

АРХИТЕКТУРНЫЕ БЕТОНЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

И.А. Столетова (И.А. Черепанова) ✉, А.А. Володченко
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
✉ ответственный автор
irinadiusa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из восходящих архитектурных трендов настоящего времени является повышение комфортности и эстетичности территорий населённых пунктов за счёт художественного благоустройства, значительная роль в котором отводится различным видам малых архитектурных форм. Наиболее бюджетным и в то же время надёжным и долговечным материалом для них является архитектурный бетон. Узким местом использования бетона для изготовления малых архитектурных форм является относительная сложность придания ему сложных пространственных конфигураций. На современном уровне развития технологии бетонных работ данный недостаток может быть легко преодолен за счёт использования технологии строительной 3D-печати. Цель работы – создание эффективных архитектурных бетонов для изготовления малых архитектурных форм методом строительной 3D-печати на основе композиционных вяжущих, содержащих в качестве минеральной добавки выветренные кварцитопесчаники, как один из видов местного энергоэффективного сырья.

Материалы и методы. В разделе приведены сравнительные характеристики выветренных и невыветренных кварцитопесчаников.

Результаты. Представлены данные по динамике помола компонентов; составах и характеристиках композиционных вяжущих и мелкозернистых бетонов на их основе; результатах изготовления опытной партии малых архитектурных форм методом строительной печати.

Обсуждение. Представлено описание и анализ полученных экспериментальных данных. Сформулированы выводы, в которых отмечается, что для организации выпуска современных малых архитектурных форм представляется технология строительной 3D-печати, позволяющая реализовать сложные разнообразные пространственные формы изделий с любым уровнем индивидуализации без повышения издержек.

Заключение. Разработанные формовочные смеси подтвердили высокую эффективность использования выветренного кварцитопесчаника в составе композиционного вяжущего и техногенного песка. Внедрение данных материалов отвечает требованиям энерго- и ресурсосбережения, так как снижается потребление портландцемента и невозобновляемых природных ресурсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектурный бетон, аддитивные технологии, строительная 3D-печать, композиционное вяжущее, энергоэффективное минеральное сырьё, выветренный кварцитопесчаник, малая архитектурная форма, благоустройство территорий

БЛАГОДАРНОСТИ: работа выполнена в рамках Программы «Приоритет – 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ имени В.Г. Шухова. Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, проф. Лесовику Валерию Станиславовичу, канд. техн. наук, доц. Агеевой Марине Сергеевне и канд. техн. наук, доц. Елистраткину Михаилу Юрьевичу (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова) за консультации по основным положениям работы. Автор благодарит компанию БетоникАрт (г. Белгород) за опытно-промышленную апробацию результатов исследований, а также выражает признательность рецензентам, вложившим свои силы и знания в повышение качества данной работы.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

© Столетова И.А. (Черепанова И.А.), Володченко А.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 24.10.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Столетова И.А. (Черепанова И.А.), Володченко А.А. Архитектурные бетоны для строительной 3D-печати // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 1002-1016. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-1002-1016>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-1002-1016>

EDN: ETMVLU

ARCHITECTURAL CONCRETES FOR 3D CONSTRUCTION PRINTING

Irina A. Stoletova (I.A. Cherepanova) ✉, Alexander A. Volodchenko
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,

Belgorod, Russia

✉ corresponding author
irinadiusa@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. One of the rising architectural trends of the present time is to increase the comfort and aesthetics of the territories of populated areas through artistic improvement, a significant role in which is given to various types of small architectural forms. The most budgetary and, at the same time, reliable and durable material for them is architectural concrete. The bottleneck in the use of concrete for the manufacture of small architectural forms is the relative difficulty of giving it complex spatial configurations. At the current level of development of concrete work technology, this drawback can be easily overcome through the use of construction 3D printing technology. The aim of the work was to develop effective architectural concrete for the manufacture of small architectural forms using the 3D construction printing method, based on composite binders containing weathered quartzite sandstones as a mineral additive, as one of the types of local energy-efficient raw materials. Materials and methods: The section presents comparative characteristics of weathered and unweathered quartzite sandstones.

Results. The data on the dynamics of component grinding; compositions and characteristics of composite binders and fine-grained concretes based on them; results of manufacturing a pilot batch of small architectural forms using the construction printing method are presented.

Discussion and conclusions. The description and analysis of the obtained experimental data are presented. The conclusions are formulated in which it is noted that for the organization of the production of modern small architectural forms, the technology of 3D construction printing is used, which allows the implementation of complex various spatial forms of products with any level of individualization without increasing costs. The developed molding mixtures confirmed the high efficiency of using weathered quartzite sandstone as part of a composite binder and technogenic sand. The introduction of the developed materials meets the requirements of energy and resource conservation, since the consumption of Portland cement and non-renewable natural resources is reduced.

KEYWORDS: architectural concrete, additive technologies, construction 3D printing, composite binder, energy-efficient mineral raw materials, weathered quartzite sandstone, small architectural form, landscaping

ACKNOWLEDGEMENTS. The work was carried out within the framework of the Priority 2030 Program at V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. The work was performed using the equipment of the High Technology Center of V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. The author expresses his gratitude to Dr. Sc., Prof. Valeriy Stanislavovich Lesovik, Dr. Sc., Associate Professor Marina Sergeevna Ageeva and Dr. Sc. Sc., Associate Professor Mikhail Yuryevich Elistratkin (V.G. Shukhov Belgorod State Technological University) for consultations on the main provisions of the work. The author would like to thank the company BetonikArt (Belgorod) for pilot testing of the research results. The author expresses his gratitude to the reviewers who invested their efforts and knowledge in improving the quality of this work.

© Stoletova I.A. (Cherepanova I.A.), Volodchenko A.A., 2024



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

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 dated 03.24.2022.

The article was submitted: 24.10.2024 approved after reviewing: 28.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

All 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. Stoletova I.A. (Cherepanova I.A.), Volodchenko A.A. Architectural concretes for 3d construction printing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 1002-1016. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-1002-1016>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из восходящих архитектурных трендов настоящего времени является повышение комфортности и эстетичности территорий населённых пунктов за счёт художественного благоустройства, значительная роль в котором отводится различным видам малых архитектурных форм (МАФ). Их грамотная установка с учётом психологии, эргономики, колористики и других научно обоснованных принципов позволяет зонировать и логически организовывать пространство, формировать требуемый эмоциональный фон у людей, осуществлять информационную, образовательную и развлекательную функцию [1].

В качестве материалов для изготовления МАФ широкое применение нашли древесина, металлы с пониженной склонностью к коррозии, стекло, полимерные материалы. Однако для большинства из них характерны высокая стоимость (металлы, стекло), для некоторых – недостаточная долговечность (древесина, полимеры и др.) или высокая сложность управления формой (стекло и др.)¹. В этой связи, с учётом необходимости наполнения активно развивающегося рынка малых архитектурных форм, особый интерес вновь обретает архитектурный бетон, ранее применявшийся для этих целей и незаслуженно забытый как наследие Советского Союза [2].

Бетон является крайне «гибким» материалом с точки зрения управления свойствами, себестоимостью, эстетичностью. Под термином «архитектурный бетон» следует понимать разновидность бетона, предназначенную как для выполнения конструкционной функции, так и решения декоративно-прикладных задач, имеющих художественную и эстетическую ценность [3].

Узким местом использования бетона для изготовления МАФ является относительная сложность придания ему сложных пространственных конфигураций. В рамках традиционной технологии получение бетонных изделий осуществляется с использованием металлических, реже полимерных форм, сравнительно простой геометрии, что связано с необходимостью обеспечения их разборности и трудоёмкостью обслуживания. На современном уровне развития технологии бетонных работ данный недостаток может быть легко преодолен, в частности, за счёт использования технологии аддитивного (послойного) формирования конструкций методом строительной 3D-печати [4].

Например, ещё в 2008 г. компания Kingdom, чтобы доказать осуществимость 3D-печати для малых архитектурных форм, изготовила изогнутую скамью (2x0,9x0,8 м) путем печати 128 слоев при скорости печати 20 мин/слой [5]. Особенностью технологии является то, что здесь не используются инструменты для выравнивания, поэтому поверхность созданной конструкции умышленно получается грубой и незавершенной.

Английская компания Monolite UK предложила струйную технологию послойного синтеза в строительстве (BinderJetting), что осуществляется за счет нанесения определенного порошкообразного материала с последующим склеиванием вяжущим веществом [6]. Основное преимущество этого метода перед другими примерами 3D-печати в строительстве заключается в том, что вся конструкция поддерживается в процессе печати за счет дополнительного песка, окружающего печатные элементы [7].

Разработкой и изучением новых строительных материалов и методов, используемых в

¹. Композиты и среда обитания человека как непрерывный процесс взаимодействия / В.С. Лесовик, М.Ю. Елистраткин, Е.В. Фомина [и др.] // *Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022–2023 годы: Научные труды РААСН. В 2-х томах. М.: Издательство АСВ, 2024. С. 251–259.*

технологиях послойного синтеза, в России занимаются многие ученые ведущих университетов страны, что также способствует более широкомасштабному внедрению аддитивных 3D-технологий в стройиндустрии [8]. Активная разработка самих устройств 3D-принтеров ведется в государственных научных и образовательных учреждениях [9].

Однако применение новой технологии формирования влечёт за собой проблему разработки специализированных бетонных смесей, отвечающих одновременно как требованиям строительной печати, так и архитектурных бетонов. Учитывая высокую технологичность 3D-печати, разрабатываемые составы должны быть гармонизированы с ней по научно-техническому уровню применяемых решений и обеспечивать максимальное раскрытие потенциала новой технологии [10].

Так, одним из устоявшихся трендов, при решении нестандартных задач в сфере бетоноведения, стал переход от традиционных цементов к композиционным вяжущим, получаемым на их основе. Целенаправленным выбором минеральной добавки, режима механохимической активации и химических модификаторов появляется возможность регулировать свойства получаемого вяжущего и смесей на его основе в очень широких пределах.

В работе [11] приводятся исследования по получению композиционных вяжущих с различными реологическими характеристиками для технологий послойного синтеза с использованием различных минеральных добавок, полученных из вторичного сырья. Содержание клинкерной составляющей варьировалось в пределах 50%. Предлагаемые композиционные вяжущие можно использовать при различных принципах работы формирующих устройств. При разработке составов КВ очень важно рационально подобрать соотношение входящих компонентов и способ получения композиционного вяжущего. При разработке композиционных вяжущих, а также для повышения их эффективности необходимо использовать горные породы, обладающие высокой свободной внутренней энергией. Подобный подход позволяет получать на их основе композиционные вяжущие и формовочные смеси, свойства которых удовлетворяют требованиям технологической строительной 3D-печати.

Актуальным подходом, основанным на принципах трансдисциплинарности, стало расширение использования нестандартных видов сырья, обладающих повышенной внутренней энергией или подвергнувшихся ча-

стичной природной деструкции, в качестве минеральных добавок при получении композиционных вяжущих. Это открывает широкий простор для расширения сферы применения последних, снижения энергозатрат при получении эффективных высокотехнологичных бетонов, к которым можно отнести архитектурные бетоны для аддитивного формования.

Одним из крупнотоннажных видов сырья на территории Белгородской области являются кварцитопесчаники, утвержденные Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых, относящиеся к зеленосланцевой степени метаморфизма с породообразующим минералом кварца, отличающимся дефектной структурой кристаллической решетки. Доказано, что применение кварцитопесчаника для получения композиционных вяжущих позволяет существенно снизить расход портландцемента, что актуально при решении задач снижения глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов [12].

В то же время мощность зоны выветренных кварцитопесчаников (ВКВП) составляет от 20 до 50 м. По основным физическим свойствам (плотность, морозостойкость и т.д.) эта порода не соответствует нормативным документам для получения щебня, поэтому она не внесена в сырьевую базу и ее запасы не утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых [13].

Выветривание – это сложный комплекс экзогенных процессов, открытая термодинамическая система, в которой происходят механические, физические, химические и биологические процессы преобразования горных пород в условиях поверхностной части литосферы. При выветривании происходит разрушение текстуры и структуры исходных горных пород за счет целого комплекса гипергенных процессов, в том числе неравномерного нагревания и охлаждения [14]. Различные породообразующие минералы имеют неодинаковые коэффициенты теплового расширения, поэтому при изменении температуры испытывают деформации в различной степени. И в результате длительного воздействия колебаний температуры, а также других факторов (например, замерзания и оттаивания в микротрещинах воды и т.д.) кварцитопесчаники распадаются на отдельные обломки. При меньшей степени развития указанных процессов структура частиц материала становится более дефектной, что обуславливает её высокую размалываемость и химическую активность [15]. Однако данный вопрос на настоящий момент изучен недостаточно.

В этой связи целью работы стало создание эффективных архитектурных бетонов для изготовления малых архитектурных форм методом строительной 3D-печати на основе композиционных вяжущих, содержащих в качестве минеральной добавки выветренные кварцитопесчаники.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование влияния КВ20 и КВ 50 на ВКВП, отсева КВП фракции 0,315–1,25 мм в качестве заполнителя на свойства бетона;
- подбор эффективных добавок-пластификаторов;
- подбор составов 3Д-бетона для малых архитектурных форм на основе КВП;

– изучение формуемости и формоустойчивости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

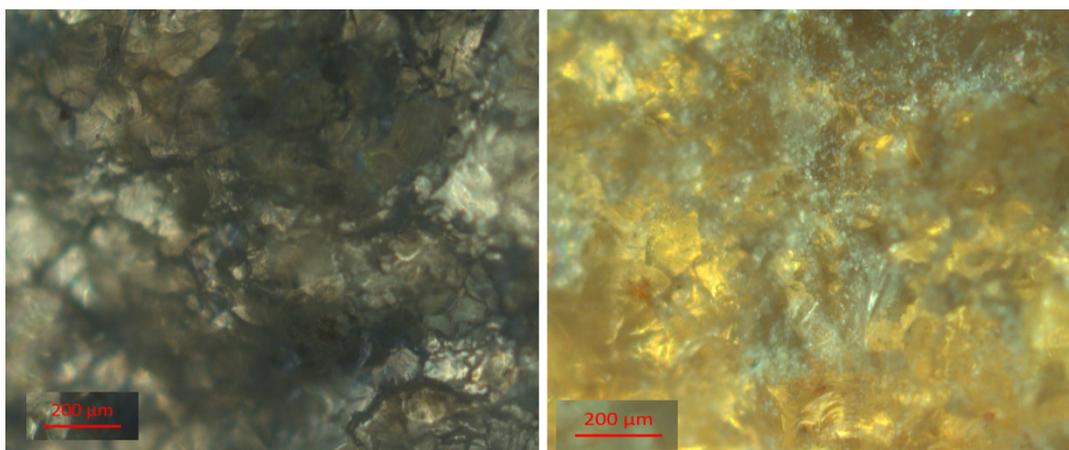
В работе в качестве основы для получения композиционных вяжущих и для изготовления контрольных составов применялся цемент ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Себряковцемент») с нормальной плотностью цементного теста 26,7%.

В качестве сырья для получения минеральных добавок использовались кварцитопесчаники (КВП) из зоны добычи железной руды Лебединского ГОКа (Белгородская обл.). Характеристики выветренного и неветренного КВП представлены в таблице 1, микроструктура показана на рисунке 1.

Таблица 1
Сравнительные показатели кварцитопесчаников
Источник: составлено автором.

Table 1
Comparative indicators of quartzite sandstones
Source: compiled by the author.

Показатель	Неветренный	Выветренный
Истинная плотность рист, кг/м ³	2650	2600
Средняя плотность, кг/м ³	2630	2290
Пористость, %	0,91	17
Предел прочности при сжатии, МПа	1450	890
Морозостойкость, циклы	250	20



а

б

Рисунок 1 – Пластины толщиной 0,5 мм породы кварцитопесчаника:
а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный
Источник: составлено автором.

Figure 1 – 0.5 mm thick plates of quartzite sandstone rock:
а – unaffected by weathering processes; б – weathered
Source: compiled by the author.

Таблица 2
Зерновой состав песка Безлюдовского месторождения
Источник: составлено автором.

Table 2
Grain composition of sand from the Bezlyudovsky deposit
Source: compiled by the author.

Показатели	Размер отверстий сит, мм						Пыль
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Остатки на ситах, г:	6,9	20,30	38,64	104,3	273,98	452,5	103,38
частные, %	0,69	2,03	3,86	10,4	27,4	45,3	10,32
полные, %	0,69	2,72	6,58	16,98	44,38	89,68	100
Плотность упаковки	0,60	0,61	0,62	0,63	0,61	0,58	0,56
Модуль крупности песка	M _{кр} = 1,71						

Таблица 3
Физико-механические характеристики отсева кварцитопесчаника в естественном виде
Источник: составлено автором.

Table 3
Physical and mechanical characteristics of quartzite sandstone screenings in natural form
Source: compiled by the author.

Наименование показателя	Отсев дробления КВП
Модуль крупности	3,55
Насыпная плотность в неуплотненном состоянии, кг/м ³	1410
Насыпная плотность в уплотненном состоянии, кг/м ³	1490
Истинная плотность, кг/м ³	2,71
Пустотность, %	45,8
Водопоглощение, %	5,3
Цементопотребность	0,530

В качестве мелких заполнителей при получении бетонов применялся природный кварцевый песок Безлюдовского месторождения (Белгородская обл.) и отсев кварцитопесчаника, основные характеристики которых представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

В качестве химических добавок при получении мелкозернистых бетонов использовались пластификатор Линомикс ПК и воздухововлекающая добавка Полипласт Аэро [16].

Помол компонентов и гомогенизация составов композиционных вяжущих в работе осуществлялись с использованием лабораторной вибрационной мельницы МВ-20.

Процесс получения композиционных вяжущих заключался в следующем: портландцемент размалывался до удельной поверхности 500 и 700 м²/кг. Отсев КВП также отдельно размалывался до удельной поверхности 300,

500 и 700 м²/кг. Далее цемент смешивали с минеральной добавкой и домалывали в течение 1 мин в вибромельнице для гомогенизации.

Изучение прочностных показателей мелкозернистого бетона проводилось на образцах размером 7х7х7 см в составах 1:1,5 и 1:3, твердеющих в воздушно-влажностных условиях (ГОСТ 310.4–81).

Для изучения состава и строения полученных композитов применялись методы рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-3М) и сканирующей растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения (до 1 нм) TESCAN MIRA 3 LMU, включающий энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) X-MAX 50 OxfordInstruments Nano Analysis для электронно-зондового микроанализа).

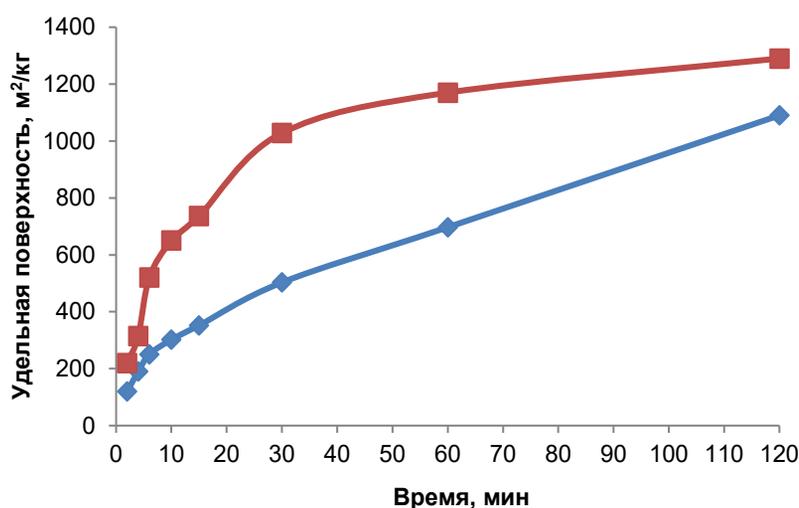


Рисунок 2 – Кинетика помола кварцитопесчаников
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Kinetics of quartzite sandstone grinding
Source: compiled by the author.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обоснования возможности использования выветренного КВП в композиционных вяжущих в качестве минеральной добавки была изучена сравнительная кинетика помола кварцитопесчаников в лабораторной вибрационной шаровой мельнице (рисунок 2).

На основе результатов предварительных экспериментов были разработаны составы композиционных вяжущих (рисунок 3), в которых варьировалось:

- содержание минеральной добавки (20 и 50% от массы цемента);
- тонкость помола минеральной добавки (300, 500, 700 м²/кг);
- тонкость помола цемента (500, 700 м²/кг).

Процесс получения и испытания вяжущих описан в разделе «Материалы и методы». Для всех составов вяжущих были определены показатели прочности в 28-суточном возрасте, а для полученных наиболее рациональных составов – водопотребность и сроки схватывания (таблица 4).

Для дальнейших исследований были приняты композиционные вяжущие на основе вы-

ветренного КВП как наиболее эффективные. В составе вяжущего ПЦ имеет $S_{уд} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$, ВКВП – $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Далее в работе, с целью установления причин положительного влияния выветренности, использованного для получения минеральной добавки, кварцитопесчаника был проведён анализ микроструктуры полученного камня. Затем методом рентгенофазового анализа были изучены особенности минерального состава камня композиционных вяжущих, содержащих выветренный и невыветренный кварцитопесчаники. Полнота гидратации оценивалась по наиболее сильным пикам алита (меньше – лучше). Также сравнивались интенсивности ряда пиков портландита как относительная оценка полноты гидратации и пуццолановой активности добавок.

На рисунке 4 приведены результаты использования композиционных вяжущих с минеральной добавкой из ВКВП в мелкозернистых бетонах состава Ц:П = 1:3, получавшихся на основе природного и техногенного песков.

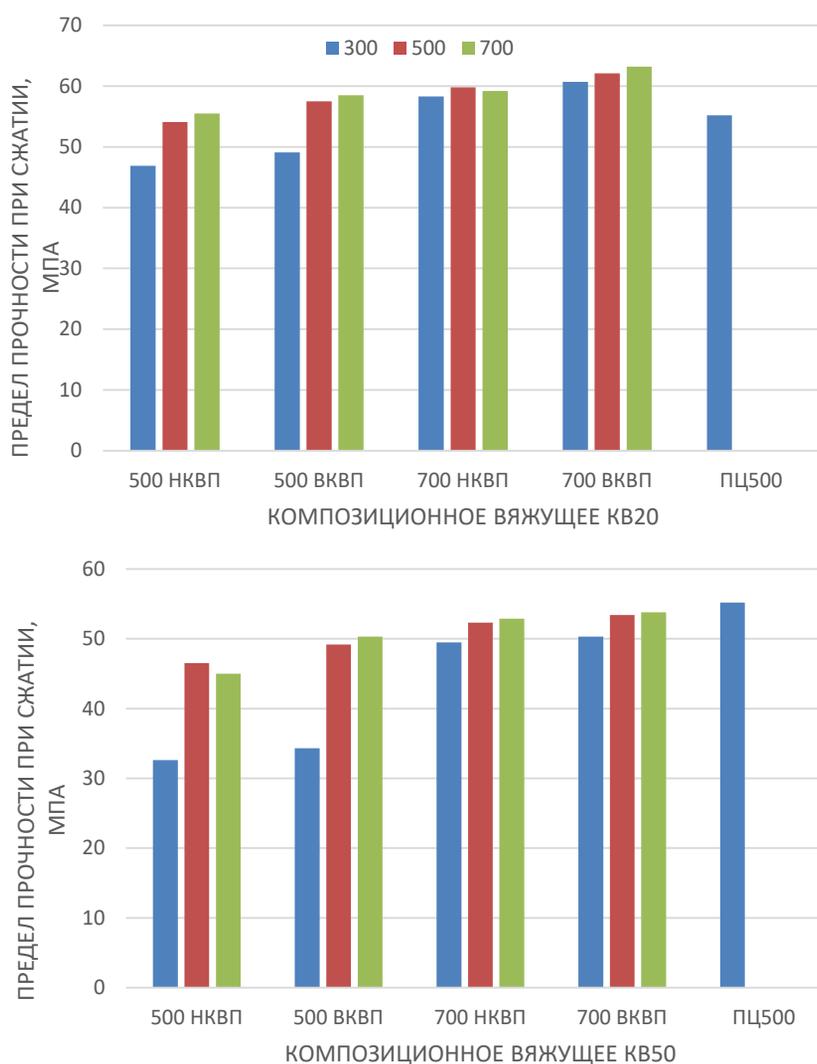


Рисунок 3 – Влияние параметров кварцевого сырья на прочность композиционного вяжущего
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Effect of quartz raw material parameters on the strength of composite binder
Source: compiled by the author.

Таблица 4
Водопотребность и сроки схватывания композиционных вяжущих
Источник: составлено автором.

Table 4
Water requirement and setting times of composite binders
Source: compiled by the author

Вяжущее	S _{уд} , м ² /кг	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, ч:мин	
			начало	конец
ЦЕМ I 42,5Н	320	26,7	1:30	4:30
КВ20в	585	29,8	1:50	2:50
КВ20н	573	28,2	1:45	2:35
КВ50в	540	34,7	2:05	3:20
КВ50н	536	33,8	1:95	3:10

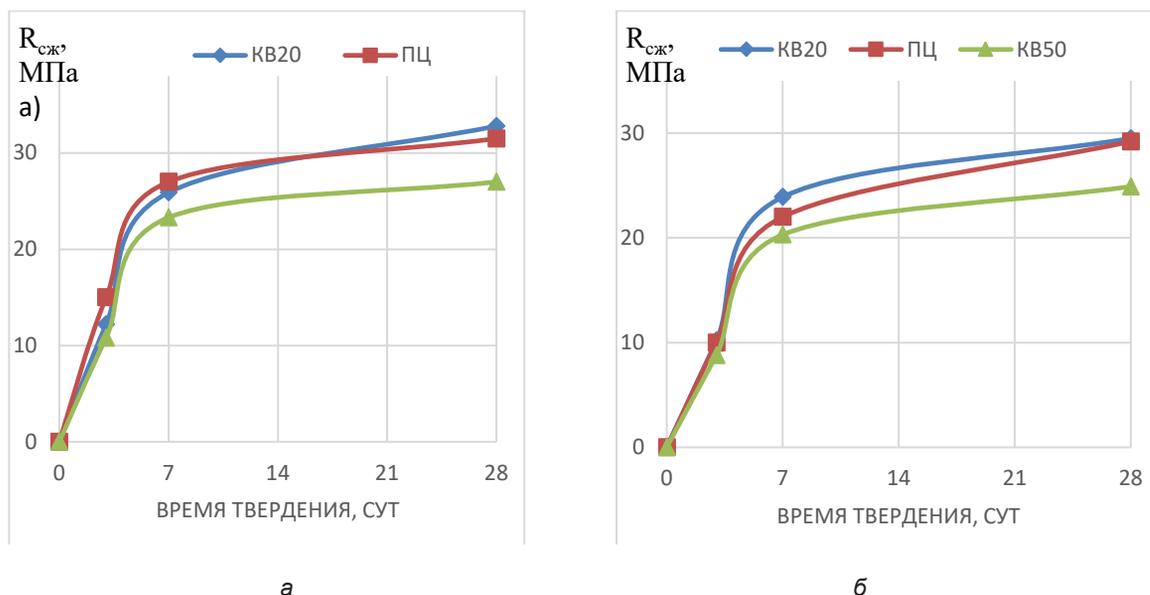


Рисунок 4 – Влияние состава композиционного вяжущего и вида мелкого заполнителя на прочность мелкозернистых бетонов (1:3): а – на фракционированном отсеве дробления КВП; б – на природном песке
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Effect of composition of composite binder and type of fine aggregate on the strength of fine-grained concrete (1:3): а – on fractionated screenings of crushed quartzite sandstone; б – on natural sand
Source: compiled by the author.

На рисунке 5 показана микроструктура контактной зоны камня на основе композиционного вяжущего и двух типов заполнителей (природного и техногенного). Отчётливо видна более шероховатая поверхность зёрен отсева дробления КВП.

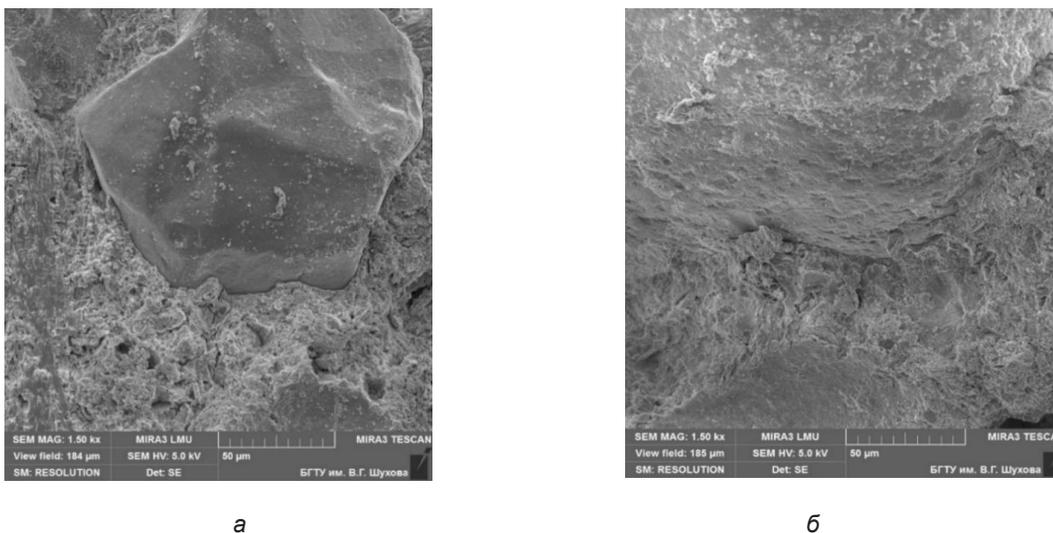


Рисунок 5 – Микроструктура контактной зоны камня на основе КВП и: а – природного кварцевого песка; б – техногенного мелкого заполнителя на основе отсева КВП
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Microstructure of the contact zone of stone based on quartzite sandstone and: а – natural quartz sand; б – man-made fine aggregate based on quartzite sandstone screenings
Source: compiled by the author.

Таблица 5

Составы и физико-механические свойства мелкозернистых бетонов для строительной печати
Источник: составлено автором.

Table 5

Compositions and physical and mechanical properties of fine-grained concrete for construction printing
Source: compiled by the author.

Состав	Пластификатор, масс. % от вяжущего	Воздухововлекающая добавка, масс. % от вяжущего	Вяж : П	Расход материалов кг/м ³			В/Ц	Осадка конуса, мм	R _{сж} , МПа в возрасте, сут			ρ _{ср} , кг/м ³
				КВ20В	Песок	Вода			2	14	28	
Кварцевый песок												
1	–	–		792	1188	324	0,41	25	24,7	35,2	42,8	2254
1a	0,45	0,6	1:1,5					52	27,3	38,4	43,5	2140
2	–	–	1:3	500	1550	250	0,52	22	11,8	25,3	29,9	2250
2a	0,6	0,6						46	12,2	29,8	34,2	2165
Отсев КВП (0,315–1,25 мм)												
3	–	–	1:1,5	777	1166	350	0,45	24	26,8	37,8	43,5	2223
3a	0,45	0,6						48	27,4	40,0	44,5	2190
4	–	–	1:3	500	1500	275	0,55	24	11,4	29,7	34,8	2245
4a	0,8	0,6						49	14,5	30,6	35,5	2174

В таблице 5 приведены составы и основные характеристики мелкозернистых бетонов для 3D-печати.

На рисунке 6 приведен пример печати, разработанной составом 4a основания малой архитектурной формы «Скамья с вазоном» на производственном участке предприятия Бетоник-Арт (г. Белгород).



Рисунок 6 – Результат печати основания МАФ разработанной составом 4a
Источник: Бетоник-Арт (г. Белгород).

Figure 6 – Result of printing the base of the small architectural form with the developed composition 4a
Source: Betonik-Art (Belgorod).

ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы были изучены вопросы получения композиционных вяжущих с использованием в качестве минеральной добавки выветренного и обычного кварцитопесчаников.

Согласно представленного на рисунке 2 графика, динамика повышения удельной поверхности выветренного кварцитопесчанника значительно опережает аналогичный показатель у невыветренного во всём рассмотренном интервале времени помола. В течение 30 мин помола удельная поверхность выветренного кварцитопесчанника составила 1000 м²/кг, а в случае НКВП за это время достигается только 500 м²/кг. При продолжении помола удельная поверхность невыветренного КВП 1000 м²/кг была зафиксирована лишь через 2 ч от начала эксперимента. В целом процесс помола ВКВП идет значительно эффективней по сравнению с невыветренным. Это объясняется наличием микротрещин, пор и пустот, а также наличием более дефектной аморфной фазы в породе. Данный факт является значимой предпосылкой для снижения энергоёмкости получения композиционного вяжущего.

Способ получения композиционных вяжущих отдельным помолом компонентов был

выбран, основываясь на предположении, что при совместном помоле цемента и минеральной добавки, происходит неконтролируемое увеличение удельной поверхности каждого из компонентов. Так, выветренный КВП, как установлено выше, измельчается быстрее неветренного, в результате это приведет к существенному увеличению его дисперсности в составе смешанного вяжущего. Тогда как традиционный КВП может оказаться недомолотым, при одинаковой удельной поверхности вяжущих, которая будет обеспечиваться за счет интенсификации помола цемента крупными частицами КВП, выступающими как бы дополнительными мелющими телами. При этом для каждой из добавок существует своя оптимальная дисперсность и, чтобы ее получить, их следует размалывать отдельно до оптимальной дисперсности и затем вводить в цемент.

Увеличение удельной поверхности цемента в составе композиционных вяжущих с 500 до 700 м²/кг закономерно приводит к повышению прочности камня у всех композиционных вяжущих. Однако такой эффект более значительно выражен у композиционных вяжущих с использованием минеральной добавки из выветренного КВП. Это объясняется большим содержанием аморфизированного кремнезема в составе такого кварцитопесчаника, который будет активнее реагировать с выделяющимся при гидратации клинкерных минералов гидроксидом кальция. Данный процесс приводит к образованию дополнительного количества низкосоосновных гидросиликатов кальция, уплотняющих и упрочняющих композит.

Анализ прочностных показателей вяжущих с меньшим уровнем содержания минеральной добавки (20% КВП) показал, что при удельной поверхности цемента 500 м²/кг увеличение удельной поверхности минеральной добавки до 700 м²/кг является нецелесообразным с точки зрения роста энергоемкости процесса [17] и отсутствию дальнейшего существенно прироста прочностных показателей композиционного вяжущих. При удельной поверхности цемента 700 м²/кг наиболее высокие прочностные показатели достигаются у КВ20 с использованием наполнителя, размолотого до $S_{уд} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$. Так, у КВ20в (выветренный КВП) прочность на 23% выше прочности контрольного состава на основе товарного портландцемента. Для КВ20н (неветренный КВП) это значение ощутимо меньше и составляет порядка 11%.

Повышение доли минеральной добавки в составе композиционного вяжущего до 50% даёт несколько иную картину. Прочность вяжущих на неветренном КВП во всех случаях оказывается значительно ниже, чем у контрольного цемента. В то же время у КВ50в прочностные показатели близки к цементным при удельной поверхности наполнителя 500 м²/кг и 700 м²/кг.

Повышенное содержание тонкодисперсного наполнителя закономерно приводит к возрастанию водопотребности смеси, а также к тому, что большая его часть останется не прореагировавшей с выделяющимся гидроксидом кальция цементной системы. Это приводит к недобору возможной прочности и формированию более дефектной структуры композита. В этой связи было принято решение далее в работе применять композиционные вяжущие с 20% наполнителя как наиболее экономически и энергетически выгодные и имеющие наиболее высокие прочностные показатели.

Исследование микроструктуры образцов КВ20 на растровом электронном микроскопе показало, что адгезия цементного камня к частичкам КВП в обоих случаях высокая. Однако визуально более плотный камень формируется у образцов, содержащих выветренный КВП. Это можно объяснить более стесненными условиями прохождения реакций гидратации КВ20в за счет наличия аморфных минеральных фаз кварца и более активно протекающего процесса гидратации путем связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при прохождении пуццолановой реакции.

Взаимодействие выветренного КВП и цемента способствует синтезу большего числа гидратных фаз и уплотнению более слабых мест контактной зоны. Дополнительное количество гидратных кристаллических фаз на рубеже контактной зоны активизирует процесс структурообразования, заполняя пустоты в кристаллической матрице цемента, при этом у КВ20н количество таких пор выше. Кроме того, обладающие высокой дисперсностью частички КВП также являются центрами кристаллизации и выступают наполнителем на микроуровне.

Изменение количества гидратных фаз оценивали по данным рентгенофазового анализа. Полученные данные свидетельствуют о более полном связывании портландита с образованием дополнительных порций гидросиликатов кальция в основном низкососновного типа у вяжущего КВ20в, поскольку интенсивность дифференциальных отражений, характерных для $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в вяжущем уменьшается для выве-

тренного КВП, при одновременном снижении остаточного содержания алита [18].

На основании вышесказанного можно утверждать, что образовавшиеся в процессах выветривания аморфные фазы кремнезема в составе минеральной добавки интенсифицируют гидратацию клинкерных минералов портландцемента за счет достаточно высокой пуццолановой активности, что приводит к связыванию портландита в низкоосновные гидросиликатные фазы. Установлено, что применение выветренного кварцитопесчаника в составе композиционных вяжущих в количестве 20% позволяет существенно снизить долю цемента и энергоемкость процесса помола с возможностью увеличения активности композиционного вяжущего в сравнении с исходным портландцементом.

На *следующем этапе* была осуществлена разработка мелкозернистых бетонных смесей.

Для оценки эффективности использования композиционных вяжущих с минеральной добавкой из ВКВП в мелкозернистых бетонах были получены и испытаны составы Ц:П = 1:3 (см. рисунок 3). В качестве контрольного вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н. Все составы твердели в нормальных условиях. В качестве мелкого заполнителя использовался природный песок $M_{кр} = 1,76$ и техногенный (отсев дробления кварцитопесчаника фракции 0,315–1,25 мм) с $M_{кр} = 1,8$. Выбор заполнителей осуществлялся исходя из предположения, что такой модуль крупности позволит обеспечить минимальную водопотребность смеси при максимальной пластичности, необходимой в последующем для экструдирования с помощью 3D-принтера. Исключение из техногенного песка мелких фракций менее 0,315 мм способствует сокращению содержания примесей слюдястых минералов, препятствующих адгезии цементного камня к заполнителю.

Как видно из полученных данных, разработанные составы формовочных смесей достаточно быстро набирают начальную прочность, что обеспечивает возможность через 48 ч извлекать изделия из поля печати. Реотехнологические свойства разработанных составов, содержащих комбинацию пластификатора и воздухововлекающей добавки, обеспечивают равномерную подачу смеси с помощью штатного формирующего устройства строительного принтера фирмы KeyCode (Россия), установленного на производственной площадке ООО «Бетоник-АРТ» (г. Белгород). Укладка слоёв материала происходит равномерно, их

оседание не превышает принятого на производстве значения 5%, количество дефектов печати минимально, всё это хорошо видно на рисунке 5, запечатлевшем процесс опытного внедрения разработанного состава 4а на основе композиционного вяжущего, содержащего 20% выветренного кварцитопесчаника.

ВЫВОДЫ

Таким образом:

1. Как видно из графиков (см. рисунок 3), применение техногенного песка из отсева дробления КВП (0,315–1,25 мм) повышает прочность мелкозернистого бетона по сравнению с бетоном на природном кварцевом песке на 9–11% через 28 сут твердения. Это может быть объяснено более дефектной структурой поверхности частиц заполнителя и отсутствия мелкой песчаной и пылевидных фракций, что приводит к образованию прочной контактной зоны заполнителя с вяжущим (см. рисунок 4). В зависимости от вида используемого композиционного вяжущего возможно получение мелкозернистых бетонов прочностью 25–30 МПа на обычном песке и 27–35 МПа на техногенном из отсева дробления КВП.

2. Для оптимизации реологических показателей мелкозернистых смесей под требования строительной печати на основании ранее выполненных разработок и предварительных исследований была применена комбинация пластифицирующей (Линамикс ПК) и воздухововлекающей (ПолипластАэро) добавок. В таблице 3 показано сравнительное влияние указанной комбинации добавок на пластичность составов мелкозернистых бетонов для строительной печати и их основные физико-механические показатели [19].

3. Применение композиционного вяжущего на основе отсева выветренного КВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева КВП позволяет получать прочные мелкозернистые бетоны В30–35 в нормальных условиях твердения. Повышение прочностных свойств мелкозернистых бетонов обусловлено, во-первых, формирующейся уплотненной структурой цементной матрицы мелкозернистого бетона, заполнение пор в которой происходит не только растущими новообразованиями, но и частицами тонкодисперсного наполнителя, которые при этом играют роль активных центров кристаллизации; во-вторых, повышенной адгезией формирующейся цементной матрицы к мелкому заполнителю из отсева КВП, на развитой поверхности зерен которого формируются тонкие пленки гидратных фаз, что

приводит к усилению контактной зоны между заполнителем и цементным камнем.

4. Определение формоустойчивости и формуемости бетонной смеси для 3D-печати осуществляли по методике, разработанной на кафедре СМИиК БГТУ им. В.Г. Шухова. Разработанные составы формовочных смесей достаточно быстро набирают начальную прочность, что позволяет «отпечатанным» слоям без деформаций воспринимать нагрузку вышележащих слоев с необходимым интервалом времени между циклической печатью, а также обеспечить требуемое сцепление между слоями в течение заданного времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учётом сложившихся тенденций по повышению эстетичности, удобства и комфорта искусственной среды обитания человека, сегмент рынка малых архитектурных форм в ближайшее время будет одним из самых быстрорастущих. Наименьшая конкуренция в настоящий момент имеет место в нише МАФ из архитектурного бетона. Развитие данного направления позволит ощутимо расширить гамму предлагаемой продукции, отличающейся низкой стоимостью, высокой функциональностью и долговечностью.

Для организации выпуска современных МАФ из архитектурного бетона большой интерес представляет технология строительной 3D-печати, позволяющая реализовать сложные разнообразные пространственные формы изделий с любым уровнем индивидуализации без повышения издержек. Однако требует решения вопрос разработки специализированных архитектурных бетонов оптимизированных под технологию строительной печати. Эффективность по комплексу свойств, эстетичности, долговечности, энерго- и ресурсосбережению может быть обеспечена за счёт применения наиболее прогрессивных теорий строительного материаловедения, а именно: композиционных вяжущих адаптированных под конкретную задачу, использования нетрадиционных видов сырья, положений архитектурной геоники [20].

Разработанные формовочные смеси подтвердили высокую эффективность использования композиционного вяжущего с микронаполнителем (20%) из отсева ВКВП и мелкого заполнителя из отсева КВП для аддитивного 3D-производства бетонных оснований малых архитектурных форм.

Внедрение разработанных материалов отвечает требованиям энерго- и ресурсосбере-

жения, экологичности производства, так как снижается потребление портландцемента и невозобновляемых природных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лесовик В.С. Экологические аспекты строительного материаловедения // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 6. С. 20–21.
2. Дегтев Ю.В. Эволюция малых архитектурных форм в России // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 41–44.
3. Фролова М.А. Неразрушающий контроль качества бетонных строительных композитов / М.А. Фролова, А.С. Тутыгин, А.М. Айзенштадт, Г.А. Махов, В.С. Лесовик // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 20–22.
4. Тютин А.Д., Аралов И.А. Перспективы применения 3d-печати в строительстве и архитектуре // Евразийское научное объединение. 2021. № 2-2 (72). С. 128–130.
5. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes // Automation in construction. 2012. Т. 21. pp. 262–268.
6. Batikha M., Jotangia R., Baaj M.Y. 3D Concrete printing for sustainable and economical construction: a comparative study // Automation in construction. 2022. pp. 104087.
7. Bedsrf P., Dillenburger B., Dutto A., Zanini M. Foam 3d printing for construction: a review of applications, materials, and processes // Automation in construction. 2021. pp. 103861.
8. Robayo-Salazar R., Mejía de Gutiérrez R., Villaquirán-Caicedo M.A., Delvasto Arjona S. 3D printing with cementitious materials: challenges and opportunities for the construction sector // Automation in construction. 2023. pp. 104693.
9. Симакова Е.А., Селякова К.И., Кравченко Д. Применение 3D-печати в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 1. С. 3–11.
10. Elistratkin M., Podgornyi D., Alfimova N. Influence of Equipment Operation Parameters on the Characteristics of a Track Produced with Construction 3D Printing // Buildings. 2022. Vol. 12, No. 5. P. 593.
11. Глаголев Е.С. 3D-аддитивные строительные технологии. Теория и практика // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 8–14.
12. Zagorodnuk L.H., Lesovik V.S., Shkarin A.V., Belikov D.A. Creating effective insulation solutions, taking into account the law of affinity structures in construction materials // World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 24. № 11. pp. 1496–1502.
13. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Модифицированные мелкозернистые цементные бетоны для аддитивного строительного производства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 5. С. 77–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-77-93.

14. Матыева А.К., Асаналиева Ж.Д. Исследование техногенных продуктов и их эффективность применения в качестве сырья для стройиндустрии // Вестник международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. 2019. № 7. С. 29–34.

15. Шаталова С.В. Разработка комплексного решения для 3D-печати стеновых конструкций / С.В. Шаталова, Н.В. Чернышева, В.С. Лесовик [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 8–19.

16. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Айзенштадт А.М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 1-2. С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106>

17. Иноземцев А.С., Королев Е.В., ЗыонгТхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, Вып. 7 (118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876

18. Аласханов А.Х. Современные подходы к разработке многокомпонентных вяжущих с использованием техногенного сырья: науч. журнал / А.Х. Аласханов, Х.Э. Таимасханов, М.С. Саидумов, Т.С. Муртазаева // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Том 18, №1 (27). С. 63–70.

19. Лесовик В.С., Фролова М.А., Айзенштадт А.М. Поверхностная активность горных пород // Строительные материалы. 2013. № 11. С. 71–73.

20. Лесовик В.С., Перькова М.В., Бабаев В.Б. Архитектурная геоника как междисциплинарное направление в архитектурной науке и практике // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 9–12.

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Ecological aspects of building materials science. *Industrial And Civil Engineering*. 2008; 6: 20–21. (In Russ.)

2. Degtyarev Yu.V. Evolution of small architectural forms in Russia. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013; 1: 41–44. (In Russ.)

3. Frolova M.A., Tutygin A.S., Aizenshtadt A.M., Makhov G.A., Lesovik V.S. Non-destructive testing of the quality of concrete building composites. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2013; 3: 20–22. (In Russ.)

4. Tyutina A.D., Aralov I.A. Prospects for the Application of 3D Printing in Construction and Architecture. *Scientific Association*. 2021; 2-2 (72): 128–130. (In Russ.)

5. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*. 2012; T. 21: 262–268.

6. Batikha M., Jotangia R., Baaj M.Y. 3D Concrete printing for sustainable and economical construction: a comparative study. *Automation in construction*. 2022:104087.

7. Bedsrf P., Dillenburger B., Dutto A., Zanini M. Foam 3d printing for construction: a review of applications, materials, and processes. *Automation in construction*. 2021: 103861.

8. Robayo-Salazar R., Mejía de Gutiérrez R., Villaquirán-Caicedo M.A., Delvasto Arjona S. 3D printing with cementitious materials: challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in construction*. 2023: 104693.

9. Simakova E.A., Selyakova K.I., Kravchenko D. 3D printing in construction. *Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]*. 2021; 1(1): 3–11. (In Russ.)

10. Elistratkin M., Podgornyi D., Alfimova N. Influence of Equipment Operation Parameters on the Characteristics of a Track Produced with Construction 3D Printing. *Buildings*. 2022; Vol. 12, No. 5: 593.

11. Glagolev E.S. 3D additive construction technologies. theory and practice. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021; 2: 8–14. (In Russ.)

12. Zagorodnuk L.H., Lesovik V.S., Shkarin A.V., Belikov D.A. Creating effective insulation solutions, taking into account the law of affinity structures in construction materials. *World Applied Sciences Journal*. 2013; T. 24. №. 11: 1496-1502.

13. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Modified cement fine-grained concrete for 3DCP. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; (5): 77–93. (In Russ.) DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-77-93.

14. Matyeva, A.K., Asanaliyeva D. Study of technogenic products and their efficiency of use as raw materials for the construction industry. *Bulletin of the international association of experts in earthquake engineering*. 2019; 7: 29–34. (In Russ.)

15. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Sheremet A.A. Development of a comprehensive solution for 3d printing of wall structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 10: 8–19. (In Russ.)

16. Lesovik V.S., Fomina E.V., Ayzenshtadt A.M. Some aspects of technogenic metasomatism in construction material science. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019; 1–2: 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106> (In Russ.)

17. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong Thanh Qui. Analysis of existing technological solutions of 3D-printing in construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; vol. 13, issue 7 (118): 863–876. (In Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876

18. Alaskhanov A.Kh., Taimaskhanov Kh.E., Saidumov M.S., Murtazaeva T.S. Modern approaches to the development of multicomponent binders using technogenic raw materials: scientific. *Herald of GSTOU. Technical Sciences (hereinafter referred to as the Journal)*. 2022; T. 18, No. 1 (27): 63–70. (In Russ.)

19. Lesovik V.S., Frolova M.A., Aizenshtadt A.M. Surface activity of rocks. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2013; 11: 71–73. (In Russ.)

20. Lesovik V.S., Perkova M.V., Babaev V.B. Architectural Geonics as an interdisciplinary direction in architectural science and practice. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013; 1: 9–12. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Столетова И.А. (Черепанова И.А.) Формулирование основной концепции исследования, подготовка текста статьи, проведение экспериментов.

Володченко А.А. Проведение критического анализа материалов и формирование выводов, оформление результатов исследования в графиках.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Stoletova I.A. (Cherepanova I.A.) Formulation of the main concept of the study, preparation of the article text, conducting experiments.

Volodchenko A.A. Conducting a critical analysis of materials and drawing conclusions, presenting the results of the study in graphs.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Столетова Ирина Александровна (Черепанова) – ассистент кафедры «Архитектура и градостроительство» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8946-451X>,
SPIN-код: 7387-5219,
e-mail: irinadiusa@gmail.com

Володченко Александр Анатольевич – канд. технич. наук, доцент кафедры «Строительные материалы и конструкции» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-7185>,
Researcher ID: A-8344-2014,
SPIN-code: 8837-7100,
Scopus ID: 56450953600

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stoletova Irina A. (Cherepanova) – Assistant of the Department of Architecture and Urban Planning, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia (308012, Belgorod, Kostyukova str. 46). V.G. Shukhov Russia (308012, Belgorod, Kostyukova str., 46).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8946-451X>,
SPIN-code: 7387-5219,
e-mail: irinadiusa@gmail.com

Volochenko Aleksandr A. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Materials and Structures of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (308012, Belgorod, Kostyukova St., 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-7185>,
Researcher ID: A-8344-2014,
SPIN-code: 8837-7100,
Scopus ID: 56450953600