

Научная статья
УДК 691.33
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-134-148>
EDN: CAMDKT



КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ НА ТЕХНОГЕННОМ СЫРЬЕ

С.В. Ключев¹, С.В. Золотарева¹, Н.А. Аюбов², Р.С. Федюк³✉, Ю.Л. Лисейцев⁴

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

²Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук,

г. Грозный, Чеченская Республика, Россия

³Дальневосточный Федеральный Университет;

Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, Россия

⁴Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема,
г. Биробиджан, Россия

✉ roman44@yandex.ru

✉ ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Технологические особенности дорожного строительства выдвигают соблюдение требований к дорожно-строительным материалам в отношении физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик. Управление процессами структурообразования в цементных композиционных системах может быть осуществлено различными методами и подходами, включая выбор оптимального состава, добавление специальных добавок, регулирование условий гидратации и применение специальных методов обработки. Это позволяет улучшить свойства и характеристики конгломератных материалов, а также устранить или замедлить разрушение их структур. Целью настоящей статьи является разработка композиционных вяжущих, рекомендуемых для применения в производстве дорожно-строительных материалов или дорожного строительства.

Основная часть. Установлено, что у композиционных вяжущих с заменой 50% портландцемента отходами мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов при выявленной рациональной удельной поверхности 500 м²/кг активность практически сохраняется на том же уровне, как и у контрольных бездобавочных составов, что позволяет рекомендовать данный вид вяжущего для разработки составов бетонов для дорожного строительства.

Заключение. Добавление выявленного рационального содержания суперпластификатора ПФМ-НЛК (0,6 мас. %) в совместно помолотую систему «портландцемент-отходы ММС» позволило создать широкую номенклатуру композиционных вяжущих, обладающих сроками схватывания от 3 мин 5 сек (начало) до 6 мин 35 сек (конец), активностью на изгиб до 9,3 МПа и на сжатие 60,7 МПа (при отношении активности на изгиб к активности на сжатие до 0,16).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительные материалы, дорожные сооружения, прочность, бетон, композиционное вяжущее, кварцит, удельная поверхность, измерение

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Р.С. Федюк – член редакционного совета журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

БЛАГОДАРНОСТИ: выражаем благодарность за уделенное внимание анонимным рецензентам этой статьи.

Статья поступила в редакцию 19.01.2024; одобрена после рецензирования 12.02.2024; принята к публикации 20.02.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Ключев С.В., Золотарева С.В., Аюбов Н.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Ключев С.В., Золотарева С.В., Аюбов Н.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л. Композиционные вяжущие на техногенном сырье // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 1. С. 134-148. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-134-148>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-134-148>

EDN: CAMDKT

COMPOSITE BINDERS BASED ON TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Sergey V. Klyuev¹, Svetlana V. Zolotareva¹, Narman A. Ayubov²,
Roman S. Fediuk³ ✉, Yuri L. Liseitsev⁴

¹V.G. Shukhov Belgorod State Technological University,
Belgorod, Russia

²H.I. Ib-Ragimov Institute of Russian Academy of Sciences,
Groznyi, Chechen Republic, Russia

³Far Eastern Federal University (FEFU);
Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russkii Island, Ajax, Russia
Sholom Aleichem Amur State University,
Birobidzhan, Russia
✉ roman44@yandex.ru,
✉ corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Technological features of road construction require compliance with the requirements for road building materials in terms of physical and mechanical properties and performance characteristics. Control of structure formation processes in cement composite systems can be carried out by various methods and approaches, including choosing the optimal composition, adding special additives, regulating hydration conditions and using special processing methods. This makes it possible to improve the properties and characteristics of conglomerate materials, as well as eliminate or slow down the destruction of their structures. The purpose of this article is to develop composite binders for road use.

Main part. It has been established that in composite binders with the replacement of 50% of Portland cement with waste from wet magnetic separation of ferruginous quartzites with an identified rational specific surface of 500 m²/kg, the activity remains practically at the same level as in the control additive-free compositions, which allows us to recommend this type of binder for development of concrete compositions for road construction.

Conclusions. The addition of the identified rational content of the superplasticizer PFM-NLC (0.6 wt. %) to the co-milled Portland cement-MMC waste system made it possible to create a wide range of composite binders with setting times from 3 minutes. 5 sec. (start) up to 6 min. 35 sec. (end), bending activity up to 9.3 MPa and compression activity 60.7 MPa (with a ratio of bending activity to compression activity of up to 0.16).

KEYWORDS: building materials, road structures, strength, concrete, composite binder, quartzite, specific surface area, measurement

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. Roman S. Fediuk member of the editorial council of the Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

ACKNOWLEDGEMENTS. We would like to thank the anonymous reviewers of this article for their consideration.

The article was submitted 19.01.2024; approved after reviewing 12.02.2024; accepted for publication 20.02.2024.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

© Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Ayubov N.A., Fediuk R.S., Liseitsev Y.L., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation. Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Ayubov N.A., Fediuk R.S., Liseitsev Y.L. Composite binders based on technogenic raw materials. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (1): 134-148. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-134-148>

ВВЕДЕНИЕ

Технологические особенности дорожного строительства выдвигают соблюдение требований к дорожно-строительным материалам в отношении физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик [1]. Комплексное достижение поставленных задач возможно путем разработки композиционных вяжущих с контролем процессов управления структурообразованием на nano-, микро- и макроуровне [2, 3]. Синергетический эффект достигается путем выбора полиминерального сырья природного и техногенного происхождения с учетом его химического, минерального и гранулометрического составов [4, 5, 6]. Также важно выбрать комплекс органических добавок и определить методологические подходы к их применению [7, 8, 9, 10]. Разработка научно обоснованного подхода к соединению различных структур в бетонной матрице позволяет определить оптимальные рецептуры дорожных материалов на основе композиционных вяжущих (КВ) [11, 12, 13, 14]. Это улучшает формирование необходимых технологических характеристик сырьевых смесей и позволяет управлять физико-механическими свойствами строительного композита [15, 16, 17].

Анализ мировой литературы [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25] показал, что для получения эффективных дорожных материалов необходимо использовать композиционные вяжущие с активными минеральными компонентами природного и техногенного происхождения, с удельной поверхностью от 450 до 600 м²/кг. Эффективное проектирование такого КВ достигается выполнением ряда условий:

1. Все компоненты в составе композиционного вяжущего должны быть химически совместимыми [26, 27]. Это важно для обеспечения эффективной реакции между компонентами, образования стабильной структуры и достижения требуемых свойств материала [28, 29]. Если компоненты несовместимы, это может привести к непредсказуемым результатам, таким как плохая связность, низкая прочность или нестабильность материала [30, 31].

2. Высокая адгезия между заполнителями/наполнителями и вяжущей матрицей важна для обеспечения эффективного переноса нагрузок и предотвращения отслаивания или разрушения внутри материала [32, 33]. Если адгезия низкая, заполнители/наполнители

могут отделяться от матрицы, что приведет к ухудшению механических свойств и структурной целостности композита [34, 35]. Поэтому при выборе компонентов композиционного вяжущего важно учитывать их совместимость с вяжущей матрицей и их способность образовывать прочное соединение [36, 37].

3. Компоненты композиционного вяжущего должны иметь близкие значения коэффициентов линейного температурного расширения [38]. Когда композиционное вяжущее содержит компоненты с разными значениями коэффициентов линейного температурного расширения, возникают напряжения и деформации в материале при изменении температуры [39]. Это может привести к микротрещинам, разрушению или деформации конструкции [40]. Поэтому при проектировании композиционного вяжущего важно выбирать компоненты с близкими значениями коэффициентов линейного температурного расширения, чтобы минимизировать такие нежелательные эффекты [41].

Управление процессами структурообразования в цементных композиционных системах может быть осуществлено различными методами и подходами, включая выбор оптимального состава, добавление специальных добавок, регулирование условий гидратации и применение специальных методов обработки [42]. Это позволяет улучшить свойства и характеристики конгломератных материалов, а также устранить или замедлить разрушение их структур.

Многие свойства вяжущих, в том числе активность, скорость твердения, определяются не только химическим и минералогическим составом клинкера, формой и размером кристаллов минералов, наличием тех или иных добавок, но и в большей степени тонкостью помола продукта, его гранулометрическим составом и формой частичек порошка [43].

Основная идея при создании композиционного вяжущего заключается в использовании активных минеральных добавок и наполнителей, которые имеют более мелкую дисперсность, чем частицы цемента [44]. Это позволяет улучшить свойства КВ и конечного материала. Активные минеральные добавки и наполнители включают в себя широкую номенклатуру кремнеземсодержащего и алюмосиликатного природного и техногенного сырья [45]. Более мелкая дисперсность активных добавок и на-

полнителей обеспечивает их лучшую реакцию с вяжущими компонентами и более равномерное распределение в матрице материала. Это позволяет достичь более плотной структуры и более эффективного использования ресурсов, так как меньшее количество вяжущего может быть использовано для достижения тех же или даже лучших свойств материала [46].

Использование активных минеральных добавок и наполнителей с мелкой дисперсностью также может способствовать улучшению технологических свойств смеси, таких как подвижность, возможность заполнения сложных форм и повышение устойчивости к разделению компонентов (сегрегации и водоотделению) [47].

Большой потенциал для применения в композиционных вяжущих имеют отходы горнообогатительных предприятий, что позволяет утилизировать многотоннажные ресурсы, улучшая экологическую обстановку региона при сохранении требуемых физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик цементных материалов (а по некоторым показателям и даже превосходя их исходные значения). В нашей стране огромные отвалы попутно добываемых горных пород образуются в разработки Курской магнитной аномалии [48]. Дорожно-строительные материалы имеют свои специфические требуемые характеристики, поэтому разработка цементных материалов (с применением отходов горнодобывающей промышленности Курской магнитной аномалии) для них является актуальной и важной научной и практической задачей [49].

Целью настоящей статьи является разработка композиционных вяжущих, рекомендуемых для применения в производстве дорожно-строительных материалов или дорожного строительства. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: подбор исходных компонентов, проектирование из них композиционных вяжущих, изучение влияния суперпластификатора на свойства КВ, исследование важных характеристик вяжущего (нормальная густота, сроки схватывания, активность на изгиб и на сжатие).

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основной задачей при получении композиционных вяжущих и материалов на их основе является снижение расхода клинкерной составляющей. Наиболее существенными факторами снижения содержания цемента в бетонах являются уменьшение водопотребности

бетонной смеси и повышение активности вяжущего. Более того, применение смесей с высокой проникающей способностью на основе КВ и техногенных песков для устройства укрепленных оснований позволит не только исключить дорогостоящий щебень, вследствие чего снизится материалоемкость дорожных одежд, но и в значительной степени улучшить экологическую обстановку, благодаря утилизации отходов, сотни миллионов тонн которых скопились в отвалах и хвостохранилищах горнодобывающих и горнообогатительных комбинатов РФ.

Композиционное вяжущее получали путем домолла до удельной поверхности $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108–2020 и отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов Лебединского месторождения (Курская магнитная аномалия). Это связано с тем, что запасы подобных материалов исчисляются десятками миллиардов тонн и составляют мощную сырьевую базу для получения композиционных вяжущих, при этом основным пороодообразующим минералом является кварц. Замещение портландцемента отходами ММС проводилось на уровне 40, 50 и 60 мас. %, при этом маркировка образцов осуществлялась по количеству оставшегося цемента: КВ-60, КВ-50 и КВ-40.

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ

Результаты определения нормальной густоты, сроков схватывания и активности вяжущих приведены в таблице 1.

Нормальная густота цементного теста закономерно снижается с введением отходов ММС, при этом возрастают и сроки схватывания, что свидетельствует о разбавлении системы. Также отмечается экономия цемента вдвое с сохранением активности как на сжатие, так и на изгиб практически на уровне составов со 100 %-ным цементным вяжущим. За рациональный состав принимается КВ-50, так как дальнейшее увеличение кремнеземсодержащего компонента при снижении клинкерной составляющей приводит к резкому снижению активности вяжущего.

Рост активности композиционного цемента достигался совместной механохимической активацией его компонентов (смеси из равного количества портландцемента и отходов ММС) в вибрационной мельнице ИВ-4 (рисунок 1) в течение 55 мин до достижения заданной удельной поверхности.

Таблица 1
Характеристики композиционных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table 1
Characteristics of composite binders
Source: compiled by the authors.

Вид вяжущего	Нормальная густота теста, %	Сроки схватывания, ч–мин		Активность вяжущего МПа	
		начало	конец	на изгиб	на сжатие
ЦЕМ I 42.5 Н (КВ-100)	26,5	3–00	4–50	8,4	58,6
КВ-60	25,8	3–30	5–40	7,2	51,3
КВ-50	25,3	4–10	6–10	7,1	50,2
КВ-40	25,0	4–20	6–30	6,4	44,3



Рисунок 1 – Технические характеристики вибрационной мельницы
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Technical specifications of vibratory mill
Source: compiled by the authors.

Применение вибрационной мельницы позволило в несколько раз увеличить удельную поверхность по сравнению с удельной поверхностью исходных компонентов композиционного вяжущего (рисунок 2).

Помол компонентов в вибрационной мельнице осуществлялся в течение 190 мин, достигая предела удельной поверхности 880 м²/кг, после чего происходит выполаживание кривой. При этом запланированная удельная поверх-

ность 500 м²/кг достигалась в течение первых 55 мин. Дальнейшее измельчение является неэффективным, т.к. при высоких энергозатратах значительного повышения удельной поверхности не происходит. Это же подтверждается изучением предела прочности при сжатии при разном проценте замещения портландцемента отходами ММС и разной удельной поверхности совместно помолотых компонентах композиционного вяжущего (рисунок 3).

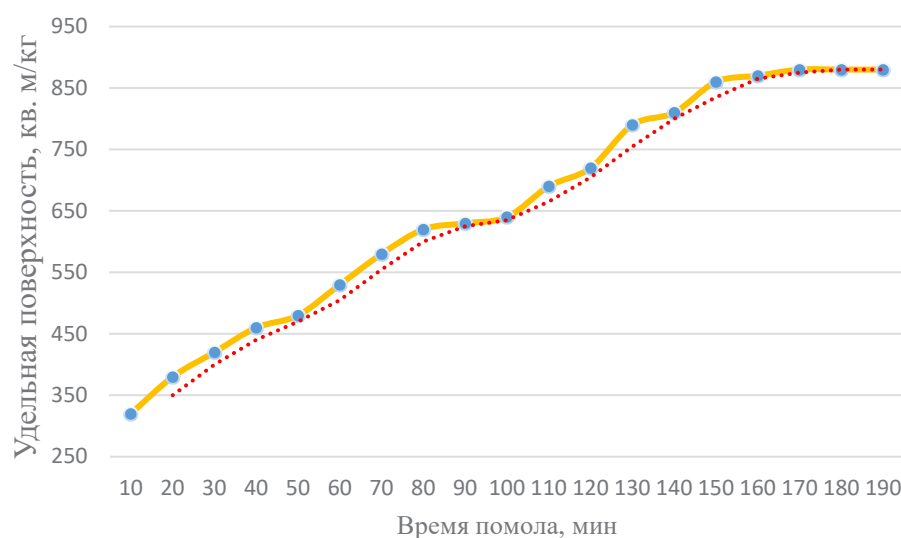


Рисунок 2 – Кинетика помола компонентов КВ
Источник: составлено авторами.

Figure2 – Kinetics of CB components grinding
Source: compiled by the authors.

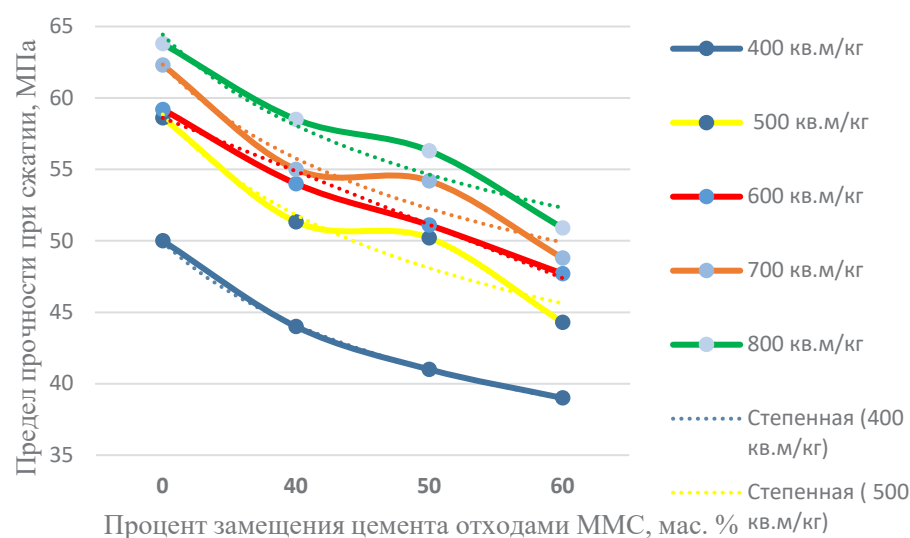


Рисунок 3 – Зависимость прочности КВ от количества и granulometрии добавки
Источник: составлено авторами.

Figure3 – Dependence of CB strength on the amount and granulometry of the additive
Source: compiled by the authors.

Полученные результаты также подтверждают рациональную удельную поверхность компонентов композиционного вяжущего на уровне 500 м²/кг; дальнейшее увеличение удельной поверхности не приводит к значительному упрочнению, но влечет за собой дополнительные энергетические затраты.

Эффективность измельчения в вибрационной мельнице достигается в результате со-

вместного действия ударных и истирающих усилий, которые оказываются более значительными, чем ударные, что минимизирует энергию активации, позволяя уже через 10 мин измельчения получить 42% частиц размером менее 25 мкм и 39% зерен с размерами от 25 до 50 мкм (рисунок 4).



Рисунок 4 – Зависимость гранулометрии компонентов КВ от времени измельчения
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the CB components granulometry on grinding time
Source: compiled by the authors.

Механохимическая активация компонентов композиционного вяжущего приводит к разрушению кристаллической решетки, освобождая накопленную в ней внутреннюю энергию и приводя к росту аморфизации их поверхности [1, 2].

Таким образом, в результате проведенных исследований и анализа полученных данных установлено, что у композиционных вяжущих с заменой 50% портландцемента отходами мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов при выявленной рациональной удельной поверхности $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ активность практически сохраняется на том же уровне, как и у контрольных бездобавочных составов, что позволяет рекомендовать данный вид вяжущего для разработки составов бетонов для дорожного строительства.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА НА СВОЙСТВА КВ

Эффективность пластифицирующих добавок зависит от их химической природы. Различные добавки могут замедлять процесс образования кристаллических новообразований в разной степени. Поэтому важно подобрать рациональное количество и тип пластифицирующей добавки в цементную систему для достижения желаемых реологических свойств и структуры материала. Применялся суперпластификатор ПФМ-НЛК (Полипласт, Москва) – это полифункциональная воздухововлекающая добавка-суперпластификатор на основе

смеси натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот различной молекулярной массы с добавлением воздухововлекающего и гидрофобизирующего компонента, обеспечивающая стабильное повышение морозостойкости. Помимо эффективности, выбор суперпластификатора также учитывал его доступность на рынке и его импортозамещаемость.

Дозировка суперпластификатора для смесей на традиционном цементе приводится в рекомендациях производителя. Однако эти данные необходимо уточнять для каждого конкретного состава вяжущего, особенно если меняется дисперсность цемента. Составы суспензии композиционного вяжущего КВ-50 с удельной поверхностью $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ и результаты испытаний представлены в таблице 2.

Согласно результатам экспериментов, приведенным в таблице 2, применение пластифицирующей добавки ПФМ-НЛК в количестве 0,6 мас. % является наиболее рациональным, т.к. дальнейшее увеличение дозировки лишь незначительно увеличивает диаметр расплыва миниконуса, что является экономически нерационально. Более того, помимо пластифицирующего действия, введение суперпластификатора при помолу способствует интенсификации измельчения, что связано с проявлением раскливающего эффекта Ребиндера. При ударе шаров на твердую частицу образуются микротрещины, которые могут либо развиваться дальше и приводить к расколу частицы, либо самозалечиваться и приводить к восстановлению структуры.

Таблица 2
Результаты определения оптимального содержания СП
Источник: составлено авторами.

Table 2
Results of determining SP optimal content
Source: compiled by the authors.

Расход материалов на миниконус			Диаметр расплыва миниконуса, D, мм
КВ-50, г	Вода, г	СП, мас. % от КВ	
100	35	0,1	62
100	35	0,2	83
100	35	0,3	99
100	35	0,4	125
100	35	0,5	142
100	35	0,6	165
100	35	0,7	169
100	35	0,8	172

Молекулы интенсификатора помола подобного рода, адсорбируясь на вновь образованных поверхностях, препятствуют самозалечиванию микротрещин и тем самым увеличивают скорость помола [1, 2].

Нормальная густота цементного теста для разработанных вяжущих снижается как при разбавлении системы отходами ММС, так и

при введении суперпластификатора (что является вполне закономерно), как это показано на рисунке 5. Разбавление системы отходами ММС приводит к увеличению объема смеси, что в свою очередь снижает густоту. Это происходит из-за того, что отходы ММС занимают пространство, которое ранее было заполнено цементом.

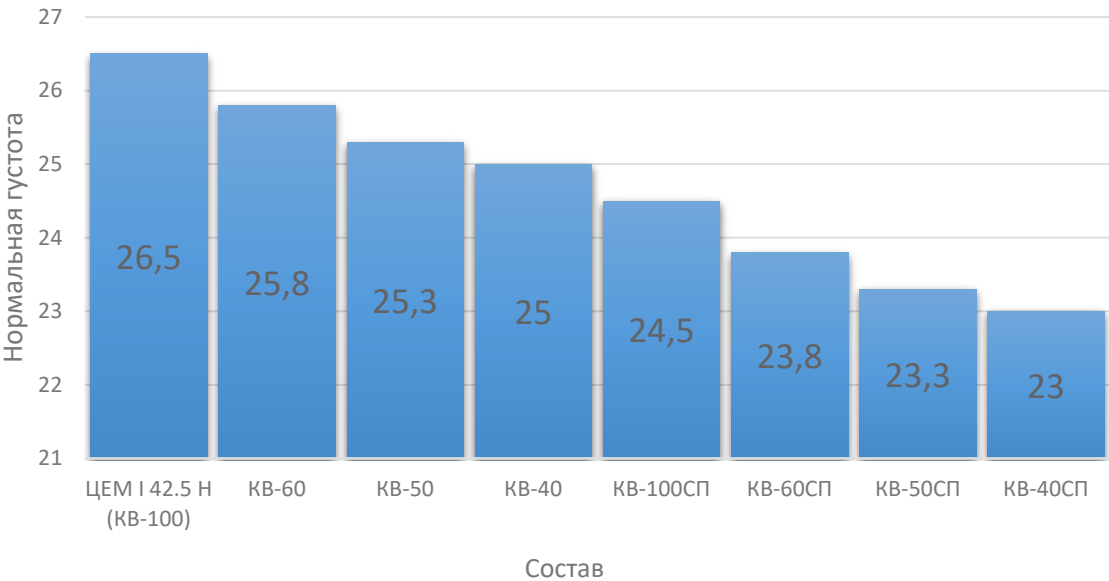


Рисунок 5 – Зависимость нормальной густоты от состава композиционных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of standard consistency on CB composition
Source: compiled by the authors.

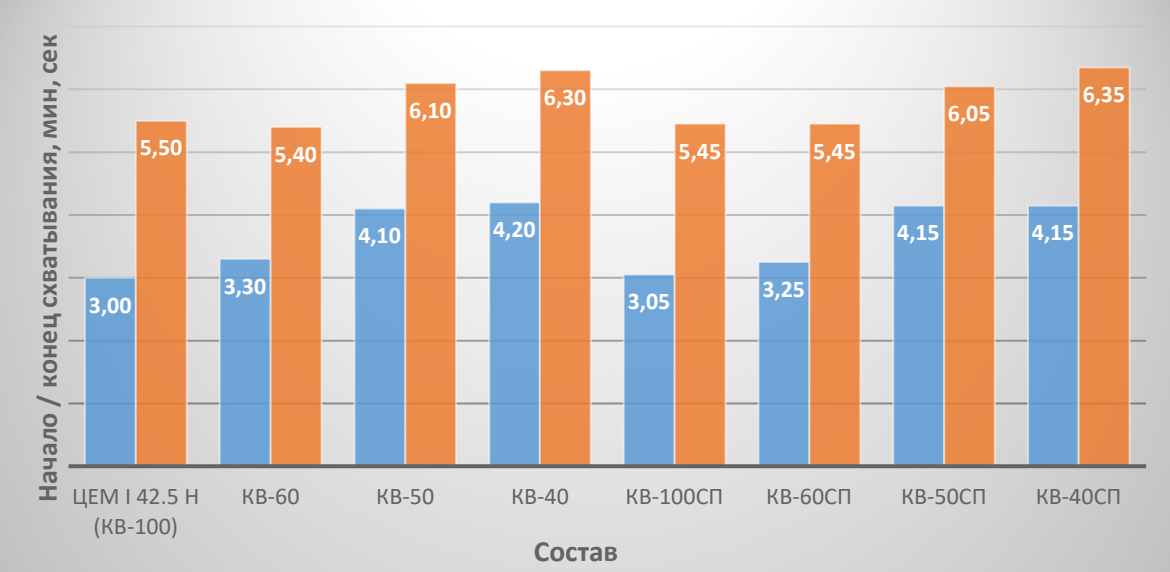


Рисунок 6 – Зависимость сроков схватывания от состава КВ
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of setting time on CB composition
Source: compiled by the authors.

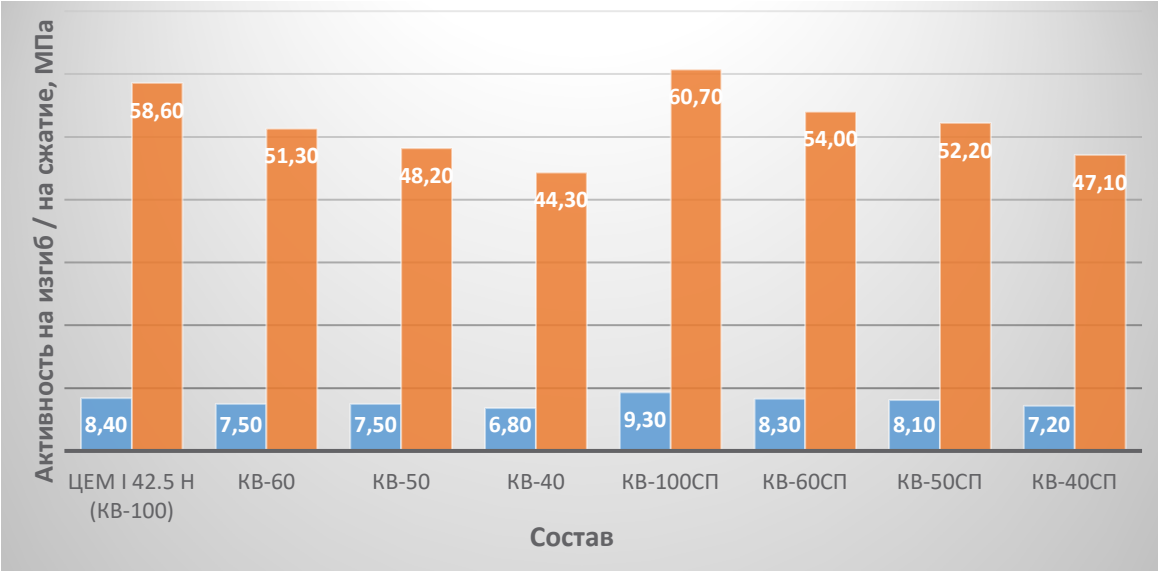


Рисунок 7 – Зависимость активности на изгиб и на сжатие от состава КВ
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dependence of activity in bending and compression on CB composition
Source: compiled by the authors.

Введение суперпластификатора также приводит к снижению густоты цементного теста, потому что суперпластификаторы являются химическими добавками, которые улучшают текучесть и пластичность цементной смеси, позволяя ей лучше распределяться и заполнять пространство. Это приводит к снижению

водоцементного отношения и снижению густоты цементного теста. В обоих случаях снижение густоты нормальной цементного теста является закономерным и ожидаемым результатом разбавления системы отходами ММС и введения суперпластификатора.

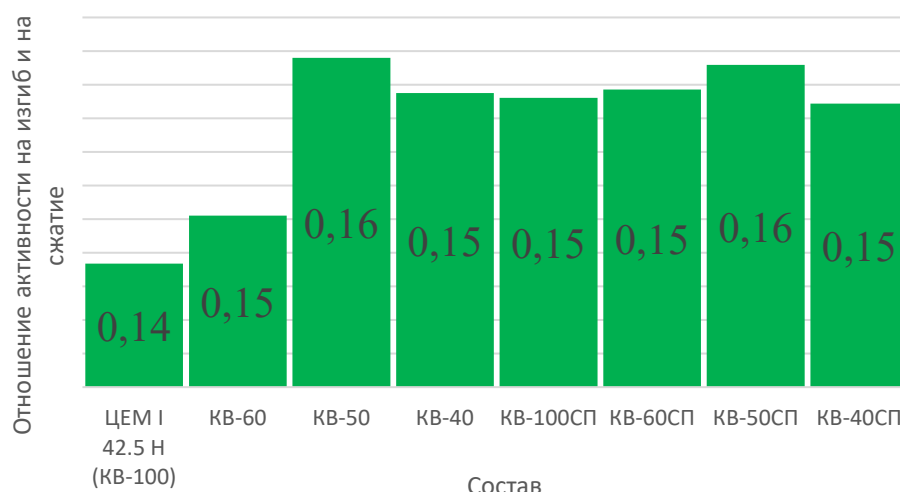


Рисунок 8 – Зависимость отношения активности на изгиб и на сжатие от состава КВ
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Dependence of the activity ratio in bending and compression on the CB composition
Source: compiled by the authors.

Сроки схватывания цементного теста для разработанных вяжущих в общем показывают тенденцию к росту при разбавлении цементной системы отходами ММС (только для КВ-60 конец схватывания снижается на 10 сек). Кстати, подобная тенденция характерна и для состава КВ-60СП, показывая равные значения конца схватывания с составом КВ-100СП (рисунок 6). Добавление суперпластификатора не оказывает явного влияния на сроки схватывания (± 5 сек).

Активность на изгиб и на сжатие для разработанных вяжущих показывают тенденцию к снижению при разбавлении цементной системы отходами ММС как для систем с суперпластификатором, так и без него (рисунок 7). При этом суперпластификатор повышает активность как на сжатие, так и на изгиб в районе 10%.

Выявлено повышение отношения активности на изгиб и на сжатие для всех составов разработанного композиционного вяжущего (рисунок 8). При этом оба состава с 50 мас. % отходов ММС показали это отношение на уровне 0,16, что выше как значения для всех остальных КВ (0,15), так и тем более для контрольного состава (0,14). Это может иметь потенциал повышения трещиностойкости дорожно-строительных материалов на основе композиционного вяжущего (как для основания, так и для покрытия).

Таким образом, добавление выявленного рационального содержания суперпластификатора ПФМ-НЛК (0,6 мас. %) в совместно помолотую систему «портландцемент-отходы ММС» позволило создать широкую номенклатуру композиционных вяжущих, обладающих сроками схватывания от 3 мин 5 сек (начало) до 6 мин 35 сек (конец), активностью на изгиб до 9,3 МПа и на сжатие до 60,7 МПа (при отношении активности на изгиб к активности на сжатие до 0,16).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны композиционные вяжущие дорожного назначения. В результате получены следующие основные научные результаты:

1. Композиционное вяжущее получали путем домолла до удельной поверхности $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108–2020 и отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов Курской магнитной аномалии, запасы которых исчисляются десятками миллиардов тонн и составляют мощную сырьевую базу для получения композиционных вяжущих.

2. Установлено, что у композиционных вяжущих с заменой 50% портландцемента отходами мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов при выявленной рациональной удельной поверхности $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ активность практически сохраняется на том же уровне,

как и у контрольных бездобавочных составов, что позволяет рекомендовать данный вид вяжущего для разработки составов бетонов для дорожного строительства.

3. Добавление выявленного рационального содержания суперпластификатора ПФМ-НЛК (0,6 мас. %) в совместно помолотую систему «портландцемент-отходы ММС» позволило создать широкую номенклатуру композиционных вяжущих, обладающих сроками схватывания от 3 мин 5 сек (начало) до 6 мин 35 сек (конец), активностью на изгиб до 9,3 МПа и на сжатие до 60,7 МПа (*при отношении активности на изгиб к активности на сжатие до 0,16*).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fediuk R., Mochalov A., Timokhin R. Review of methods for activation of binder and concrete mixes. AIMS Materials Science. 2018; Vol. 5. no 5: 916-931.
2. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов: монография. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. Омск, 2011. 420 с.
3. Vinokur R. Infrasonic sound pressure in dwellings at the Helmholtz resonance actuated by environmental noise and vibration, Appl. Acoust. 2004. doi:10.1016/S0003-682X(03)00117-8
4. Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. J. Sound Vib. 2015. doi:10.1016/j.jsv.2015.05.030
5. Tsunekawa S., Kajikawa Y., Nohara S., Ariizumi M., Okada A. Study on the perceptible level for infrasound, J. Sound Vib. 1987. doi:10.1016/S0022-460X(87)80089-5
6. Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, Build. Environ. (2019). doi:10.1016/j.buildenv.2019.03.061.
7. Lang W.W., Higginson R.F. The evolution of the ISO 3740 series of international standards, in: Int. Congr. Noise Control Eng. 2005. INTERNOISE 2005.
8. Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N., Klyuev S.V., Chebakova V.Yu. Study of the plasma-electrolyte process for producing titanium oxide nanoparticles. Construction Materials and Products. 2022; 5 (5): 70 – 79. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-5-70-79>
9. Kim H.K., Lee H.K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete, Appl. Acoust. 2010. doi:10.1016/j.apacoust.2010.02.001.
10. Chen Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus, Constr. Build. Mater. 2017. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161.
11. Maa D.Y. Microperforated-panel wideband absorbers, Noise Control Eng. J. 1987. doi:10.3397/1.2827694
12. Park H.S., Oh B.K., Kim Y., Cho T. Low-frequency impact sound transmission of floating floor: Case study of mortar bed on concrete slab with continuous interlayer, Build. Environ. 2015. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.005.
13. ASTM C423, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method 1, ASTM Int. 2007. doi:10.1520/C0423-17.2.
14. Lesnichenko E.N., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Bocharnikov A.L. Development of a multicomponent gypsum cement binder using the method of mathematical planning of the experiment. Construction Materials and Products. 2022; 5 (2): 5 – 12. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-5-12>
15. Zhuang X.Y., Chen L., Komarneni S., Zhou C.H., Tong D.S., Yang H.M., Yu W.H., Wang H. Fly ash-based geopolymers: clean production, properties and applications. J. Clean. Prod. 125. 2016. 253–267. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019
16. Bradley J.S. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls, in: Acoust. Sci. Technol., 2005. doi:10.1250/ast.26.170.
17. Milford I., Høsoien C.O., Løvstad A., Rindel J.H., Klæboe R. Socio-acoustic survey of sound quality in dwellings in Norway, in: Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Toward a Quieter Future, 2016.
18. International Organization for Standardization, ISO 10534-2, Work. 2001.
19. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method, ASTM Philadelphia. (1999). doi:10.1520/C0384-04R11.2
20. Iwase T., Izumi Y. A new sound tube measuring method for propagation constant in porous material: Method without any air space at the back of test material. J. Acoust. Soc. Japan. 1996. doi:10.20697/jasj.52.6_411
21. Feng L. Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials, Appl. Acoust. 2013. doi:10.1016/j.apacoust.2013.06.013
22. Mastali M., Kinnunen P., Isomäki H., Karhu M., Illikainen M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates, Constr. Build. Mater. 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.228
23. ISO 717-1 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, Standards. 2013.
24. Mašović D.B., Pavlović D.S.Š., Mijić M.M. On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation, J. Acoust. Soc. Am. 2013. doi:10.1121/1.4824629
25. Di Bella A., Granzotto N., Pavarin C. Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements, in: Proc. Forum Acust. 2014.

26. Guigou-Carter C., Balanant N. Acoustic comfort evaluation in lightweight wood-based and heavyweight concrete-based buildings, in: INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng., 2015.
27. Yang W., Kang J. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2004.07.011
28. Bradley J.S. Deriving acceptable values for party wall sound insulation from survey results, in: *Internoise 2001*, 2001.
29. Mihai T., Iordache V., Determining the Indoor Environment Quality for an Educational Building, in: *Energy Procedia*. 2016. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.246
30. Hørsøien C.O., Rindel J.H., Løvstad A., Klæboe R. Impact sound insulation and perceived sound quality, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Toward a Quieter Future*, 2016.
31. Li M., Khelifa M., Khennane A., El Ganaoui M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork, *Compos. Struct.* 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2018.10.079
32. Kuznetsov O.F., Ivanova A.P., Vasilyeva M.A., Deligirova V.V., Piskareva T.I., Mezhueva L.V. Alternative method of experimental measurement of the angle of deviation from the verticality of the frame in design and construction. *Construction Materials and Products*. 2022; 5 (2): 13 – 21. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-13-21>
33. Hagberg K.G. Evaluating field measurements of impact sound, *Build. Acoust.* 2010. doi:10.1260/1351-010X.17.2.105
34. Ljunggren F., Simmons C., Hagberg K. Correlation between sound insulation and occupants' perception - Proposal of alternative single number rating of impact sound, *Appl. Acoust.* 2014. doi:10.1016/j.apacoust.2014.04.003
35. Bodlund K. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings, *J. Sound Vib.* 1985. doi:10.1016/S0022-460X(85)80149-8
36. Hopkins C., Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2005.04.005.
37. Klyuev S.V., Kashapov N.F., Radaykin O.V., Sabitov L.S., Klyuev A.V., Shchekina N.A. Reliability coefficient for fibreconcrete material. *Construction Materials and Products*. 2022; 5 (2): 51 – 58. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58>
38. Da Rocha R.E., Maiorino A.V., Dias L.L., Smiderle R., Bertoli S.R. Field investigations of the sound insulation performance in a brazilian public school building, in: *INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng.* 2015.
39. International Organization for Standardization, *ISO 14044*, 2006.
40. Cassidy M., Cooper R.K., Gault R., Wang J. Evaluation of standards for transmission loss tests, in: *Proc. - Eur. Conf. Noise Control*. 2008. doi:10.1121/1.2933313
41. LoVerde J.J., Dong W. Investigation of a two-parameter system of evaluating impact noise insulation, in: *14th Int. Congr. Sound Vib.* 2007, *ICSV 2007*, 2007.
42. Zhang B., Poon C.S. Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete, *J. Clean. Prod.* 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.044
43. Strelkov Yu.M., Sabitov L.S., Klyuev S.V., Klyuev A.V., Radaykin O.V., Tokareva L.A. Technological features of the construction of a demountable foundation for tower structures. *Construction Materials and Products*. 2022. 5 (3). P. 17 – 26. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-3-17-26>
44. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, *Constr. Build. Mater.* 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107.
45. Tada S. Material design of aerated concrete- An optimum performance design, *Mater. Struct.* 1986. doi:10.1007/BF02472306.
46. Cellular Concretes Part 2 Physical Properties, *ACI J. Proc.* 1954. doi:10.14359/11795
47. Jones M.R., McCarthy M.J., McCarthy A. Moving fly ash utilisation in concrete forward: A UK perspective, *Int. Ash Util. Symp. Cent. Appl. Energy Res. Univ. Kentucky*. 2003.
48. Allard J.F., Atalla N. *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, 2009. doi:10.1002/9780470747339.
49. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Теоретические предпосылки создания цементных композитов повышенной непроницаемости // *Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ»*. 2016;(1(47)): 65–72.

REFERENCES

1. Fediuk R., Mochalov A., Timokhin R. Review of methods for activation of binder and concrete mixes. *AIMS Materials Science*. 2018; 5. No: 5916-931.
2. Lesovik V.S., Chulkova I.L. *Structural management of building composites: monograph*. Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobil'no-dorozhnaja akademija. Omsk, 2011: 420. (in Russ.)
3. Vinokur R. Infrasonic sound pressure in dwellings at the Helmholtz resonance actuated by environmental noise and vibration, *Appl. Acoust.* 2004. doi:10.1016/S0003-682X(03)00117-8
4. Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. *J. Sound Vib.* 2015. doi:10.1016/j.jsv.2015.05.030
5. Tsunekawa S., Kajikawa Y., Nohara S., Ariizumi M., Okada A. Study on the perceptible level for infrasound, *J. Sound Vib.* 1987. doi:10.1016/S0022-460X(87)80089-5
6. Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, *Build. Environ.* 2019. doi:10.1016/j.buildenv.2019.03.061
7. Lang W.W., Higginson R.F. The evolution of the ISO 3740 series of international standards, in: *Int. Congr. Noise Control Eng.* 2005. *INTERNOISE 2005*.
8. Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N., Klyuev S.V., Chebakova V.Yu. Study of the plas-

ma-electrolyte process for producing titanium oxide nanoparticles. *Construction Materials and Products*. 2022; 5 (5): 70 – 79. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-5-70-79>

9. Kim H.K., Lee H.K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete, *Appl. Acoust.* 2010. doi:10.1016/j.apacoust.2010.02.001

10. Chen Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus, *Constr. Build. Mater.* 2017. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161

11. Maa D.Y. Microperforated-panel wide-band absorbers, *Noise Control Eng. J.* 1987. doi:10.3397/1.2827694

12. Park H.S., Oh B.K., Kim Y., Cho T. Low-frequency impact sound transmission of floating floor: Case study of mortar bed on concrete slab with continuous interlayer, *Build. Environ.* 2015. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.005

13. ASTM C423, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method 1, ASTM Int. 2007. doi:10.1520/C0423-17.2

14. Lesnichenko E.N., Chernysheva N.V., Drezbegova M.Yu., Kovalenko E.V., Bocharnikov A.L. Development of a multicomponent gypsum cement binder using the method of mathematical planning of the experiment. *Construction Materials and Products*. 2022; 5 (2): 5 – 12. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-5-12>

15. Zhuang X.Y., Chen L., Komarneni S., Zhou C.H., Tong D.S., Yang H.M., Yu W.H., Wang H. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *J. Clean. Prod.* 125. 2016: 253–267. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019

16. Bradley J.S. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls, in: *Acoust. Sci. Technol.*, 2005. doi:10.1250/ast.26.170

17. Milford I., Hønsøien C.O., Løvstad A., Rindel J.H., Klæboe R. Socio-acoustic survey of sound quality in dwellings in Norway, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Towar. a Quieter Futur.*, 2016.

18. International Organization for Standardization, ISO 10534-2, Work. 2001.

19. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method, ASTM Philadelphia. (1999). doi:10.1520/C0384-04R11.2

20. Iwase T., Izumi Y. A new sound tube measuring method for propagation constant in porous material: Method without any air space at the back of test material. *J. Acoust. Soc. Japan.* 1996. doi:10.20697/jasj.52.6_411

21. Feng L. Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials, *Appl. Acoust.* 2013. doi:10.1016/j.apacoust.2013.06.013

22. Mastali M., Kinnunen P., Isomoisio H., Karhu M., Illikainen M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.228

23. ISO 717-1 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, Standards. 2013.

24. Mašović D.B., Pavlović D.S.Š., Mijić M.M. On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation, *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. doi:10.1121/1.4824629

25. Di Bella A., Granzotto N., Pavarin C. Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements, in: *Proc. Forum Acust.* 2014.

26. Guigou-Carter C., Balanant N. Acoustic comfort evaluation in lightweight wood-based and heavyweight concrete-based buildings, in: *INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng.*, 2015.

27. Yang W., Kang J. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2004.07.011

28. Bradley J.S. Deriving acceptable values for party wall sound insulation from survey results, in: *Inter-noise 2001*, 2001.

29. Mihai T., Iordache V., Determining the Indoor Environment Quality for an Educational Building, in: *Energy Procedia*. 2016. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.246

30. Hønsøien C.O., Rindel J.H., Løvstad A., Klæboe R. Impact sound insulation and perceived sound quality, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 – 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Towar. a Quieter Futur.*, 2016.

31. Li M., Khelifa M., Khennane A., El Ganaoui M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork, *Compos. Struct.* 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2018.10.079

32. Kuznetsov O.F., Ivanova A.P., Vasilyeva M.A., Deligirova V.V., Piskareva T.I., Mezhueva L.V. Alternative method of experimental measurement of the angle of deviation from the verticality of the frame in design and construction. *Construction Materials and Products*. 2022; 5 (2): 13 – 21. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-13-21>

33. Hagberg K.G. Evaluating field measurements of impact sound, *Build. Acoust.* 2010. doi:10.1260/1351-010X.17.2.105

34. Ljunggren F., Simmons C., Hagberg K. Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, *Appl. Acoust.* 2014. doi:10.1016/j.apacoust.2014.04.003

35. Bodlund K. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings, *J. Sound Vib.* 1985. doi:10.1016/S0022-460X(85)80149-8

36. Hopkins C., Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2005.04.005

37. Klyuev S.V., Kashapov N.F., Radaykin O.V., Sabitov L.S., Klyuev A.V., Shchekina N.A. Reliability

coefficient for fibreconcrete material. *Construction Materials and Products*. 2022; 5 (2): 51 – 58. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58>

38. Da Rocha R.E., Maiorino A.V., Dias L.L., Smid-erle R., Bertoli S.R. Field investigations of the sound insulation performance in a brazilian public school building, in: *INTER-NOISE 2015 – 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng.* 2015.

39. International Organization for Standardization, ISO 14044, 2006.

40. Cassidy M., Cooper R.K., Gault R., Wang J. Evaluation of standards for transmission loss tests, in: *Proc. - Eur. Conf. Noise Control*. 2008. doi:10.1121/1.2933313.

41. LoVerde J.J., Dong W. Investigation of a two-parameter system of evaluating impact noise insulation, in: *14th Int. Congr. Sound Vib.* 2007, ICSV 2007, 2007.

42. Zhang B., Poon C.S. Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete, *J. Clean. Prod.* 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.044.

43. Strelkov Yu.M., Sabitov L.S., Klyuev S.V., Klyuev A.V., Radaykin O.V., Tokareva L.A. Technological features of the construction of a demountable foundation for tower structures. *Construction Materials and Products*. 2022; 5 (3): 17 – 26. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-3-17-26>

44. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, *Constr. Build. Mater.* 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107.

45. Tada S. Material design of aerated concrete-An optimum performance design, *Mater. Struct.* 1986. doi:10.1007/BF02472306.

46. Cellular Concretes Part 2 Physical Properties, *ACI J. Proc.* 1954. doi:10.14359/11795.

47. Jones M.R., McCarthy M.J., McCarthy A. Moving fly ash utilisation in concrete forward: A UK perspective, *Int. Ash Util. Symp. Cent. Appl. Energy Res. Univ. Kentucky*. 2003.

48. Allard J.F., Atalla N. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, 2009. doi:10.1002/9780470747339.

49. Lesovik B.S., Fedyuk R.S. Theoretical prerequisites of creation of cement composites of the increased impermeability. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016;(1(47)):65-72. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Клюев С.В. Научное консультирование, обработка экспериментальных данных.

Золотарева С.В. Изучение степени разработанности темы, работа с текстом статьи.

Аюбов Н.А. Выведение зависимостей, оформление графиков, написание и оформление статьи.

Федюк Р.С. Общее руководство, формулирование цели задач и выводов, работа с текстом статьи, внес основной вклад в ее написание.

Лисейцев Ю.Л. Проведение лабораторных исследований.

STATED CONTRIBUTION OF AUTHORS

Sergey V. Klyuev Scientific consulting, experimental data processing.

Svetlana V. Zolotareva Degree of the topic development studying, working with the text of the article.

Narman A. Ayubov Derivation of the dependencies, design of graphs, the article layout.

Roman S. Fedyuk General management, purposes, tasks and conclusions statement, work with the text of the article, the main contribution to the article writing.

Yuri L. Liseytshev Laboratory research conducting.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюев Сергей Васильевич – проф. кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3217-6874>, SPIN-код: 5944-3648, e-mail: klyuyev@yandex.ru

Золотарева Светлана Васильевна – аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7540-8164>, SPIN-код: 8163-2932 e-mail: svet.zolotarewa2012@yandex.ru

Аюбов Нарман Аюбович – доц. Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (364906, г. Грозный, ул. Старопромысловское шоссе, 21а), ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8129-9598>, SPIN-код: 7535-2811, e-mail: yrekly@mail.ru

Федюк Роман Сергеевич – проф. военного учебного центра ФГАОУ ВО «ДВФУ» (690950, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10); ведущий научный сотрудник Института химии Дальневосточного отделения Российской академии наук (690022, г. Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2279-1240>, Scopus ID: 57199850188, SPIN-код: 6664-3813, e-mail: roman44@yandex.ru

Лисейцев Юрий Леонидович – соискатель Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (679015, г. Биробиджан, ул. Пионерская, 60), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4515-6880>, e-mail: y.liss@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Klyuev – Professor of the Theoretical Mechanics and Strength of Materials Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3217-6874>, SPIN-код: 5944-3648, e-mail: klyuyev@yandex.ru

Svetlana V. Zolotareva – Postgraduate student of the Theoretical Mechanics and Strength of Materials Department, V.G. Shukhov Belgorod

State Technological University (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7540-8164>, SPIN-код: 8163-2932, e-mail: svet.zolotarewa2012@yandex.ru

Narman A. Ayubov – Associate Professor, H.I. Ib-Ragimov Institute of Russian Academy of Sciences (21 A Staropromyslovskoe shosse, Grozny, 364906), ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8129-9598>, SPIN-код: 7535-2811, e-mail: yrekly@mail.ru

Roman S. Fediuk. Professor – the Military Training Center of the Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (10 Russkii

Island, Ajax, Vladivostok, 690950), leading researcher at the Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (159 Vladivostok 100th Anniversary Prospekt, Vladivostok, 690022), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2279-1240>, Scopus ID: 57199850188, SPIN-код: 6664-3813, e-mail: roman44@yandex.ru

Yuri L. Liseitsev – Degree Candidate, Sholom Aleichem Amur State University (60 Pionerskaya, Birobidzhan, 679015), ORCID: 0000-0002-4515-6880, e-mail: y.liss@mail.ru