружающую среду частиц минеральной и стеклянной ваты при проведении теплоизоляционных работ с учётом особенностей технологического процесса, обеспечение безопасных условий труда изолировщика на термоизоляции является в настоящее время актуальной и социально значимой проблемой, что и определило цель настоящего исследования.

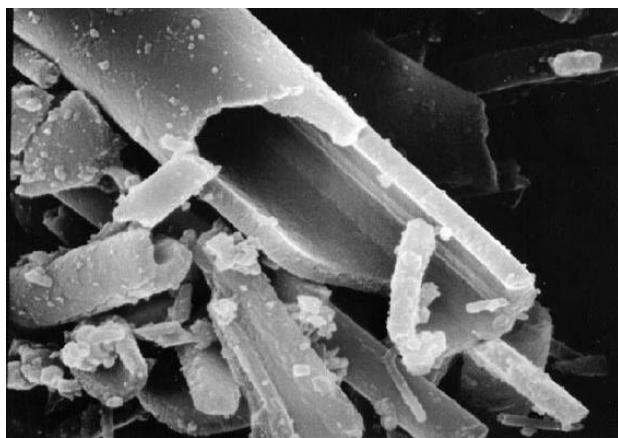


Рисунок 1. – Обломки теплоизоляционных материалов – волокон минеральной ваты под цифровым микроскопом [10]

Основная часть. Анализ условий труда изолировщика на термоизоляции при проведении теплоизоляционных работ позволил установить этапы трудового процесса с максимальным выделением мелкодисперсной пыли в воздух рабочей зоны, которая воздействует в сочетании с вынужденным неудобным рабочим положением тела, интенсивной физической нагрузкой и неблагоприятными метеорологическими условиями окружающей среды:

- на начальном этапе транспортировки и распаковки пакетов прошивных из минеральной ваты на изолировщика воздействие пыли незначительно (не превышает $\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$);
- на этапе замеров, подгонки и вырезки необходимой заготовки пакетов прошивных из минеральной ваты, образующаяся пыль оказывает более значительное влияние: при нарезании строительным ножом для теплоизоляционных материалов целостность структуры пакета нарушается и твердые микроскопические пылевые частицы аэрозоля преимущественно фиброгенного действия в значительном количестве распыляются в воздухе рабочей зоны, попадая на одежду работника, кожу, слизистые оболочки и в дыхательные пути (по данным замеров, превышая $\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$ от 1,8 раза до 3,1 раза);
- на этапе монтажа теплоизоляционного материала из минеральной ваты изолировщик на термоизоляции переносит формованный материал на рабочую поверхность оборудования, трубопровода либо иной конструкции, и укладывает его, закрепляя проволочными кольцами, данный процесс характеризуется наибольшим пылевыделением в воздух рабочей зоны (по данным замеров, превышая $\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$ до 4,2 раза);
- этап разборки и демонтажа устаревшей тепловой изоляции при текущем ремонте оборудования и трубопроводов заключается во вскрытии покровного слоя тепловой изоляции и удалении непригодного для дальнейшей эксплуатации теплоизоляционного слоя, который под воздействием высоких температур и факторов окружающей среды утратил первоначальные свойства (теплопроводность, целостность, плотность, влажность, сжимаемость, содержание связующих веществ и др.). При разборке и демонтаже поврежденный материал в значительной степени распыляется в воздухе рабочей зоны, в особенности при вскрытии покровного слоя, и твердые микроскопические пылевые частицы оказывают существенное воздействие на изолировщика (концентрация пыли волокнистых теплоизоляционных материалов превышает $\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$).

В этой связи необходимо предусмотреть комплекс мероприятий, которые смогут послужить устойчивому снижению влияния пылевой нагрузки на изолировщика на термоизоляции в процессе производства теплоизоляционных работ. При этом важно предусмотреть, чтобы изменение условий труда, при реализации предложенных мероприятий, не способствовало возникновению новых профессиональных рисков.

Предлагается комплекс технических мероприятий для снижения пылевой нагрузки на изолировщика на термоизоляции в процессе производства теплоизоляционных работ, отвечающих современным требованиям безопасности, а именно:

- использование современных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, с добавлением связующих веществ, снижающих пылеобразование (жидкая изоляция; аэрогель-материалы; изоляционное покрытие в видеnano-краски, структурированного силикона и эвакуированных керамических микросфер);

- применение специальных увлажнителей или антипыляющих растворов для предварительной обработки материалов;
- использование систем тонкодисперсного распыления воды в рабочих зонах для связывания частиц пыли в воздухе, создающих мелкодисперсный туман, состоящий из капель воды размером от 5 до 50 микрон, которые захватывают частицы пыли, увеличивая их массу, что приводит к их оседанию на поверхности или на землю;
- установка мобильных вытяжных систем или локальной аспирации, которая удаляет пыль непосредственно на рабочем месте, а также применение электроножей с вытяжкой пыли;
- использование респираторов с фильтрами класса Р3 для защиты дыхательных путей;
- применение портативных устройств для замеров концентраций пыли в воздухе рабочей среды в реальном времени, которые позволят своевременно принимать меры по снижению пылевой нагрузки на работника.

Рассмотрим предлагаемые технические мероприятия подробнее.

1. Использование современных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, с добавлением связующих веществ, снижающих пылеобразование: основным направлением развития данных материалов является экономия ресурсов, санитарно-гигиеническая и экологическая безопасность, надежность, эффективность использования в строительной отрасли. Наиболее перспективными типами экологически безопасных теплоизоляционных материалов являются следующие:

- жидкая изоляция, представляющая один слой покрытия толщиной 0,4 мм в виде суспензии наночастиц кремнезема с акриловым связующим, которая перспективна к использованию благодаря своей низкой теплопроводности (не более 0,02 Вт / (м·К)), широкого диапазона рабочих температур от –60 до +220°C, а также обладает отражающей способностью для теплового излучения, антикоррозийными и негорючими свойствами;
- изоляционное покрытие в видеnano-краски, структурированного силикона и керамических микросфер, из которых создается силовая рама во время покраски, обладающая высокой термической сопротивляемостью благодаря продольно-слоистой структуре в виде пленок, разделенных тончайшими воздушными зазорами, способствующими образованию эластичного, непроницаемого многослойного покрытия, отражающего тепло и блокирующего все тепловые потоки;
- аэрогель – это наименее плотный и самый легкий твердый материал [17]. Трехмерная сетчатая структура аэрогеля в основном состоит из диоксида кремния, который составляет более 80% объема наноразмерных пор. Преимущества утепления аэрогелем следующие: его гибкость (изделия из аэрогеля выпускаются в различных формах, аэрогель-материалы, аэрогель-одеяла, их легко резать на требуемые формы и размеры); отсутствие необходимости в органических связующих, что позволяет сохранить термическую и физическую стабильность структуры при высоких температурах; дышащие и гидрофобные свойства (аэрогель не впитывает воду, что предотвращает коррозию, при этом позволяет водяным парам проходить через него, когда конструкции или оборудование нагреваются); низкий коэффициент теплопроводности; возможность использования в ограниченных пространствах; высокая пористость (88...99,8%), низкая плотность (до 20 кг/м³), высокая площадь поверхности (500...1200 м²/г) [17]. Вместе с тем существует ряд недостатков утепления аэрогелем, а именно: высокая стоимость и температурные ограничения до 650°C. Сравнение эксплуатационных свойств различных теплоизоляционных материалов приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Сравнение эксплуатационных свойств различных теплоизоляционных материалов

Материал	Теплопроводность (Вт/м·К)	Плотность (кг/м ³)	Преимущества	Недостатки
Минеральная вата	0,042–0,070	40–60	Не высокая стоимость, не горючая, не поддается загниванию	Эмиссия аэрозоля преимущественно фиброгенного действия (высокая пылевая нагрузка)
Стекловолокно	0,035–0,045	30–70	Не высокая стоимость, не горючая, не поддается загниванию	Эмиссия аэрозоля преимущественно фиброгенного действия (высокая пылевая нагрузка)
Полиуретановая пена	0,019–0,038	25–35	Отсутствие пыления, хорошие теплоизоляционные показатели	Горюча
Аэрогель	0,020–0,040	до 20	Хорошие теплоизоляционные показатели, не горючая	Высокая стоимость, температурные ограничения до 650°C

С целью оптимизации затрат на теплоизоляционные материалы и снижения эмиссии аэрозоля преимущественно фиброгенного действия минеральную вату возможно использовать в составе композитного материала в сочетании с другими изолирующими материалами. В частности, аэрогелевые теплоизолирующие одеяла могут быть усилены нетканым гидрофобным стекловолокном. Кроме того, аэрогель может быть получен в минеральной

вате с использованием процесса сушки при атмосферном давлении, в данном случае аэрогель выступает связующим веществом в структуре минеральной ваты, замещая содержание опасных для окружающей среды летучих компонентов. При смешивании аэрогеля с минеральной ватой теплопроводность композита минеральной ваты и аэрогеля может быть снижена до 0,055 Вт/м·К, композиты минеральной ваты и аэрогеля имеют нанопористую структуру с площадью поверхности около 800 м²/г и объемом пор около 3 см³/г, пористостью около 87% [17].

2. Применение специальных увлажнителей или антипылящих растворов для предварительной обработки материалов направлено на снижение эмиссии твердых микроскопических пылевых частиц, которые могут возникать при установке, транспортировке и эксплуатации теплоизоляционных материалов. Растворы помогают связывать волокна, уменьшая их подвижность и предотвращая выделение пыли в окружающую среду. Примерами являются:

- антипылящие растворы на основе полимеров, образующие защитную пленку, которая связывает волокна и предотвращает их рассыпание. Составы содержат акриловые или полиуретановые полимеры (к примеру: DCP Dust Control, EnviroKleen Dust Suppression, Aqua-Guard Anti-dust Solution, Silkon Anti-Dust Coating, Polymer Dust Control Agent);

- увлажнители на водной основе: используются для предварительной обработки матов перед их установкой. Увлажнители помогают снизить статическое электричество и связывают волокна, что уменьшает количество пыли, выделяемой при работе с материалом. Используются растворы с добавлением мыла или других поверхностно-активных веществ (к примеру: DCP Water-Based Dust Control, Soil-Sement Dust Control, EnviroKleen DustControl Solution, Aqua-Guard Dust Suppression, Green Solutions Dust Control Agent);

- специальные аэрозольные составы, обеспечивающие равномерное покрытие, которые могут содержать как полимерные, так и органические компоненты (к примеру: DCP Dust Control Aerosol, EnviroKleen aerosol Dust Supression, 3M Dust Control Spray, Dust Stop Aerosol, Rust-Oleum Dust Control Spray);

- смеси на основе силиконов: силиконовые антипылящие составы могут быть использованы для создания прочного барьера, который уменьшает выделение пыли и защищает от влаги. Составы обеспечивают долговременную защиту и могут быть применены как в производственных условиях, так и на строительных площадках (к примеру: Dow Corning 732 Multi-Purpose Sealant, Tremco Spectrem 1, SikaSil-SG, Momentive RTV 108, GE Silicone II).

Преимущества применения антипылящих растворов заключаются в эффективном снижении эмиссии твердых микроскопических пылевых частиц, выделяемых при работе с минеральной ватой, что снижает риск заболеваний органов дыхания. Кроме того, защитные составы могут продлить срок службы материалов, предотвращая их повреждение и разрушение. В целом применение специальных увлажнителей или антипылящих растворов является эффективным способом минимизации пыления и улучшения эксплуатационных характеристик материалов из минеральной ваты.

3. Использование систем тонкодисперсного распыления воды в рабочих зонах для связывания частиц пыли в воздухе. Эффективным методом борьбы с мелкодисперсной пылью при производстве теплоизоляционных работ, в частности на этапе демонтажа устаревшей изоляции, представляется использование систем тонкодисперсного распыления воды для связывания частиц пыли, тем самым способствуя их оседанию и снижению эмиссии. Системы, как правило, используют насосы и распылительные устройства для создания мелкодисперсного тумана, состоящего из капель воды размером от 5 до 50 микрон. Мелкие капли воды захватывают частицы пыли, увеличивая их массу, что приводит к их оседанию. Кроме снижения концентрации пыли в воздухе такие системы способствуют поддержанию оптимального уровня влажности. К использованию могут быть предложены следующие модели мобильных систем пылеподавления:

- Dust Control Technologies – DustBoss DB-60 – мобильная система, способная распылять воду на большие расстояния (до 60 метров). Оснащена мощным вентилятором и системой управления, позволяющей регулировать угол и направление распыления;

- Misting Systems – Cool-Off Misting System – системы распыления, как стационарные, так и мобильные, предназначенные для создания тумана в открытых пространствах. Эти системы можно использовать для снижения запыленности, а также для охлаждения работников при нагревающем микроклимате;

- FogCannon – Dust Suppression System – профессиональная система, устанавливаемая как на мобильных платформах, так и на стационарных устройствах. Использует высокое давление для создания мелкодисперсного тумана;

- AquaMist – Dust Control System – система специально разработана для снижения запыленности на строительных площадках и в промышленных зонах. Легко настраивается и может быть интегрирована с существующими системами водоснабжения, эффективно работает в условиях высокой концентрации пыли.

4. Установка мобильных вытяжных систем или локальной аспирации, которая удаляет пыль непосредственно на рабочем месте, применение электроножей с вытяжкой пыли. Мобильные вытяжные системы – это компактные устройства, которые могут перемещаться по рабочей площадке и подключаться к различным инструментам для удаления пыли и твердых частиц в процессе работы. Существуют портативные электрические

ножи для нарезки матов из минеральной ваты, которые оснащены системой вытяжки пыли или подключаемы к мобильным вытяжным системам. Такие инструменты позволяют эффективно резать материал и одновременно минимизировать количество образующейся пыли. Примеры современных устройств:

- Bosch GSG 300 – электрический нож, предназначенный для резки изоляционных материалов, включая минеральную вату, легкий и портативный. Обеспечивает чистый рез и минимизирует образование пыли. Он может быть оснащен системой пылеудаления Bosch GAS 35 I AFC – пылесосом с функцией автоматической фильтрации и очистки;
- Makita BJV180Z – аккумуляторный лобзик, который может использоваться с пылеотсосом Makita VC4210LX1, что позволяет эффективно удалять пыль во время резки;
- Festool PSC 420 EB – беспроводной лобзик, который можно подключить к пылесосу Festool для эффективного удаления пыли во время работы. Характеризуется высоким качеством реза, легкостью в использовании и наличием системой пылеудаления. Мобильный пылесос Festool CT 26 E оснащен системой автоматического включения и выключения, что позволяет ему работать в связке с инструментами;
- DeWalt DCS570B с пылесосом – беспроводная циркулярная пила, может работать в сочетании с пылесосом для удаления пыли. Преимуществом использования данного оборудования является мобильность, что делает ее удобной для применения на строительных площадках.

5. *Использование современных респираторов для защиты дыхательных путей.* Наиболее эффективным СИЗ при ежедневной пылевой нагрузке является использование респираторов с фильтрами класса Р3, которые обеспечивают высокую степень защиты дыхательных путей от мелкодисперсной пыли, включая стеклянную и минераловатную. Эти фильтры способны задерживать более 99,9% частиц размером до 0,3 микрометра, что делает их эффективными в условиях работы с изоляционными материалами. Примеры современных респираторов класса Р3:

- 3M 9332A+ – респиратор с фильтром класса Р3, который обеспечивает надежную защиту от твердых частиц и аэрозолей. Имеет дополнительный слой активированного угля;
- Moldex 7000 Series – респираторы, оснащенные фильтрами класса Р3 и обеспечивающие комфортное ношение благодаря мягким уплотнителям и легкому весу. Подходят для длительного использования в условиях повышенного содержания пыли;
- Honeywell 5321 – респиратор, предлагающий высокую степень защиты от твердых частиц и аэрозолей, имеющий встроенный клапан выдоха, который снижает накопление тепла и влаги внутри маски, обеспечивая комфортное ношение;
- Dräger X-plore 2330 – респиратор с фильтром класса Р3, обеспечивает защиту от пыли, аэрозолей и мелких частиц, имеет мягкие уплотнители для комфорта и хорошей посадки, обладает хорошей вентиляцией и легким весом, что делает его подходящим для длительных работ, имеется возможность замены фильтров;
- Sundström SR 297 – респиратор, который предназначен для защиты от различных аэрозолей и пыли, включая стеклянную и минеральную вату, а также совместим с фильтрами класса Р3 и имеет возможность установки дополнительных фильтров для защиты от токсичных газов. Удобная конструкция и возможность регулировки делают его эффективным для длительного использования. Доступен в различных размерах для обеспечения оптимальной посадки;
- Moldex 8000 Series – респираторы, предлагающие защиту класса Р3 и имеющие уникальный дизайн, который обеспечивает оптимальную видимость и комфорт ношения. Оснащены клапаном выдоха для уменьшения тепла и влаги.

В дополнение к респираторам с фильтрами класса Р3 изолировщикам на термоизоляции в процессе производства теплоизоляционных работ обязательно к использованию одноразовой защитной одежды, которая защищает кожные покровы от загрязнений и пыли (к примеру: одежда DuPont Tyvek 500 – покрытие обеспечивает отличную защиту от пыли, легкое, дышащее и подходит для работы в условиях высокой загрязненности; одежда 3M Protective Coverall 4510 – обеспечивает защиту от пыли и неблагоприятных условий, а также позволяет коже дышать).

6. *Применение портативных устройств для замеров концентраций пыли в воздухе рабочей среды в реальном времени* позволяет своевременно принимать меры по ограничению ее воздействия на работника. Так, портативный анализатор пыли TSI DustTrak II может измерять концентрацию аэрозолей в диапазоне от 0,001 до 150 мг/м³. Устройство оснащено встроенным дисплеем для отображения данных в реальном времени и может быть подключено к компьютеру для анализа получаемой информации. Кроме того, для мониторинга качества воздуха и измерения концентрации пыли могут использоваться устройства Aeroqual Series 200/300, позволяющие настраивать параметры измерений и имеющие возможность передачи данных через Bluetooth.

Использование респираторов с фильтрами класса Р3 и портативных устройств для замеров концентрации пыли в воздухе обеспечивает надежную защиту рабочих и позволяет поддерживать безопасные условия труда при выполнении работ с минеральной ватой. Интеграция этих средств индивидуальной защиты в рабочие процессы является важным шагом к снижению рисков для здоровья работников и соблюдению стандартов безопасности труда.

В качестве организационных мероприятий по улучшению условий труда изолировщика на термоизоляции предлагаются к внедрению следующие инструменты:

- совершенствование методики оценки рисков на предприятии с учетом оценки профессионального риска для здоровья работников. Такой подход дает возможность расширить аспекты трудовой деятельности работников, занятых на конкретном рабочем месте. В том числе создать группы риска по различным категориям работников и рассчитать для конкретного лица индивидуальных риск;
- внедрение поведенческого аудита в процессы системы управления охраной труда на предприятии, который позволит закрепить необходимую модель поведения работника и скорректировать его опасное поведение, а также позволит выявить причинно-следственные связи выполнения работ с нарушением правил безопасности и оценивать эффективность деятельности по обеспечению производственной безопасности и охраны труда;
- проведение обучения и повышения квалификации персонала с помощью регулярных тренингов и семинаров. Организация экспертной площадки посредством фасилитаторов – это могут быть как эксперты внутри организации, так и приглашенные специалисты, которые помогут наладить коммуникации в области безопасности;
- проведение диалоговых площадок, регулярные встречи с руководством для обсуждения критических вопросов, касающихся безопасности труда; такие процессы призваны создавать доверительные отношения, повышать уровень значимости конкретного сотрудника в организации;
- создание системы наставничества в целях оказания помощи работнику в освоении профессии и овладении в полном объеме должностными обязанностями, вовлечения работника в трудовой процесс и общественную жизнь организации.

Заключение. Предложены способы снижения эмиссии в окружающую среду аэрозоля преимущественно фиброгенного действия искусственных минеральных волокон с целью защиты изолировщиков на термоизоляции при проведении теплоизоляционных работ, внедрение которых позволит понизить уровень профессионального риска и предотвратить развитие профессиональных и производственно обусловленных заболеваний при выполнении указанных видов строительно-монтажных работ. Внедрение предложенных мероприятий, направленных на снижение нагрузки на окружающую среду по пылевому фактору, улучшение условий труда и активное вовлечение работников в процессы управления безопасностью, не только снизит вероятность развития профессиональных и производственно обусловленных заболеваний работников, но и отразится на экономической эффективности предприятий строительной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Снижение пылеобразования отходов стекловолокна / Г.Д. Ляхевич, В.А. Гречухин, Е.Н. Савина и др. // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: материалы IV Международной научно-технической конференции: материалы Международной научно-технической конференции, 26–27 октября 2023 года / редкол.: Е.М. Жуковский (гл. ред.) и др.; сост. В.А. Ходяков. – Минск: БНТУ, 2024. – С. 278–281.
2. Гутич Е.А. Комплексная гигиеническая оценка пылевого фактора в производстве теплоизоляционных строительных изделий на основе искусственных минеральных волокон // Медицина труда и промышленная экология. – 2021. – № 61(2). – С. 77–83. DOI: 10.31089/1026-9428-2021-61-2-77-83.
3. Оценка воздействия на окружающую среду различных теплоизоляционных материалов / А.М. Газизов, А.А. Заиров, Р.Р. Янгирова и др. // Нефтегазовое дело. – 2021. – № 1. – С. 40–59. DOI: 10.17122/ogbus-2021-1-40-59.
4. Buschmann R. Umweltvertraglichkeit von Gebaudedammstoffen. Kiel: Ministerium fur Umwelt, Natur und Forsten, Schleswig-Holstein, 2018. – 81 s.
5. Жук П.М. Особенности комплексной оценки безопасности волокнистых теплоизоляционных материалов // Вестник МГСУ. – 2010. – Т. 1, № 4. – С. 108–112.
6. Жук П.М. Анализ загрязнения атмосферного воздуха предприятиями, выпускающими волокнистые теплоизоляционные материалы // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2. – С. 180–184.
7. Жук П.М. Система оценки экологической безопасности по жизненному циклу неорганических волокнистых теплоизоляционных материалов // Вестник МГСУ. – 2013. – № 12. – С. 118–122.
8. WHO/ILO work-related burden of disease and injury: Protocol for systematic reviews of occupational exposure to dusts and/or fibres and of the effect of occupational exposure to dusts and/or fibres on pneumoconiosis / D. Mandrioli, V. Schlünssen, Á. Balázs et al. // Environment International. – 2018. – № 119. – 174–185. DOI: 10.1016/j.envint.2018.06.005.
9. Silica-associated lung disease: An old-world exposure in modern industries / H. Barnes, N.S.L. Goh, T.L. Leong et al. // Respirology. – 2019. – № 24. – С. 1165–1175.
10. Brun E. European Agency for Safety and Health at Work: Expert forecast on emerging chemical risks related to occupational safety and health. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2008. – 198 p.
11. Гутич Е.А., Косяченко Г.Е., Сычик С.И. Особенности заболеваемости и оценка профессионального риска здоровью работников, имеющих контакт с аэрозолями искусственных минеральных волокон // Анализ риска здоровью. – № 4. – 2019. – С. 113–118.
12. Зуева А.А., Булавка Ю.А. Анализ влияния загрязнения окружающей среды аэрозолями искусственных минеральных волокон на состояние здоровья работающих при выполнении теплоизоляционных работ // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – № 4(39). – 2024. – С. 88–91. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-39-4-88-91.

13. Зуева А.А., Булавка Ю.А. Гигиеническая оценка условий труда изолировщика на термоизоляции с учетом пылевого фактора // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 18 апреля 2024 г. – Минск: УГЗ, 2024. – С. 71–73.
14. Зуева А.А., Булавка Ю.А. Идентификация опасностей на рабочем месте изолировщика на термоизоляции с применением контрольного листа для наблюдений и собеседований // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: сб. материалов междунар. заочной науч.-практ. конф. – Минск: УГЗ, 2024. – С. 107–112.
15. Зуева А.А. Комплекс мер защиты изолировщиков на термоизоляции, контактирующих с аэрозолями искусственных минеральных волокон // Путь в науку. Прикладные науки. Строительство [Электронный ресурс]: электрон. сб. науч. тр. – Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – Вып. 55(125). – С. 38–40. URL: https://journals.psu.by/specialists_applied_sciences.
16. Зуева А.А., Булавка Ю.А. Оценка профессионального риска для изолировщиков на термоизоляции технологических трубопроводов на территории НПЗ // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XX Всероссийской конференции-конкурса студентов выпускного курса и аспирантов. Т. 1. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 249–252.
17. To Improve the Thermal Properties of Mineral Wool by Adding Aerogel / M.-W. Hsu, Y.-S. Chen, R.S.-S. Horng et al. // Sensors and Materials. – 2017. – № 29. – Р. 445–452. DOI: 10.18494/sam.2017.1526.

REFERENCES

1. Lyakhevich, G.D. Reducing dust formation from fiberglass waste / G.D. Lyakhevich, V.A. Grechukhin, E.N. Savina [et al.] // *Road construction and its engineering support: Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, October 26–27, 2023* / editorial board: E.M. Zhukovsky (editor-in-chief) [et al.]; compiled by V.A. Khodyakov. – Minsk: BNTU, 2024. – P. 278–281. (In Russ.).
2. Gutich, E.A. (2021). Comprehensive hygienic assessment of the dust factor in the production of thermal insulation building products based on artificial mineral fibers. *Occupational Medicine and Industrial Ecology*, 61(2), 77–83. DOI: 10.31089/1026-9428-2021-61-2-77-83. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Gazizov, A.M. Environmental impact assessment of various thermal insulation materials / A.M. Gazizov, A.A. Zairov, R.R. Yangirova, M.R. Timerov // *Oil and Gas Business*. – 2021. – № 1. – P. 40–59. DOI: 10.17122/ogbus-2021-1-40-59. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Buschmann, R. (2018). *Umweltvertraglichkeit von Gebaudedammstoffen*. Kiel: Ministerium fur Umwelt, Natur und Forsten, Schleswig-Holstein.
5. Zhuk, P.M. (2010). Features of a comprehensive safety assessment of fibrous thermal insulation materials. *Bulletin of MGSU*, 1(4), 108–112. (In Russ.).
6. Zhuk, P.M. (2012). Analysis of atmospheric air pollution by enterprises producing fibrous thermal insulation materials. *Bulletin of civil engineers*, 2, 180–184. (In Russ.).
7. Zhuk, P.M. (2013). System for assessing environmental safety by the life cycle of inorganic fibrous thermal insulation materials. *Bulletin of MGSU*, 12, 118–122. (In Russ.).
8. Mandrioli, D., Schlünssen, V., Balázs, Á. et al. (2018). WHO/ILO work-related burden of disease and injury: Protocol for systematic reviews of occupational exposure to dusts and/or fibres and of the effect of occupational exposure to dusts and/or fibres on pneumoconiosis. *Environment International*, 119, 174–185. DOI: 10.1016/j.envint.2018.06.005.
9. Barnes, H., Goh, N.S.L., Leong, T.L., & Hoy, R. (2019). Silica-associated lung disease: An old-world exposure in modern industries. *Respirology*, 24, 1165–1175.
10. Brun, E. (2008). European Agency for Safety and Health at Work: Expert forecast on emerging chemical risks related to occupational safety and health. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
11. Gutich, E.A. Morbidity characteristics and assessment of occupational health risks in workers exposed to aerosols of artificial mineral fibers / E.A. Gutich, G.E. Kosyachenko, S.I. Sychik // *Health risk analysis*. – № 4. – 2019. – P. 113–118. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Zueva, A.A. Analysis of the Impact of Environmental Pollution with Aerosols of Artificial Mineral Fibers on the Health of Workers Performing Thermal Insulation Work / A.A. Zueva, Y.A. Bulavka // *Bulletin of Polotsk State University. Series F, Construction. Applied Sciences*. – 2024. – № 4(39). – P. 88–91. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-39-4-88-91. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Zueva, A.A. Hygienic Assessment of Working Conditions of an Insulator on Thermal Insulation Taking into Account the Dust Factor / A.A. Zueva, Y.A. Bulavka // *Ensuring Life Safety: Problems and Prospects: Collection of Materials of the XVII Int. Res. and Pract. Conf. young scientists*, Minsk, April 18, 2024. – Minsk: UGZ, 2024. – P. 71–73. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Zueva, A.A. Identification of hazards at the workplace of an insulator on thermal insulation using a checklist for observations and interviews / A.A. Zueva, Y.A. Bulavka // *Problems of ensuring the safety of people in case of fire and explosion collection of materials of the international correspondence scientific and practical conference*. – Minsk: UGZ, 2024. – P. 107–112. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Zueva, A.A. A set of measures to protect insulators on thermal insulation in contact with aerosols of artificial mineral fibers / A.A. Zueva // *Path to science. Applied sciences. Construction* [Electronic resource]: electronic collection of scientific papers. – Novopolotsk: Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, 2025. – Iss. 55(125). – P. 38–40. URL: https://journals.psu.by/specialists_applied_sciences. (In Russ.).
16. Zueva, A.A. Occupational Risk Assessment for Insulators Working on Thermal Insulation of Process Pipelines on the Territory of an Oil Refinery / A.A. Zueva, Y.A. Bulavka // *Current Issues of Subsoil Use: Abstracts of the XX All-Russian Conference-Competition of Graduate and Postgraduate Students. Vol. 1*. – St. Petersburg, 2025. – P. 249–252. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Hsu, M.-W., Chen, Y.-S., Horng, R.S.-S., Wu, Chun-Mu, & Lee, Shin-Ku. (2017). To Improve the Thermal Properties of Mineral Wool by Adding Aerogel. *Sensors and Materials*, 29, 445–452. DOI: 10.18494/sam.2017.1526.

Поступила 26.11.2025

**METHODS OF REDUCING ENVIRONMENTAL POLLUTION BY AEROSOLS
OF ARTIFICIAL MINERAL FIBERS DURING THERMAL INSULATION WORK
CARRIED OUT BY AN INSULATOR ON THERMAL INSULATION**

H. ZUYEVA¹, Y. BULAUKA²

⁽¹⁾*Branch of Novopolotsk Directorate of JSC Belteploizolyatsiya,*

⁽²⁾*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

Methods are proposed for reducing the emission of aerosols, primarily fibrogenic in nature, from artificial mineral fibers into the environment. These methods are intended to protect insulators during thermal insulation work. Their implementation will reduce occupational risks and prevent the development of occupational and work-related diseases during the specified types of construction and installation work. The proposed set of technical measures for reducing the dust load on insulators includes the use of modern materials with improved performance properties, with the addition of binders that reduce dust formation; the use of special humidifiers or anti-dust solutions for pre-treatment of materials; the use of finely dispersed water spray systems in work areas; the installation of mobile exhaust systems or local aspiration, the use of electric knives with dust extraction; the use of respirators with class P3 filters for respiratory protection; the use of portable devices for measuring dust concentrations in the air of the working environment in real time.

Keywords: environmental pollution, thermal insulation works, mineral wool, fibrogenic aerosol, insulator on thermal insulation.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Парфенова Л.М., Марковцова В.В., Раззаков С.Ж.</i> Низкотемпературная тепловлажностная обработка тяжелого бетона с комплексными добавками на основе поликарбоксилатных суперпластификаторов.....	2
<i>Уляшева В.М., Мартынова А.Ю., Резник К.В.</i> Использование теплоты ЦОД для объектов газоснабжения	13
<i>Бакатович А.А., Ягубкин А.Н., Бакатович Н.В., Вен Д.</i> Факторы, определяющие долгосрочную работу стеновых блоков на основе отходов хлопчатника	20
<i>Забела Р.А.</i> Будынак былога Дома афіцэраў у Палацку: вынікі даследавання 2021–2024 гадоў	28
<i>Нияковский А.М., Струцкий Н.В., Кухта С.В., Зафатаев В.А.</i> Комплексная оценка функционирования системы газораспределения	39
<i>Обромпальский Р.Л., Бакатович А.А.</i> Влияние фракционного состава и средней плотности на коэффициент теплопроводности переработанной коры осины.....	45
<i>Уласик Т.М., Медведев Л.Ю.</i> Учёт «стеснённой» дилатансии при повышении несущей способности искусственного основания с применением фибры	55
<i>Ягубкин А.Н., Бакатович А.А.</i> Оценка влияния влажности на теплопроводность и долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы	60

ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Зуева А.А., Булавка Ю.А.</i> Способы снижения загрязнения окружающей среды аэрозолями искусственных минеральных волокон при проведении теплоизоляционных работ изолировщиком на термоизоляции	68
--	----