

Научная статья
УДК 691.3
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-102-113>
EDN: QCLYYM



КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДУКТОВ РЕЦИКЛИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.С. Лесовик, В.А. Дудченко ✉, **А.С. Сальникова, О.В. Казлитина**
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
✉ dudchenko.v.a@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное строительство сталкивается с необходимостью экономии природных ресурсов и сокращения объемов строительных отходов, ежегодно образующихся в количестве десятков миллионов тонн в России и странах СНГ. Особенно актуальной проблема утилизации становится в условиях восстановления территорий, пострадавших от военных действий, таких как ЛНР и ДНР и новые регионы Российской Федерации, где разрушенные здания представляют собой как экологическую угрозу, так и потенциальный источник вторичного сырья. Разработка технологий для производства композиционных вяжущих на основе продуктов рециклинга, таких как бой керамзитобетона, является стратегически важной задачей, позволяющей решать экологические проблемы, снижать затраты на восстановление и ускорять темпы строительства.

Цель написания статьи. Целью исследования является разработка и обоснование применения композиционных вяжущих на основе портландцемента с использованием тонкоизмельченного боя керамзитобетона (КБ) в качестве минеральной добавки. Задачи включают изучение влияния удельной поверхности (400 и 1000 м²/кг) и массовой доли добавки (5, 15, 25%) на физико-механические свойства вяжущих, такие как нормальная плотность, плотность и прочность цементного камня, для определения оптимального состава.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовались: портландцемент ЦЕМ I 42,5 (Новоросцемент), кварцевый песок и бой керамзитобетона (КБ). Получение композиционных вяжущих осуществлялось путем совместного помола цемента с предварительно дробленным (фракция 0,14–1,25 мм) КБ до удельной поверхности 400 и 1000 м²/кг. Исследования проводились в соответствии со стандартными методами испытаний в лабораториях Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Определялись нормальная плотность, плотность и прочность на сжатие (в возрасте 7, 14 и 28 сут) образцов-кубов размером 3×3×3 см. При подборе составов руководствовались «законом структурного родства», предполагающим, что совместимость компонентов по составу и структуре обеспечивает лучшие эксплуатационные свойства.

Обсуждение и заключение. Экспериментальные исследования подтвердили, что введение боя керамзитобетона в состав вяжущего позволяет снизить нормальную плотность (водопотребность) и повысить прочность цементного камня при оптимальных параметрах. Наилучшие результаты показал состав с 15% добавки КБ, измельченного до удельной поверхности 1000 м²/кг (состав 5), который достиг максимальной прочности на сжатие – 76,34 МПа на 28 сут, что превышает прочность контрольного образца (70,94 МПа). Это связано с высокой реакционной способностью тонкоизмельченных частиц, способствующих формированию более плотной и однородной структуры. Использование грубодисперсной фракции (400 м²/кг) или превышение дозировки до 25% приводит к снижению прочностных характеристик. Таким образом, оптимальным является введение 15% тонкоизмельченного (S_{уд}=1000 м²/кг) боя керамзитобетона, что позволяет эффективно замещать цемент без потери качества и улучшать эксплуатационные свойства вяжущего.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бой керамзитобетона, композиционное вяжущее, удельная поверхность, минеральная добавка, прочность, вторичные ресурсы

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. В.С. Лесовик – член редакционной коллегии журнала «Вестник СиБАДИ». Журнал «Вестник СиБАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

© Лесовик В.С., Дудченко В.А., Сальникова А.С., Казлитина О.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Статья поступила в редакцию 02.10.2025; одобрена после рецензирования 05.11.2025; принята к публикации 16.02.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Лесовик В.С., Дудченко В.А., Сальникова А.С., Казлитина О.В. Композиционные вяжущие с использованием продуктов рециклинга строительных материалов // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 102-113. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-102-113>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-102-113>

EDN: QCLYYM

COMPOSITE BINDERS WITH PRODUCTS OF BUILDING MATERIALS RECYCLING

Valery.S. Lesovik, Valeria A. Dudchenko ✉, **Alyona S. Salnikova, Olga V. Kazlitina**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Belgorod, Russia

✉ corresponding author
dudchenko.v.a@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Modern construction deals with the need to conserve natural resources and reduce construction wastes produced in huge amounts annually, up to millions tons in Russia and in the CIS countries. The problem of recycling becomes especially urgent in the context of the restoration of territories affected by military operations, such as the LPR and the DPR, where destroyed buildings pose both an environmental threat and provide a potential source of secondary raw materials. The development of technologies for the production of composite binders based on recycling products, such as expanded clay, is a strategically important task that allows solving environmental problems, reducing restoration costs and construction speed by localizing resources.

The purpose of the study is to develop and provide rationale for the use of composite binders based on Portland cement and finely ground expanded clay concrete (CB) as a mineral additive. The tasks include studying the effect of the specific surface area (400 and 1000 m²/kg) and the mass fraction of the additive (5%, 15%, and 25%) on the physical and mechanical properties of binders, such as normal density, density and strength of cement stone, to determine the optimal composition.

Materials and methods. The following recycled materials were used: Portland cement CEM I 42,5 (New cement), quartz sand and expanded clay concrete (CB). Composite binders were obtained by co-grinding cement and pre-crushed (fraction 0.14-1.25 mm) cement to obtain a specific surface area of 400 and 1000 m²/kg. The research was conducted in accordance with standard test methods in the laboratories of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The normal density, density, and compressive strength (at the ages of 7, 14, and 28 days) of 3×3×3 cm cube samples were analyzed. Composition determination was based on the structural affinity law, which assumes that the compatibility of components in composition and structure ensures the best operational properties.

Discussion and Conclusion. Experimental studies have confirmed that the introduction of expanded clay concrete into the binder makes it possible to reduce the normal density (water consumption) and increase the strength of cement stone at optimal parameters. The best results were shown by the composition with 15% CB additive, crushed to a specific surface area of 1000 m²/kg (Composition 5), which reached a maximum compressive strength of 76.34 MPa on day 28, which exceeds the strength of the control sample (70.94 MPa). This is due to high reactivity of fine particles, which contribute to a more dense and homogeneous structure. The use of a coarse fraction (400 m²/kg) or exceeding the dosage by up to 25% leads to a decrease in strength characteristics. Thus, it is optimal to introduce 15% finely ground ($S_k = 1000 \text{ m}^2/\text{kg}$) expanded clay concrete, which makes it possible to effectively replace cement without loss of quality and improve the performance properties of the binder.

© Lesovik Valery.S., Dudchenko Valeria A., Salnikova Alyona S., Kazlitina Olga V., 2026



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

KEYWORDS: *broken expanded clay concrete, composite binder, specific surface area, mineral additive, strength, recycled materials*

CONFLICT OF INTEREST: *the authors declare no conflict of interest. V.S. Lesovik is a member of the editorial board of The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal requires reviewing all the manuscripts, regardless of their authors status.*

ACKNOWLEDGEMENT: *This research was supported by a grant from The Russian Science Foundation (project No 25-19-00866). The authors gratefully acknowledge providing research facilities by the Center for High Technologies of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.*

The article was submitted: October 02, 2025; approved after reviewing: November 05, 2025; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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.

For citation. Lesovik V.S., Dudchenko V.A., Salnikova A. S., Kazlitina O.V. Composite binders with products of building materials recycling. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2026; 23 (1): 102-113. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-102-113>

ВВЕДЕНИЕ

Современная строительная отрасль стоит перед лицом глобальных вызовов, среди которых ключевыми являются необходимость снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду и переход к принципам устойчивого развития. Одним из наиболее ресурсоемких и экологически проблемных секторов является производство традиционных вяжущих материалов, в первую очередь портландцемента. На его долю приходится до 8–10% общемировых выбросов углекислого газа (CO_2), что связано с высокоэнергоёмким процессом обжига сырьевой смеси и неизбежными химическими реакциями декарбонизации. В условиях ужесточения экологического законодательства и роста стоимости энергоносителей поиск альтернативных, «зеленых» технологий становится не просто актуальным, а стратегически необходимым [1, 2, 3].

Параллельно с этой проблемой существует другая, не менее значимая, – накопление огромного объема строительных и демонтажных отходов. Ежегодно в мире образуются миллиарды тонн таких отходов, значительную часть которых составляют отсеvy дробления бетонного и керамзитобетонного лома. Традиционно они направляются на полигоны для захоронения, что приводит к отчуждению земель, загрязнению почв и грунтовых вод. Однако эти материалы, уже прошедшие первичный цикл использования, обладают значительным ресурсным потенциалом благодаря своему минералогическому составу.

Перспективным направлением представляется разработка и внедрение композиционных вяжущих с использованием продуктов

рециклинга строительных материалов. Суть данного подхода заключается в частичной замене клинкерной составляющей портландцемента (до 30–50% и более) тонкомолотыми минеральными добавками, полученными из отходов дробления, в частности керамзитобетона. Такие добавки являются не только эффективным разбавителем, снижающим расход клинкера и, как следствие, углеродный след вяжущего, но и активным компонентом, влияющим на формирование структуры и свойства конечного продукта [4, 5, 6].

Актуальность настоящего исследования обусловлена комплексом факторов:

- Экологическим: сокращение выбросов CO_2 и потребления природных ресурсов (известняка, мела и глины) за счет снижения объемов производства клинкера.

- Экономическим: утилизация строительных отходов позволяет снизить затраты на их захоронение и получить дешевый компонент для вяжущего, что уменьшает себестоимость продукции.

- Техническим: получение вяжущих с новыми или улучшенными свойствами (пониженное тепловыделение, повышенная сульфатостойкость, долговечность).

Особую остроту проблема обращения со строительными отходами приобретает в контексте реализации крупномасштабных государственных проектов, таких как программа реновации жилищного фонда, инициированная в 2017 г. и активно реализуемая в Москве, а также рассматривающаяся к внедрению в других регионах России. В рамках этой программы планируется снос более 5 000 пятиэтажных зданий и строительство современного жилья для порядка одного миллиона человек.

При этом только в Москве ежегодно образуются миллионы тонн строительного лома – в основном железобетонных конструкций. Эффективная переработка и повторное использование этого потенциального вторичного сырья становятся критически важными как с экологической, так и с экономической точки зрения. Вовлечение отходов реновации в производство новых строительных материалов, в том числе в составе альтернативных вяжущих, может не только снизить нагрузку на полигоны, но и уменьшить зависимость от первичных природных ресурсов, сократить транспортные издержки и внести вклад в достижение целей «зелёной» экономики [7, 8, 9].

Стоит отметить, что в середине XX в. большинство построек исчерпали свой ресурс, что приводит к массовому демонтажу зданий и образованию огромного количества отходов, таких как керамзитобетонный бой и бетонный лом. Ежегодное образование бетонного лома в одной только России и странах СНГ достигает десятков миллионов тонн. К тому же на фоне разрушений, вызванных военными действиями на территориях Луганской и Донецкой Народных Республик, проблема утилизации строительного мусора приобретает критическое значение. Разрушенные здания, значительная часть которых построена из керамзитобетона, представляют собой не только экологическую угрозу, но и потенциальный источник вторичного сырья для восстановления [10, 11, 12].

Особый интерес представляет использование именно отсеков дробления керамзитобетона. В отличие от отходов тяжелого бетона, в состав которых входит плотный щебень, керамзитобетон содержит в своем составе легкий пористый заполнитель – керамзит. Продукты его дробления, помимо частиц цементного камня, включают в себя многочисленные обломки керамзитовых гранул. Эти обломки, будучи измельченными до микронных размеров, проявляют выраженную пуццолановую и микронаполнительную активность. Высокодисперсные частицы керамзита, богатые аморфными оксидами кремния и алюминия (SiO_2 и Al_2O_3), способны вступать в реакцию с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), образующимся при гидратации цемента, формируя дополнительные количества прочных гидросиликатов кальция [13, 14]. Это приводит к уплотнению цементного камня, улучшению его микроструктуры и повышению прочностных характеристик композита.

Закон подобия представляет собой фундаментальный принцип, регулирующий взаи-

модействие компонентов в полиминеральных твердеющих системах. Его реализация предполагает соблюдение трёх ключевых условий:

- использование нескольких тонкодисперсных полиминеральных веществ, включающих как аморфные, так и кристаллические фазы;
- наличие подобия свойств, понимаемое как соизмеримость физико-механических (коэффициент температурного изменения объёма, деформативные характеристики), физико-химических (электродный потенциал, знак заряда поверхности) и энергетических (свободная энергия, энергия атомизации, энергоплотность) параметров компонентов;
- высокие адгезионные свойства взаимодействующих фаз.

Ключевым следствием подобия свойств компонентов является близость их физико-механических и химических характеристик, что позволяет получить сопоставимые коэффициенты теплового расширения и деформативных показателей. Это, в свою очередь, обеспечивает термомеханическую совместимость фаз в процессе эксплуатации, что является определяющим фактором для достижения высокой прочности и долговечности композита. Данный вывод подтверждается наблюдаемыми прочностными и долговечностными характеристиками природных аналогов строительных материалов, которые также демонстрируют высокую стабильность за счет естественной гармонии свойств составляющих компонентов.

Напротив, нарушение принципа подобия, в частности, применение компонентов с существенно различающимися по величине физико-механическими и энергетическими характеристиками, приводит к замедлению кинетики гидратационных процессов, снижению степени кристалличности системы и ухудшению эксплуатационных свойств конечного материала.

Таким образом, закон подобия служит методологической основой для целенаправленного подбора природного и техногенного сырья при проектировании строительных композитов с заданными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками [15, 16, 17, 18].

Кристаллографическая и гранулометрическая структура: подобие форм и размеров частиц способствует плотной упаковке и формированию однородной структуры.

Коэффициент термического расширения (КТР): различие в КТР не должно превышать 8%, иначе при температурных колебаниях воз-

никают внутренние напряжения, приводящие к растрескиванию и разрушению.

Фазовый состав и поведение воды, сродство по фазовым переходам воды в порах критически важной для морозостойкости и долговечности. Этот закон предполагает, что композит – это не просто смесь, а сложная самоорганизующаяся система, где каждый элемент выполняет свою функцию, а любое изменение одного компонента влияет на свойства всей системы [19, 20].

Продукты рециклинга (дробленый бетон, кирпичный бой, бой керамзитобетона и т.д.) обладают огромным потенциалом как минеральные наполнители и заполнители. Однако их успешное внедрение требует строгого соблюдения принципов сродства структур.

Раздельный помол определенной фракции заполнителя (например, отсевом кварцито-песчаника) позволяет создать композиционное вяжущее с заданной удельной поверхностью. Это способствует самоорганизации системы и формированию однородной нано- и микро-структуры, что повышает прочность и снижает водопроницаемость вяжущего.

Таким образом, разработка композиционных вяжущих на основе продуктов переработки керамзитобетонных отходов представляет собой яркий пример реализации экономики замкнутого цикла (circular economy) в строительстве. Данная работа направлена на исследование влияния тонкомолотых отсеков дробления керамзитобетона на физико-механические свойства композиционных вяжущих и оценку потенциала их применения для получения эффективных и экологически безопасных строительных материалов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве исходных компонентов для разработки композиционных вяжущих использованы портландцемент ЦЕМ I 42,5 ПЦ-500 Д-0 (Новоросцемент Верхнебаканский ВБЦЗ, г. Новороссийск) Для получения композиционного вяжущего осуществлялось дробление керамзитобетона в лабораторной щёковой дробилке ЩД10, далее был осуществлен отбор фракций 0–1,25 мм, которые измельчались до $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ в роторно-шаровой мельнице. И после вводили в портландцемент в различном количестве. В полученную смесь добавили воду до достижения нормальной густоты, определяемой с помощью прибора Вика, тщательно перемешивали и помещали в формы 30×30×30 мм. Затем их составы расформовывали и хранили в воде до дости-

жения требуемого возраста испытаний – 7, 14 и 28 сут. Испытания на прочность при сжатии проводили на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4. Нагружение осуществляли с постоянной скоростью, соответствующей требованиям ГОСТ 310.4–81.

Для оценки влияния дозировки добавки были исследованы три варианта замещения цемента:

5% – минимальное содержание, направленное на изучение порогового эффекта;

15% – среднее содержание, потенциально оптимальное по балансу свойств;

25% – максимальное содержание, при котором ещё возможно сохранение приемлемых характеристик вяжущего.

Контрольный образец (без добавки КБ) использовался для сравнительной оценки.

Такой подход обеспечивает эффективное взаимодействие компонентов, повышение реакционной способности добавок и формирование высококачественной цементной матрицы.

Исследования включали определение физико-механических свойств вяжущих, таких как нормальная густота и прочность цементного камня.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как уже упоминалось выше, применение переработки керамзитобетона (КБ) и утилизация его в виде минеральной добавки входящей в состав композиционного вяжущего с заменой соответствующей части цемента имеет большой потенциал. Настоящими исследованиями была определена эффективность введения КБ в вяжущее, которая напрямую зависит от удельной поверхности частиц КБ и массовой доли в составе смеси.

Оптимальное содержание рециклинга керамзитобетона обеспечивает улучшение технологических и эксплуатационных свойств материала. Однако превышение допустимой концентрации может привести к ухудшению механических показателей и увеличению водопоглощения. Таким образом, подбор рационального сочетания дисперсности и количества добавки является ключевым фактором при производстве композиционного вяжущего с использованием КБ.

Удельная поверхность ($S_{уд}$) – это суммарная площадь поверхности всех частиц добавки на единицу массы ($\text{м}^2/\text{кг}$). Чем выше этот показатель, тем больше реакционная способность материала, поскольку увеличивается контактная зона между частицами добавки и цементным камнем. Поэтому в исследовании использовали достаточно разные значения удельных

поверхностей минеральных добавок: $S_{уд} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ – тонкоизмельчённая фракция, обладающая высокой реакционной активностью, и $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ – грубодисперсная фракция, характеризующаяся меньшей активностью, но способная выполнять функцию микронаполнителя и регулятора реологических свойств.

Экспериментальным путем при помощи прибора Вика была определена нормальная густота вяжущих с различной дозировкой минеральных добавок, полученных из КБ: при 25% $S_{уд} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ – НГ=27,68% и $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ – НГ=27,57%; при 15% $S_{уд} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ – НГ=27,5% и $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ – НГ=27,62%; при 5% $S_{уд} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ – НГ=27,43% и $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ – НГ=27,37%; и контрольный без добавки – НГ=28,0%.

Анализ полученных данных показывает, что введение переработанного керамзитобетона (КБ) в состав вяжущего снижает нормальную густоту по сравнению с контрольным образцом (28,0%), что свидетельствует об уменьшении водопотребности системы и, как следствие, потенциальном улучшении плотности и прочности цементного камня за счёт снижения водоцементного отношения.

Наименьшее значение НГ (27,37%) зафиксировано при дозировке 5% и удельной поверхности $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ – это может быть связано с эффектом микронаполнения грубодисперсной фракции, которая частично замещает цемент, не требуя дополнительной воды для смачивания, в отличие от более активной, но более водопотребной тонкоизмельчённой фракции ($S_{уд} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$).

Однако с увеличением дозировки добавки наблюдается тенденция к росту НГ, особенно при использовании высокодисперсной фракции:

при 5% → 27,43% ($S_{уд} = 1000$);

при 15% → 27,50%;

при 25% → 27,68%.

Это объясняется тем, что частицы с высокой удельной поверхностью обладают большей адсорбционной способностью и требуют больше воды для достижения стандартной консистенции. В то же время грубодисперсная фракция ($400 \text{ м}^2/\text{кг}$) демонстрирует более стабильное поведение: её влияние на НГ менее выражено, а при 25% даже снижается по сравнению с 15% (27,57% против 27,62%), что может указывать на предельное насыщение системы и эффект «разбавления» цементного теста [20, 21, 22, 23].

Таким образом, оптимальное соотношение дисперсности и дозировки позволяет не только снизить расход цемента, но и управлять реологическими свойствами вяжущего. Хотя минимальная водопотребность достигается при низкой дозировке (5%) и грубой фракции, для обеспечения комплекса требуемых свойств (включая прочность и долговечность) необходимо рассматривать баланс между снижением НГ и реакционной способностью добавки, что подтверждается дальнейшими испытаниями на прочность.

Из полученных составов были заформованы образцы размером $3 \times 3 \times 3$ и испытаны на 7, 14 и 28 сут, составы представлены в таблице.

Таблица
Составы полученных композиционных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table
Compositions of the obtained composite binders
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Состав		Удельная поверхность минеральной добавки, $\text{м}^2/\text{кг}$	Плотность цементного камня, $\text{кг}/\text{м}^3$
	ЦЕМ I 42,5, %	Минеральная добавка КБ, %		
Состав 1	100	-	-	1998
Состав 2	95	5	400	1994
Состав 3	85	15	400	1917
Состав 4	75	25	400	2081
Состав 5	95	5	1000	2055
Состав 6	85	15	1000	2006
Состав 7	75	25	1000	1975

Анализируя данные по плотности цементного камня, можно отметить, что в большинстве случаев плотность составов с минеральной добавкой КБ при удельной поверхности $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ выше, чем при $S_{\text{уд}}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$, что свидетельствует о более плотной структуре материала. Например, максимальное значение плотности (2055 кг/м^3) достигнуто при использовании тонкоизмельчённой фракции ($S_{\text{уд}}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$), тогда как при $S_{\text{уд}}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$ плотность не превышает 2006 кг/м^3 .

Это, вероятно, объясняется повышенной реакционной способностью частиц с высокой удельной поверхностью, которые активнее участвуют в гидратационных процессах и способствуют образованию более плотной и однородной структуры цементного камня за счёт заполнения пор и формирования дополнительных продуктов гидратации [24]. Кроме того, тонкие частицы лучше распределяются в системе, снижая количество крупных пор и

уменьшая водопотребность, что также способствует увеличению плотности.

Напротив, грубодисперсная фракция ($S_{\text{уд}}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$) обладает меньшей активностью и может выступать преимущественно в роли инертного наполнителя, что ограничивает её способность уплотнять структуру. В некоторых случаях она даже может способствовать снижению плотности из-за образования микропустот или неполного заполнения пространства между цементными зёрнами [24].

Таким образом, высокая удельная поверхность КБ ($1000 \text{ м}^2/\text{кг}$) положительно влияет на плотность цементного камня, что делает её предпочтительной при создании высококачественных композиционных вяжущих с минимальным содержанием цемента. Однако для окончательной оценки необходимо учитывать совокупность свойств, включая прочность, водопоглощение и долговечность.

Результаты испытаний показаны на рисунке.

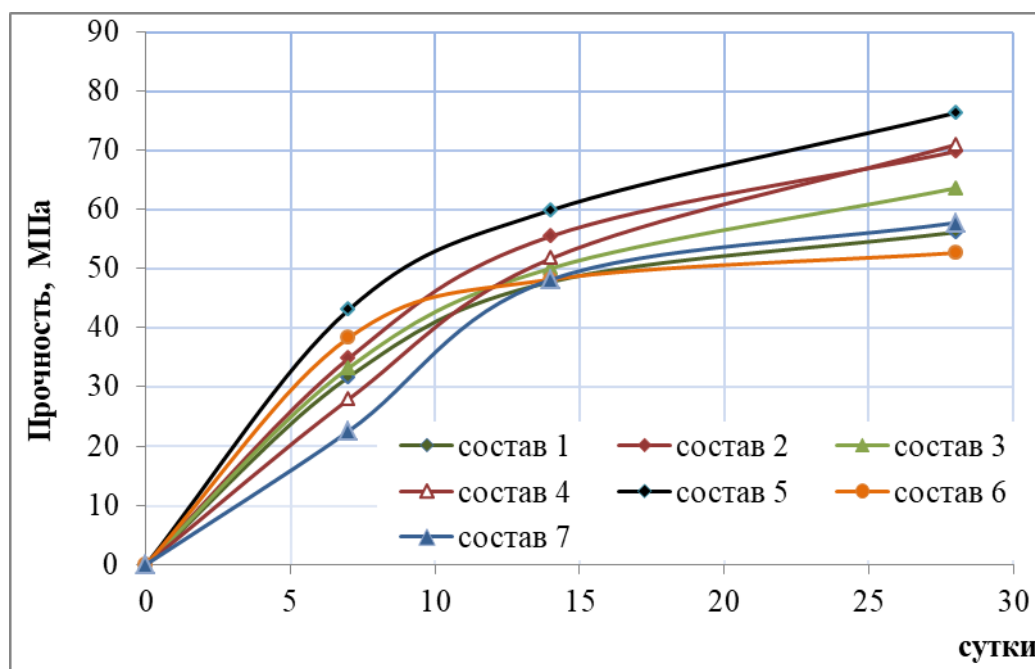


Рисунок – Прочность цементного камня
Источник: составлено авторами.

Figure – Cement stone strength
Source: compiled by the authors.

На основе данных о прочности на сжатие в возрасте 7, 14 и 28 сут (см. таблицу) и визуализации на графике (см. рисунок) можно сделать следующие выводы.

Максимальные прочностные показатели продемонстрировал состав 5 (95% цемента + 5% КБ, удельная поверхность 1000 м²/кг):

- 7 сут – 43,02 МПа;
- 14 сут – 59,89 МПа;
- 28 сут – 76,34 МПа.

Этот результат превышает прочность контрольного состава на 36,0%, что свидетельствует о высокой реакционной активности тонкоизмельченной добавки. Увеличение удельной поверхности до 1000 м²/кг способствует заполнению порового пространства продуктами гидратации и формированию плотной, однородной структуры цементного камня.

Состав 2 (5% КБ, $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$) также показал значительное упрочнение — 69,80 МПа (+24,4% к контролю), однако уступает составу 5, что подтверждает ключевую роль дисперсности в активизации вторичного сырья. При увеличении дозировки КБ до 15 и 25% наблюдается нелинейная зависимость прочности от содержания добавки. Так, состав 6 (15% КБ, $S_{уд} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$) демонстрирует снижение прочности до 52,67 МПа (–6,2% относительно контроля), что указывает на разбавление активной цементной фазы и нарушение структурной целостности композита. Аналогично состав 7 (25% КБ, $S_{уд} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$) характеризуется минимальным приростом прочности к 28 сут (57,76 МПа, +2,9%) и резко замедленным твердением на ранних сроках (22,51 МПа на 7 сут, – 28,9% к контролю), что свидетельствует о подавлении начальных стадий гидратации.

Интересную особенность демонстрирует состав 4 (25% КБ, $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$), достигающий прочности 70,94 МПа (+26,4% к контролю), однако при этом на 7 сут его прочность (27,89 МПа) ниже контрольной на 11,9%. Вероятно, в данном случае имеет место запаздывающая активация добавки, обусловленная низкой дисперсностью и высокой дозировкой.

Анализ динамики набора прочности подтверждает, что наиболее интенсивное структурообразование происходит в составе 5: прирост прочности с 7 до 14 сут составляет 16,87 МПа (+39,2%), что значительно превышает темпы твердения как контрольного, так и остальных модифицированных составов.

Таким образом, оптимальным вариантом модификации цементного вяжущего является

введение 5% переработанного керамзитобетона с удельной поверхностью 1000 м²/кг. Данное содержание обеспечивает максимальную прочность, ускоренный темп твердения и эффективное замещение цемента без ухудшения эксплуатационных свойств. Установлено, что дальнейшее увеличение содержания добавки, даже при высокой степени измельчения, приводит к снижению прочностных характеристик, что обусловлено нарушением баланса между активной вяжущей фазой и инертным компонентом. Следовательно, для рационального использования вторичного сырья в составе высокопрочных композиционных вяжущих необходимо строго контролировать как дозировку, так и степень диспергирования минеральной добавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс проведенных экспериментальных исследований подтвердил эффективность применения тонкоизмельченного боя керамзитобетона в качестве минеральной добавки в композиционных вяжущих, разработанных с учетом принципов закона структурного сродства. Установлено, что оптимальные физико-механические свойства цементного камня достигаются при введении 5% минеральной добавки из переработанного керамзитобетона с удельной поверхностью 1000 м²/кг (состав 5). В этом случае прочность на сжатие к 28 сут составляет 76,34 МПа, что на 36,0% превышает показатель контрольного состава (56,15 МПа). Такое значительное упрочнение обусловлено высокой реакционной активностью тонкодисперсных частиц, которые интенсивно участвуют в пуццолановых реакциях, способствуют заполнению микропор и формированию плотной, гомогенной структуры цементного камня.

Использование грубодисперсной фракции (удельная поверхность 400 м²/кг) или увеличение дозировки добавки до 15–25%, даже при высокой степени измельчения, приводит к снижению прочностных характеристик. Это свидетельствует о необходимости строгого соблюдения баланса между концентрацией и дисперсностью модифицирующей добавки.

Кроме того, введение КБ сопровождается снижением нормальной густоты теста – до 27,37% по сравнению с 28,00% у контрольного состава, что указывает на уменьшение водопотребности системы. Снижение водоцементного отношения при сохранении удобоукладываемости способствует повышению плотности, снижению пористости и, как следствие, улучшению долговечности цементного

камня. Таким образом, разработанная технология позволяет не только эффективно утилизировать строительные отходы, но и создавать высококачественные вяжущие с улучшенными эксплуатационными свойствами. Это особенно актуально для регионов, подвергшихся разрушениям, таких как ЛНР, ДНР и новые регионы Российской Федерации, где локальная переработка боя керамзитобетона в мини-производствах может стать основой для экономически выгодного и экологически безопасного восстановления инфраструктуры. Внедрение таких решений способствует снижению зависимости от поставок цемента, сокращению объёмов свалок и ускорению темпов строительства за счёт использования доступного местного сырья.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Володченко А.А., Лесовик В.С. Состояние и перспективы использования техногенного сырья // Региональное сотрудничество БРИКС: вопросы рационального природопользования – экология, просвещение, туризм: материалы Международной научно-практической конференции: тезисы докладов, Петрозаводск, 14–15 сентября 2023 года. Петрозаводск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», 2023. С. 15–16.
2. Ищенко А.В., Твердохлебова Е.А. Обзор современных технологий утилизации отходов строительного производства // Инженерный вестник Дона. 2024. № 3(111). С. 1–13.
3. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Теоретические основы и практики реализации реинжиниринга в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. № 11.
4. Баруздин А.А., Закревская Л.В., Николаева К.А. Композиционный материал на основе техногенных отходов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 2 (21).
5. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., Фомина Е.В. Композиционное вяжущее с энергосберегающим сырьем для высокопрочного бетона // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3, № 2(9). С. 7–17. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2\(9\)-7-17](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17)
6. Ельчищева Т.Ф., Ерофеева И.В. Композиционное вяжущее для изготовления бетонов и растворов // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов VIII Международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. С. 348–349.
7. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of C-S-H and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques // Hydration kinetics and rheological behavior // Construction and Building Materials. 2018. Т. 184. С. 304–310.
8. Аласханов А.Х. Полифункциональные строительные композиты на основе техногенного сырья: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Грозный, 2023. 478 с.
9. Arbi Alaskhanov, Valery Lesovik, Alexander Tolstoy; “Green” composites based on technogenic raw materials. AIP Conf. Proc. 24 May 2023; 2758 (1): 020022. <https://doi.org/10.1063/5.0145717>
10. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). Compos. Part B Eng. 2021; 224: 109220.
11. Cigala R.M., Papanikolaou G., Lanzafame P., Sabatino G., Tripodo A., La Ganga G., Crea F., Ielo I., De Luca G. Transforming Waste into Sustainable Construction Materials: Resistant Geopolymers from Recycled Sources. Recycling 2025. 10, 118. <https://doi.org/10.3390/recycling10030118>
12. Аль-Мансури Н., Хади М.Н.С., Аравинтан Т. Механические свойства лёгкого бетона, армированного полипропиленовым волокном Barchip, на основе вторичного дроблёного лёгкого керамзитового заполнителя // Frontiers in Materials. 2021. Т. 8. Ст. 753619. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.753619>
13. Lesovik V., Zagorodnyuk L., Babaev Z. Dzhumaniyazov Z. Ceramic Road-Brick for Side-Walk Pavement in the Regional Surrounds of the Aral Sea. Glass and Ceramics. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10717-023-00560-2>
14. Петкогло В.Н., Пунцель И.Я., Кравченко С.А., Постернак А.А. Основы оптимизации подбора состава керамзитобетона для монолитного строительства // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 4-1(60). С. 171–179.
15. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография. Белгород : Изд-во БГТУ, 2014. 195 с.
16. Лесовик В.С., Ахмед А.А.А., Аль Мамури С.К.Ш., Гунченко Т.С. Композиционные вяжущие на основе бетонного лома // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2020. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnye-vyazhuschie-na-osnove-betonogo-loma> (дата обращения: 25.09.2025)
17. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 1 (77). С. 120.
18. Аласханов А.Х., Таймасханов Х.Э., Сайдумов М.С., Муртазаева Т.С.А. Современные подходы к разработке многокомпонентных вяжущих с использованием техногенного сырья // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18, № 1(27). С. 63–70. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.50.97.008>
19. Сулейманов К.А., Лесовик В.С., Погорелова И.А., Рябчевский И.С. Исследование макропористой структуры ячеистого бетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. №. 3. С. 8–16.

<https://doi.org/https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-3-8-16>

20. Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Аль Мамури С.К.Ш. Получение вяжущих композиций оптимальных составов на основе портландцемента и отходов боя керамического кирпича // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 19–30. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-7-7-19-30> EDN: QZAHQL

21. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Elistratkin M.Yu., Podgorniy D.S. On the Issue of Measuring the Strength of Additively Manufactured Concrete // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. P. 104–110.

22. Chen J., Gao N., Wu J., Shan G., et al. Effects of the charge density of anionic copolymers on the properties of fresh cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 2020; 263: 120207

23. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17).

24. Tahwia, A.M., Abdellatief, M., Salah, A. et al. Valorization of recycled concrete powder, clay brick powder, and volcanic pumice powder in sustainable geopolymers concrete. *Sci Rep* 15, 11049 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93598-x>

REFERENCES

1. Volodchenko A.A., Lesovik V.S. The state and prospects of using technogenic raw materials // BRICS regional cooperation: issues of rational use of natural resources - ecology, education, tourism : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: abstracts, Petrozavodsk, September 14-15, 2023. Petrozavodsk: Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2023, pp. 15-16.

2. Ishchenko A.V., Tverdokhlebova E.A. Obzor sovremennykh tekhnologiy utilizatsii otkhodov stroitel'nogo proizvodstva [Review of modern technologies for utilization of construction waste]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2024, no. 3(111), pp. 1–13. (in Russ.)

3. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Teoreticheskie osnovy i praktiki realizatsii reinzhiniringa v stroitel'stve [Theoretical foundations and practices of reengineering implementation in construction]. *Vestnik MGSU*, 2024, no. 11.

4. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V., Nikolaeva K.A. Kompozitsionnyy material na osnove tekhnogennykh otkhodov [Composite material based on industrial waste]. *Ekspert: teoriya i praktika*, 2023, no. 2(21). (in Russ.)

5. Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Salnikova A.S., Fomina E.V. Composite binder with energy-saving raw materials for high-strength concrete // *Industrial processes and technologies*. 2023. Vol. 3. No. 2(9). pp. 7-17. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2\(9\)-7-17](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17)

6. Yelchishcheva T.F., Erofeeva I.V. Kompozitsionnoe vyazhushchee dlya izgotovleniya betonov i rastvorov [Composite binder for the production of concretes and mortars]. *Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruktivnykh sooruzheniy: Tezisy dokladov VIII-go mezhdunarodnogo simpoziuma* [Current Problems of Computer Modeling of Structures and Constructions: Abstracts of the VIIIth International Symposium], Tambov, May 17–21, 2023. Tambov: IP Chesnokova A.V., 2023, pp. 348–349. (in Russ.)

7. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of C-S-H and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques // *Hydration kinetics and rheological behavior* // *Construction and Building Materials*. 2018. T. 184. C. 304–310.

8. Alaskanov A.Kh. Polifunktsional'nye stroitel'nye kompozity na osnove tekhnogennogo syr'ya: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.23.05 [Multifunctional construction composites based on industrial raw materials: Dr. tech. sci. diss.]. Grozny, FGBOU VO "Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet", 2023. 478 p. (in Russ.)

9. Arbi Alaskanov, Valery Lesovik, Alexander Tolstoy; "Green" composites based on technogenic raw materials. *AIP Conf. Proc.* 24 May 2023; 2758 (1): 020022. <https://doi.org/10.1063/5.0145717>

10. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y. et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*, 2021, vol. 224, p. 109220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>

11. Cigala R.M.; Papanikolaou G.; Lanzafame P.; Sabatino G.; Tripodo A.; La Ganga G.; Crea F.; Ielo I.; De Luca G. Transforming Waste into Sustainable Construction Materials: Resistant Geopolymers from Recycled Sources. *Recycling* 2025. 10, 118. <https://doi.org/10.3390/recycling10030118>

12. Al-Mansuri N., Hadi M.N.S., Aravinthan T. Mekhanicheskie svoystva lyogkogo betona, armirovannogo polipropilenovym voloknom Barchip, na osnove vtorichnogo droblennogo lyogkogo keramzitovogo zapolnitelya [Mechanical properties of lightweight concrete reinforced with Barchip polypropylene fiber based on recycled crushed lightweight expanded clay aggregate]. *Frontiers in Materials*, 2021, vol. 8, art. 753619. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.753619>. (in Russ.)

13. Lesovik V., Zagorodnyuk L., Babaev Z., Dzhumaniyazov Z. Ceramic Road-Brick for Side-Walk Pavement in the Regional Surrounds of the Aral Sea. *Glass and Ceramics*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10717-023-00560-2>

14. Petkoglo V.N., Puntsel' I.Ya., Kravchenko S.A., Posternak A.A. Osnovnye optimizatsii podbora sostava keramzitobetona dlya monolitnogo stroitel'stva [Key optimizations in selecting the composition of expanded clay concrete for monolithic construction]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*, 2020, no. 4-1(60), pp. 171–179. (in Russ.)

15. Lesovik V.S. Geonika (geomimetika). Primery realizatsii v stroitel'nom materialovedenii [Geonics

(Geomimetics): Examples of Implementation in Construction Materials Science]. Belgorod, BSTU, 2014. 195 p. (in Russ.)

16. Lesovik R.V., Ahmed A.A.A., Al Mamouri S.K.S., Gunchenko T.S. Kompozitsionnye vyazhushchie na osnove betonnoy loma [Composite binders based on concrete scrap]. *Vestnik BSTU imeni V.G. Shukhova*, 2020, no. 7, pp. 8–18. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnye-vyazhushchie-na-osnove-betonnoy-loma>. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-7-8-18>. (in Russ.)

17. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonika (geonimika) i poisk optimal'nykh resheniy v stroitel'nom materialovedenii [Geonics (geomimetics) and the search for optimal solutions in construction materials science]. *Vestnik SibADI*, 2021, vol. 18, no. 1(77), pp. 120–134. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

18. Alaskanov A., Taimaskhanov H., Saidumov M., Murtazayeva T. Modern approaches to the development of multi-component binders using man-made raw materials. *Bulletin of GGNTU. Technical sciences*. 2022. 63-70. (in Russ.) <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.50.97.008>

19. Suleymanov K.A., Lesovik V.S., Pogorelova I.A., Ryabchevsky I.S. Investigation of the macroporous structure of cellular concrete. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 3. pp. 8-16. (in Russ.) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-3-8-16>

20. Makhortov D., Zagorodnyuk L., Sumskey D., Mamouri Saad. Obtaining binder compositions of optimal compositions based on portland cement and ceramic brick waste. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2022; 7. 19-30. (in Russ.) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-7-7-19-30>

21. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Elistratkin M.Yu., Podgorniy D.S. On the Issue of Measuring the Strength of Additively Manufactured Concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021; vol. 147, pp. 104–110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77284-0_10

22. Chen J., Gao N., Wu J., Shan G. et al. Effects of the charge density of anionic copolymers on the properties of fresh cement pastes. *Construction and Building Materials*, 2020; vol. 263, p. 120207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120207>

23. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Novikov K.Yu. Vysokoprochnye betony na kompozitsionnykh vyazhushchikh s primeneniem tekhnogennogo syr'ya [High-strength concretes based on composite binders using industrial raw materials]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*, 2016; no. 2(17), pp. 45–51. (in Russ.)

24. Tahwia A.M., Abdellatif M., Salah A. et al. Valorization of recycled concrete powder, clay brick powder, and volcanic pumice powder in sustainable geopolymer concrete. *Sci Rep* 15, 11049 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93598-x>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, чл. корр. РААСН, заведующий кафедрой «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

Scopus Author ID: 55887733300,

Researcher ID: A-4757-2016,

e-mail: naukavs@mail.ru

Дудченко Валерия Александровна – аспирант, ассистент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

SPIN-код: 8957-1566,

Author ID: 1170036,

e-mail: dudchenko.v.a@mail.ru

Сальникова Алёна Сергеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

SPIN-код: 1024-6672,

Author ID: 1065785,

e-mail: privet.9292@mail.ru

Казлитина Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

SPIN-код: 6312-7790,

Author ID: 732580,

e-mail: olga-ivashova1@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lesovik Valery S. – Dr. of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of the Department of Building Materials, Products and Designs at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov) (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

Scopus Author ID: 55887733300,

Researcher ID: A-4757-2016,

e-mail: naukavs@mail.ru

Dudchenko Valeria A. – Postgraduate student, Assistant Professor at the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov) (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

SPIN-code: 8957-1566,

Author ID: 1170036,

e-mail: dudchenko.v.a@mail.ru

Salnikova Alyona S. – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials at Belgorod state

technological University. V. G. Shukhov (BSTU named. V. G. Shukhov) (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

SPIN-code: 1024-6672,

Author ID: 1065785,

e-mail: privet.9292@mail.ru

Kazlitina Olga V. – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials, Products and Designs at Belgorod state technological University. V. G. Shukhov (BSTU named. V. G. Shukhov) (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

SPIN-code: 6312-7790,

Author ID: 732580,

e-mail: olga-ivashova1@yandex.ru