

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39

**\*Шеремет А.А., Елистраткин М.Ю., Шеремет Е.О., Лесовик В.С., Шаталова С.В.**  
 Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
 \*E-mail: [ajiyonka@yandex.ru](mailto:ajiyonka@yandex.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРУПНОПОРИСТОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА ДЛЯ ТРЕХСЛОЙНОГО 3D-АДДИТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

**Аннотация.** В статье рассмотрено решение актуальной проблемы развития 3D-аддитивных технологий в России путем создания новой модели формирующего устройства и разработки композиционных материалов. Целью данной работы является изучение физических, технологических и тепловых свойств крупнопористого керамзитобетона. Требуемые характеристики определяются стандартными методами и требованиями нормативных документов, включая современные физико-химические методы анализа и широкий спектр современных и оригинальных методов исследования, соответствующих современным научным знаниям. Получены составы крупнопористого керамзитобетона с прочностью на сжатие до 9,2 МПа и водопоглощением до 25 % по массе. Для моделирования поведения исследуемых систем был проведен двухфакторный трехуровневый эксперимент для каждого типа смеси крупнопористого керамзитобетона, который позволил получить уравнения регрессии, характеризующие взаимосвязь переменных параметров с определенными свойствами системы. Выявлено, что на величину средней плотности в наибольшей степени влияет удельный расход вяжущего. В то время как прочность больше всего зависит от В/Ц отношения. Более того, в этом случае количество воды в меньшей степени связано с пористостью самого цементного камня, а в большей – с консистенцией и липкостью получаемого клея, его способностью равномерно покрывать частицы наполнителя. Установлено, что рационально подобранные составы конструкционно-теплоизоляционных КПКБ для внутреннего заполнения трехслойной "печатной" стены, омоноличивания и теплоизоляции обеспечат формирование требуемых технико-эксплуатационных показателей.

**Ключевые слова:** 3D-аддитивные технологии, многослойный синтез, керамзитобетон, 3D-печатать, водопоглощение.

**Введение.** Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических затрат на создание самых разнообразных архитектурных форм и видов продукции, становятся неотъемлемой частью строительной индустрии, решающей функциональные, психоэмоциональные и инновационно-технологические задачи [1–2].

В результате систематизации данных возникают новые трансдисциплинарные направления науки: биотехнология, геохимия, геофизика, бионика, в том числе геоника (геомиметика) - научное направление, которое рассматривается как искусство применения знаний неорганического мира для решения новых технологических проблем (рис. 1) [3–8].



Рис. 1. Новые трансдисциплинарные направления наук

Каждая из данных дисциплин, решая поставленные перед ней задачи, стремится найти идеальный вариант комфортной среды обитания для человека, помогая другой [9–13]. Такой обширный спектр задач порождает новые потоки инновационных идей, благодаря глубокому пониманию их взаимосвязей, поэтому потенциал применения новых эффективных материалов и методов 3D-аддитивного строительства способны стать двигателем развития строительной отрасли.

Несмотря на многие положительные особенности, внедрение 3D-аддитивных технологий в России ещё не достигло значительного уровня. Наиболее распространенным способом печати на данный момент стала контурная печать. Её узким местом является сложность придания конструкции требуемых теплофизических свойств и низкая скорость печати, связанная с большой удельной длиной печатного трека [14].

Существует потребность в создании моделей отечественных формующих устройств для многослойного синтеза и композитов с повышенными технологическими, физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Наиболее эффективным и актуальным подходом к печати стен является послойное формирование многослойной полнотелой конструкции, состоящей из мелкозернистых внешних декоративно-защитных слоёв, и внутреннего конструкционно-теплоизоляционного слоя. В качестве материалов для внутреннего слоя интерес представляют керамзитобетон, пенобетон, неавтоклавный газобетон. Согласно анализу публикаций [15-16], находящихся в открытом доступе, данное направление находится на начальном этапе развития.

В этой связи большой научно-практический интерес представляет исследование крупнопористого керамзитобетона ввиду особенностей его структуры и свойств.

Крупнопористый керамзитобетон (КПКБ) представляет собой беспесчаный легкий бетон, состоящий из керамзитового гравия, скрепленного небольшим количеством цементного камня, который, обволакивая тонким слоем зерна заполнителя, не заполняет пустотность между ними. Повышенные теплотехнические характеристики крупнопористого керамзитобетона обусловлены структурными особенностями, которые характеризуются открытой непрерывной пористостью и зернистым строением, что отличает его от традиционных легких бетонов.

На сегодняшний день в строительной отрасли не существует документов, регламентирующих состав и требования, предъявляемые к характеристикам и качеству КПКБ для 3D-аддитивных технологий. Одной из основных проблем, тормозящих развитие 3D-аддитивного строительства для массового применения, является ограниченность рынка используемых материалов и компонентов, пригодных для многослойной печати. В этой связи целью работы стала разработка эффективных составов крупнопористого керамзитобетона, для изготовления методом печати эффективных трехслойных стеновых элементов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

**Материалы и методы.** В экспериментальных исследованиях при изготовлении бетонов применялись следующие исходные материалы: в качестве вяжущего – композиционные вяжущие с удельной поверхностью 380 и 500 м<sup>2</sup>/кг, полученное в результате совместного помола отсева дробления кварцитопесчаника Лебединского месторождения (табл. 1) с портландцементом ЦЕМ I 42,5Н (табл. 2); сухая керамзитовая засыпка для сборных полов КНАУФ фракции 0-1,25, суперпластификатор Реламикс ПК, вода.

Таблица 1

## Химический состав кварцитопесчаника

Содержание оксидов, масс. %									
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
86,24	0,27	2,39	2,16	1,58	0,89	1,34	0,69	0,11	0,06

Таблица 2

## Состав и свойства применяемого портландцемента

Наименование портландцемента изготовителя (маркировка)	Суд., м <sup>2</sup> /кг	НГ, %	Сроки схватывания, час:мин		Минералогический состав, %				Прочность через 28 сут, МПа	
			начало	конец	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	R <sub>изг</sub>	R <sub>сж</sub>
ЦЕМ I 42,5Н	380	25,0	3:00	4:30	61,4	12,1	6,7	12,0	8,1	58,3

Для изучения и анализа сырьевых компонентов и бетонов на их основе в работе применялись стандартные методики, современные физико-хи-

мические методы анализа и оригинальные методы исследований, соответствующие решаемым задачам.

Был осуществлен двухфакторный трехуровневый эксперимент, в котором варьировался расход вяжущего на  $1 \text{ см}^3$  заполнителя ( $x_1$ ) и В/Ц ( $x_2$ ). В качестве выходных параметров были приняты средняя плотность, прочность на сжатие и водопоглощение КПКБ.

Для всех образцов периодически осуществлялись: контроль массы (степень увлажнения); скорость прохождения ультразвука (прочность на сжатие в возрасте 7 и 28 суток, наличие глобальных дефектов); осмотр текущего состояния (наличие трещин, сколов).

Динамика водопоглощения и сушки крупнопористого керамзитобетона определялась по ГОСТ 12730.3-78 путём погружения предварительно высушенных образцов ( $7 \times 7 \times 7 \text{ мм}$ ) в емкость, наполненную водой с таким расчетом, чтобы уровень воды был выше верхнего уровня уложенных образцов примерно на 50 мм. Образцы взвешивают через каждые 24 ч водопоглощения. Испытание проводят до тех пор, пока результаты двух последовательных взвешиваний

будут отличаться не более чем на 0,1 %. Водопоглощение бетона отдельного образца по массе  $W_m$  в процентах определяют с погрешностью до 0,1 % по формуле:

$$W_m = \frac{m_c - m_b}{m_c} \cdot 100\%, \quad (1),$$

где  $m_c$  – масса высушенного образца, г;  $m_b$  – масса водонасыщенного образца, г.

Данная методика позволяет сравнивать материалы одного типа и получить картину строения порового пространства.

**Основная часть.** Для получения методом 3D-печати эффективных трёхслойных стеновых элементов с повышенными эксплуатационными характеристиками научными сотрудниками кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций БГТУ им. В.Г. Шухова зарегистрирован патент на полезную модель РФ №205716 «Формующее устройство для аддитивного изготовления многослойных стеновых конструкций» (рис. 2).

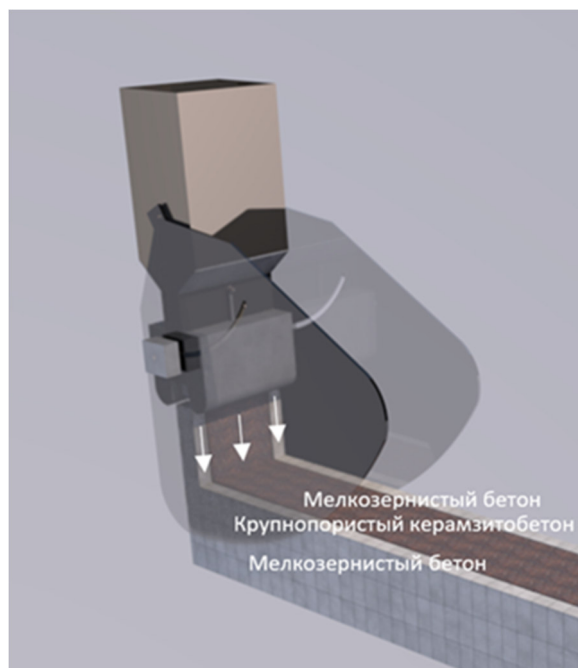
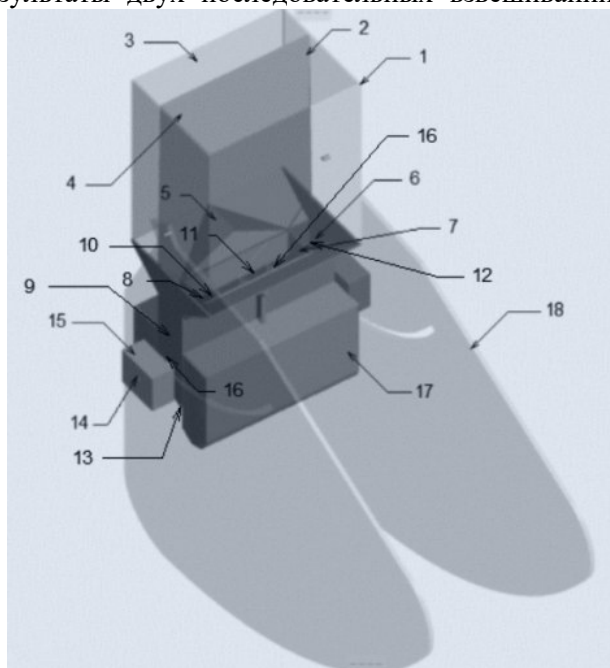


Рис. 2. Формующее устройство для аддитивного изготовления многослойных стеновых конструкций:

- 1 – контейнер для бетонной смеси; 2 – перегородка; 3 и 4 – два отсека; 5 – наклонные пластины;
- 6, 7 и 8 – независимые выходные отверстия из контейнера; 9 – сопло, разделённое на три канала 10, 11 и 12;
- 13 – вибровкладыши; 14 – вал; 15 – вибровозбудители; 16 – эластичные втулки; 17 – шиберы;
- 18 – поворотные заглаживающе-поддерживающие щитки (ЗПЩ)

Для совершенствования нового вида трёхслойной 3D-печати с монолитной связью слоев осуществлялся подбор и оптимизация состава крупнопористого керамзитобетона.

Для моделирования поведения изучаемых систем для каждого вида смеси КПКБ был осуществлен двухфакторный трехуровневый эксперимент, который позволил получить уравнения регрессии, характеризующие связь варьируемых

параметров с определёнными свойствами системы (табл. 3–4).

На основании полученных результатов была проведена статистическая обработка данных в Microsoft Excel и составлены математические модели, позволяющие получать составы с заданными прочностными показателями в исследуемом диапазоне дозирования вяжущего и В/Ц.

Уравнение регрессии прочности на сжатие в возрасте 28 суток КПКБ на сжатие:

$$R_{сж}^{28} = 3,94 + 2,84x_1 + 0,8x_2 - 0,31x_1^2 + 0,75x_2^2 + 1,01x_1 \cdot x_2;$$

Уравнение регрессии средней плотности в возрасте 28 суток КПКБ:

$$R_{ср} = 694,67 + 62x_1 + 31,3x_2 + 18,5x_1^2 - 8x_2^2 + 16,25x_1 \cdot x_2;$$

Уравнение регрессии водопоглощения КПКБ:

$$R^{вод} = 15,95 - 3x_1 + 0,14x_2 + 1,53x_1^2 + 2,39x_2^2 - 0,73x_1 \cdot x_2;$$

Таблица 3

#### Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	1	
Расход цемента, г/см <sup>3</sup>	$x_1$	0,25	0,4	0,55	0,15
В/Ц	$x_2$	0,45	0,55	0,65	0,1

Таблица 4

#### Матрица планирования эксперимента

Точки плана	Матрица планирования		Квадраты переменных		Взаимодействие факторов $x_1 x_2$	Прочность на сжатие $R_{сж}^{28}$ сут., МПа (воздушное хранение) $Y_1$	Средняя плотность $\rho_{ср}$ , г/см <sup>3</sup> $Y_2$
	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$			
1	1	1	1	1	1	9,2	820
2	1	-1	1	1	-1	7,14	747
3	-1	1	1	1	-1	0,51	645
4	-1	-1	1	1	1	2,5	637
5	1	0	1	0	0	4,56	743
6	-1	0	1	0	0	0,87	655
7	0	1	0	1	0	6,14	726
8	0	-1	0	1	0	1,41	619
9	0	0	0	0	0	5,77	723

На основании данных уравнений были составлены номограммы (рис. 3), визуально отображающие зависимость прочности, плотности, водопоглощения от принятых переменных параметров.

Как видно из графиков, на величину средней плотности в наибольшей степени влияет удельный расход вяжущего. В то время как прочность в наибольшей степени зависит от В/Ц отношения. Причём в данном случае количество воды в меньшей степени связано с пористостью самого цементного камня, а в большей степени с консистенцией и липкостью получаемого клея, его способностью равномерно покрывать частицы заполнителя.

В результате были получены составы со средней плотностью около 700 кг/м<sup>3</sup>, с прочностью на сжатие 6...7 МПа. Кроме того, существует возможность повышения прочности на сжатие до 9,2 МПа, за счёт увеличения средней плотности. Бетон, обладающий такими физико-

механическими характеристиками, может быть использован для трехслойного 3D-аддитивного строительства. Состав 2, ввиду недостаточного количества цементного клея, разрушился.

Основные физико-механические характеристики бетонов на пористых заполнителях зависят от: 1) совокупности химических элементов, составляющих вещество; 2) структурных особенностей в результате затвердевания бетонной смеси и последующего твердения бетона. На формирование макро- и микроструктуры крупнопористого керамзитобетона существенную роль оказывает технология приготовления бетонной смеси, а также последующая ее интенсификация твердения. При изучении динамики водонасыщения и сушки материалов можно получить информацию о характере распределения пор и особенностях физического взаимодействия материалов с водой. Динамика водопоглощения определялась путём полного погружения предварительно высушенных образцов КПКБ в воду с периодическим взвешиванием (рис. 4).



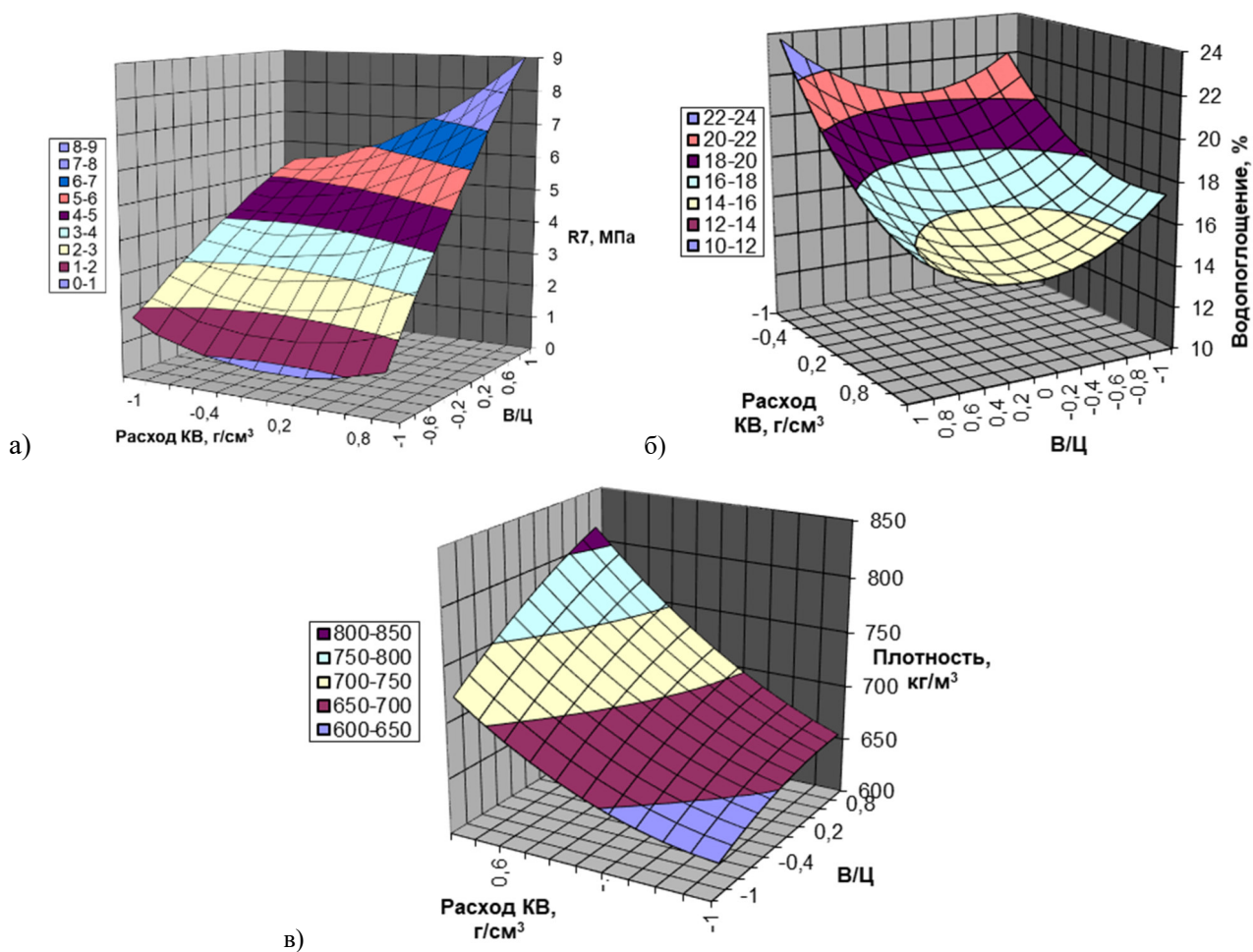


Рис. 3. Номограммы влияния варьируемых факторов на:  
 а) прочность при сжатии в возрасте 28 суток;  
 б) водопоглощение в первый час испытаний; в) средняя плотность

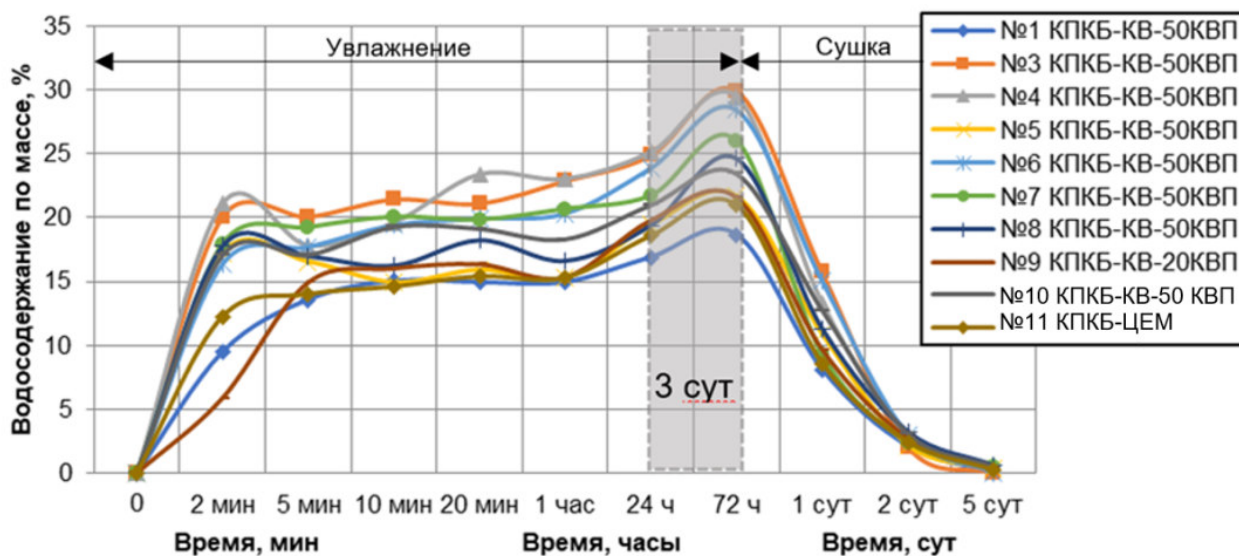


Рис. 4. Динамика водонасыщения и высыхания материалов (№1-№8, №10 КПКБ-КВ-50КВП – составы с применением композиционного вяжущего с содержанием клинкерной части 50 % и различным В/Ц отношением; №9 КПКБ-КВ-20КВП – состав на композиционном вяжущем с содержанием клинкерной части 20%; №11 КПКБ-ЦЕМ – состав с применением портландцемента ЦЕМ I 42,5Н в качестве вяжущего)

Как видно из таблицы, наименьшим водопоглощением через 1 час обладают составы 1, 5 и 9. Наилучший результат обусловлен уменьшением

макро- и микропористости бетона. В них обмазка зёрен заполнителя равномерная, а сам цементный камень наиболее плотный. Эти же составы имеют

наилучшие показатели прочности. Таким образом, по совокупности показателей, в том числе наименьшему расходу вяжущего для печати внутреннего слоя стен оптимальным является состав № 9.

Рационально подобранные композиции конструкционно-теплоизоляционные КПКБ для внутреннего заполнения трехслойной «напечатанной» стены, омоноличивания и теплоизоляции обеспечат формирование требуемых технико-эксплуатационных показателей. Рассмотрен вопрос возможного применения разработанного крупнопористого керамзитобетона в сочетании с мелкозернистым бетоном. Целью расчета было определить ориентировочную толщину трехслойной наружной стены в условиях города Белгорода, в которой крайние слои из мелкозернистого бетона выполняли защитно-декоративную, а средний слой из крупнопористого керамзитобетона – теплоизоляционно-конструкционную. Расчеты проводились в соответствии с СП 50.13330.2012 и СП 131.13330.2020 для жилого здания. Расчетная температура внутреннего воздуха принималась равной 20 °С для жилых зданий. Толщина крайних стенок принималась 30 мм. Расчеты показали, что необходимая толщина крупнопористого керамзитобетона для соблюдения требований по теплопередаче для Белгородского региона должна быть не менее 400–500 мм, а в целом толщина конструкции составляет 500–550 мм.

**Выводы.** Разработка составов строительных композитов, а также организация их массового производства для трехслойного 3D-аддитивного строительства зданий и сооружений позволит повысить психологический комфорт человека, обеспечит строительную отрасль промышленности изделиями сложной формы, с высокими эксплуатационными характеристиками, многократно сократит сроки строительства.

Серьёзной проблемой, тормозящей развитие технологии аддитивного строительства, является ограниченность рынка используемых компонентов и материалов. Одним из путей повышения эффективности технологии строительной печати стен и сборных элементов стен, при заводском способе организации производства, является переход от контурной печати к печати полнотелых многослойных конструкций. При этом в качестве материалов предлагается использование мелкозернистых бетонов в качестве защитно-декоративных внешних слоёв стен и перегородок, и крупнопористых керамзитобетонов для их внутреннего заполнения, омоноличивания и теплоизоляции. В процессе печати, наиболее объёмный внутренний слой из жёсткой крупнопористой керамзитобетонной смеси, формируемый за

счёт гравитационных сил и вибрационной подачи, будет выполнять поддерживающую функцию по отношению к пластичным внешним слоям их мелкозернистого бетона.

Разработанные составы крупнопористого керамзитобетона, обеспечивающие предел прочности при сжатии до 9,2 МПа, водопоглощением до 25 % по массе позволяют:

- обеспечить строительную отрасль промышленности изделиями сложной формы, с высокими эксплуатационными характеристиками;
- снизить себестоимость изготовления изделий сложной формы за счет отказа от дорогостоящих операций механической обработки.

*Источник финансирования.* Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Compos. Part B Eng. 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
2. Vatin N.I., Usanova K.Y. BIM end-to-end training: From school to graduate school // Adv. Trends Eng. Sci. Technol. III-Proc. 3rd Int. Conf. Eng. Sci. Technol. ESaT 2018. 2019. Pp. 651–656. DOI:10.1201/9780429021596-102
3. Lesovik V. Geonics. Subject and tasks. Belgorod: Publishing House of V.G. Shukhov BSTU. 2012. 213 p.
4. Казлитина О.В., Мартынова К.Ю., Адонин С.В., Лазарев П.И., Моторыкин Д.А., Антонюк Р. Геоника. Геомиметика как наука о разработке и применении эффективных композитов для монолитного строительства // Научные технологии и инновации. 2019. С. 221–224.
5. Бычкова А.А. Отображение синергетики в архитектурной геонике (Геомиметике) // Экономика. Общество. Человек. 2019. С. 57–61.
6. Цветкова Ю.П. Геоника как новое стилистическое направление в архитектуре // Фундаментальные основы строительного материаловедения. 2017. С. 1260–1265.
7. Немцева А.В., Пономарёва М.М. Архитектурная геоника в современных творческих концепциях // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека. 2019. С. 34–38.
8. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и

поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Научный рецензируемый журнал «Вестник СиБАДИ». 2021. Том 18 (1). С. 120–134.

9. Першина И.Л. Архитектурная геоника: новые подходы к архитектурному поиску комфортной среды обитания // Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ. 2018. С. 430–431.

10. Елистраткин М.Ю., Шапиро А.Э., Милькина А.С., Лесовик Г.А., Агеева М.С. Геоника. Геомиметика как основополагающее направление для развития строительной индустрии // Научные технологии и инновации. 2019. С. 125–129.

11. Lesovik V., Volodchenko A., Glagolev E., Lashina I., Fischer H. Geonics (geomimetics) as a theoretical basis for new generation compositing // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). Ser. «Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences». 2019. Pp. 344–347. DOI:10.1007/978-3-030-22974-0\_83

12. Lesovik V.S., Lesovik O.V., Volodchenko A.A. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties // Journal of southwest jiaotong university. 2020. Vol. 55. No. 3. DOI:10.35741/issn.0258-2724.55.3.14

13. Pershina I.L. On study and accounting of geophysical fields in architectural space of sacral purpose // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. DOI:10.1088/1757-899X/687/5/0550

14. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чернышева Н.В. Современные трехмерные технологии и факторы сдерживающие их // Вестник БГТУ В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 22–30.

15. Markin V., Nerella V.N., Schröfl C., Gusynova G., Mechtcherine V. Material Design and Performance Evaluation of Foam Concrete for Digital Fabrication // Materials (Basel). 2019. Vol. 12(15). 2433. DOI:10.3390/ma12152433

16. Глаголев Е.С., Ермолаева А.Э., Елистраткин М.Ю. Использование ячеистых бетонов

в 3d-аддитивной индустрии // Теоретические основы создания эффективных композитов. Сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки. 2018. С. 75–82.

17. Wolfs R., Bos F., Salet T. Early age mechanical behaviour of 3D-printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 106. Pp. 103–116.

18. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 151. Pp. 292–299.

19. Malaeb Z., Hachem H.A., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F.R. 3D Concrete printing: machine and mix design // International Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 6. No. 6. Pp. 14–22.

20. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., Qian S. A systematical review of 3D printable cementitious materials // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 207. Pp. 477–490. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144

21. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., Leal da Silva W.R., Nerella V.N., Fataei S., Wolfs R.J.M., Sonebi M., Roussel N. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: a review // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 132. 106037. DOI:10.1016/j.cemconres.2020.106037

22. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders // Materials & Design. 2016. Vol. 100. Pp. 102–109.

23. Wolfs R.J.M., Salet T.A.M. An optimization strategy for 3D concrete printing // In Proceedings of the 22nd EG-ICE workshop 2015. 2015. Pp. 1–5.

24. Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities // Automation in Construction. 2016. Vol. 72. Pp. 347–366.

#### Информация об авторах

**Шермет Алена Анатольевна**, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, старший преподаватель кафедры дизайна архитектурной среды. E-mail: [ajiyonka@ya.ru](mailto:ajiyonka@ya.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Елистраткин Михаил Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, E-mail: [mr.elistratkin@yandex.ru](mailto:mr.elistratkin@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шермет Евгений Олегович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: [66910@mail.ru](mailto:66910@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Лесовик Валерий Станиславович**, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: naukavs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шаталова Светлана Вячеславовна**, ассистент, ведущий инженер кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.07.2022 г.

© Шеремет А.А., Елистраткин М.Ю., Шеремет Е.О., Лесовик В.С., Шаталова С.В., 2022

**\*Sheremet A.A., Elistratkin M.Yu., Sheremet E.O., Lesovik V.S., Shatalova S.V.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: ajiyonka@yandex.ru*

## INVESTIGATION OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF COARSE-PORED EXPANDED CLAY CONCRETE FOR THREE-LAYER 3D ADDITIVE CONSTRUCTION

**Abstract.** *The article considers the solution of the urgent problem of the development of 3D additive technologies in Russia by creating a new model of the forming device and the development of composite materials. The purpose of this work is to study the physical, technological and thermal properties of coarse-pored expanded clay concrete. The required characteristics are determined by standard methods and requirements of regulatory documents, including modern physico-chemical methods of analysis and a wide range of modern and original research methods corresponding to modern scientific knowledge. Compositions of coarse-porous expanded clay concrete with compressive strength up to 9.2 MPa and water absorption up to 25% by weight were obtained. To simulate the behavior of the studied systems, a two-factor three-level experiment was conducted for each type of mixture of coarse-pored expanded clay concrete, which allowed us to obtain regression equations characterizing the relationship of variable parameters with certain properties of the system. It was revealed that the value of the average density is most affected by the specific consumption of the binder. While the strength depends most on the I/C ratio. Moreover, in this case, the amount of water is less related to the porosity of the cement stone itself, and more to the consistency and stickiness of the resulting glue, its ability to evenly cover filler particles. It is established that rationally selected compositions of structural and thermal insulation KPKB for the internal filling of a three-layer "printed" wall, homologation and thermal insulation will ensure the formation of the required technical and operational indicators.*

**Keywords:** *3D additive technologies, multilayer synthesis, expanded clay concrete, 3D printing, water absorption.*

### REFERENCES

1. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
2. Vatin N.I., Usanova K.Y. BIM end-to-end training: From school to graduate school. *Adv. Trends Eng. Sci. Technol. III-Proc. 3rd Int. Conf. Eng. Sci. Technol. ESaT 2018.* 2019. Pp. 651–656. DOI:10.1201/9780429021596-102
3. Lesovik V. Geonics. Subject and tasks. Belgorod: Publishing House of V. G. Shukhov BSTU. 2012. 213 p.
4. Kozlitina O.V., Martynova K.Yu., Adonin S.V., Lazarev P.I., Motorykin D.A., Antonyuk R. Geonics. Geomimetics as the science of the development and application of effective composites for monolithic construction [Geonika. Geomimetika kak nauka o razrabotke i primenenii effektivnykh kompozitov dlya monolitnogo stroitel'stva]. *High-tech technologies and innovations.* 2019. Pp. 221–224. (rus)
5. Bychkova A.A. Mapping of synergetics in architectural geonics (Geomimetics) [Otobazhenie sinergetiki v arhitekturnoj geonike (Geomimetike)]. *Economy. Society. Human.* 2019. Pp. 57–61. (rus)
6. Tsvetkova Yu.P. Geonics as a new stylistic direction in architecture [Geonika kak novoe stilisticheskoe napravlenie v arhitekture]. *Fundamentals of building materials science.* 2017. Pp. 1260–1265. (rus)
7. Nemtseva A.V., Ponomareva M.M. Architectural geonics in modern creative concepts [Arhitekturnaya geonika v sovremennykh tvorcheskikh koncepciyah]. *Nature-like technologies of building composites for the protection of human habitat.* 2019. Pp. 34–38. (rus)
8. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonics (geomimetics) and the search for optimal solutions in building materials science [Geonika (geomimetika) i poisk optimal'nyh



reshenij v stroitel'nom materialovedenii]. Scientific peer-reviewed journal "Bulletin of SibADI". 2021. Vol. 18. No. 1. Pp. 120–134. (rus)

9. Pershina I.L. Architectural bionics: new approaches to the architectural search for a comfortable living environment [Arhitekturnaya geonika: novye podhody k arhitekturnomu poisku komfortnoj sredy obitaniya]. Science, education and experimental design in MARKHI. 2018. Pp. 430–431. (rus)

10. Elistratkin M.Yu., Shapiro A.E., Milkina A.S., Lesovik G.A., Ageeva M.S. Geonics. Geomimetics as a fundamental direction for the development of the construction industry [Geonika. Geomimetika kak osnovopolagayushchee napravlenie dlya razvitiya stroitel'noj industrii]. High-tech technologies and innovations. 2019. Pp.125–129. (rus)

11. Lesovik V., Volodchenko A., Glagolev E., Lashina I., Fischer H. Geonics (geomimetics) as a theoretical basis for new generation compositing. 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). «Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences». 2019. Pp. 344–347. DOI:10.1007/978-3-030-22974-0\_83. (rus)

12. Lesovik V.S., Lesovik O.V., Volodchenko A.A. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties. Journal of southwest jiaotong university. 2020. Vol. 55. No. 3. DOI:10.35741/issn.0258-2724.55.3.14

13. Pershina I.L. On study and accounting of geophysical fields in architectural space of sacral purpose. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. DOI:10.1088/1757-899X/687/5/0550

14. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Chernysheva N.V. Modern three-dimensional technologies and factors constraining them [Sovremennye trekhmernye tekhnologii i faktory sderzhivayushchie ih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 12. Pp. 22–30. (rus)

15. Markin V., Nerella V.N., Schröfl C., Guseynova G., Mechtcherine V. Material Design and Performance Evaluation of Foam Concrete for Digital Fabrication. Materials (Basel). 2019. Vol. 12(15). 2433. DOI:10.3390/ma12152433

16. Glagolev E.S., Ermolaeva A.E., Elistratkin M.Yu. The use of cellular concrete in the 3d-additive industry [Ispol'zovanie yacheistyh betonov v 3d-additivnoj industrii]. Theoretical foundations for the creation of effective composites. Collection of materials of the Russian online conference dedicated to the Day of Science. 2018. Pp. 75–82. (rus)

17. Wolfs R., Bos F., Salet T. Early age mechanical behaviour of 3D-printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 106. Pp. 103–116.

18. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction. Procedia Engineering. 2016. Vol. 151. Pp. 292–299.

19. Malaeb Z., Hachem H.A., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F.R. 3D Concrete printing: machine and mix design. International Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 6. No. 6. Pp. 14–22.

20. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., Qian S. A systematical review of 3D printable cementitious materials. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 207. Pp. 477–490. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144

21. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., Leal da Silva W.R., Nerella V.N., Fataei S., Wolfs R.J.M., Sonebi M., Roussel N. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: a review. Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 132. 106037. DOI:10.1016/j.cemconres.2020.106037

22. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. Materials & Design. 2016. Vol. 100. Pp. 102–109.

23. Wolfs R.J.M., Salet T.A.M. An optimization strategy for 3D concrete printing. In Proceedings of the 22nd EG-ICE workshop 2015. 2015. Pp. 1–5.

24. Labonnote N., Ronquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. Automation in Construction. 2016. Vol. 72. Pp. 347–366.

#### *Information about the authors*

**Sheremet, Alyona A.** Postgraduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, Senior Lecturer of the Department of Architectural Environment Design. E-mail: ajiyonka@ya.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

**Elistratkin, Mikhail Yu.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

**Sheremet, Evgeny O.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: 66910@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

**Lesovik, Valery S.** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: naukavs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

**Shatalova, Svetlana V.** Assistant, Leading Engineer of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

---

*Received 27.07.2022*

**Для цитирования:**

Шеремет А.А., Елистраткин М.Ю., Шеремет Е.О., Лесовик В.С., Шаталова С.В. Исследование физико-механических свойств крупнопористого керамзитобетона для трехслойного 3d-аддитивного строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 30–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39

**For citation:**

Sheremet A.A., Elistratkin M.Yu., Sheremet E.O., Lesovik V.S., Shatalova S.V. Investigation of physico-mechanical properties of coarse-pored expanded clay concrete for three-layer 3D additive construction. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 30–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39