

Гипсоцементно-пуццолановые бетоны для аддитивного строительного производства

Равиль Зуфарович Рахимов, Рустем Ханифович Мухаметрахимов,
Альберт Радикович Галаутдинов, Лилия Валиевна Зиганшина
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);
г. Казань, Республика Татарстан, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивное строительное производство (3D-печать), осуществляемое бетонными и растворными смесями на основе минеральных вяжущих, в том числе смешанных, является одним из перспективных способов изготовления строительных изделий, конструкций, возведения зданий и сооружений. Анализ современного состояния исследований в области разработки композиционных материалов на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего для строительной 3D-печати свидетельствует об ограниченности его применения ввиду коротких сроков схватывания гипса, а также низких показателей водостойкости и пределов прочности изделий на его основе, что свидетельствует об актуальности изучения, направленного на разработку стабильных составов гипсоцементно-пуццолановых бетонов (ГЦПБ) для 3D-печати, обладающих высокими физико-техническими и оптимальными реотехнологическими характеристиками.

Материалы и методы. Изготовление образцов осуществлялось на строительном 3D-принтере AMT S-6044 производства ООО «СПЕЦАВИА». Применены стандартные методики исследования реологических свойств смесей и физико-технических свойств бетонов.

Результаты. Научно обоснован и экспериментально определен состав ГЦПБ в технологии аддитивного производства. Обоснована рациональность применения в технологии аддитивного производства бетонов с соотношением вяжущее:заполнитель = 1:2 при модуле крупности песка Мк 3, обеспечивающим следующие характеристики контрольного состава бетона: предел прочности при сжатии 22,1 МПа, при изгибе — 4,9 МПа, средняя плотность — 1892 кг/м³, формоустойчивость — 16 см, предельное напряжение сдвига — 58,5 Па. Изучены особенности структурообразования и ряд недостатков микроструктуры разработанного ГЦПБ, сформированного методом аддитивного производства.

Выводы. Разработаны ГЦПБ для аддитивного строительного производства методом послойной экструзии с оптимальным соотношением компонентов в составе вяжущего. Показана перспективность дальнейшего совершенствования составов ГЦПБ путем их модифицирования полифункциональными комплексными добавками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, аддитивные технологии, 3D-печать, строительные материалы, композиционные материалы, гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, раствор, бетон

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01180 (URL: <https://rscf.ru/project/23-79-01180/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рахимов Р.З., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Гипсоцементно-пуццолановые бетоны для аддитивного строительного производства // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 580–595. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.580-595

Автор, ответственный за переписку: Рустем Ханифович Мухаметрахимов, muhametrahimov@mail.ru.

Gypsum-cement-puzzolan concrete for 3D CP

Ravil Z. Rakhimov, Rustem Kh. Mukhametrakhimov, Albert R. Galautdinov,
Liliya V. Ziganshina

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE);
Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. 3D concrete printing (3DCP), carried out with concrete and mortar mixtures based on mineral binders, including hybrid mixtures, is one of the promising methods for the concrete products industry. The analysis of the current state of research in the field of development of composite materials based on gypsum-cement-pozzolan binder for 3DCP indicates the limitations of its use due to the short setting time of gypsum, as well as low water resistance and tensile strength of products based on it, which indicates the relevance of research, aimed at developing stable compositions of gypsum-cement-pozzolan concrete for 3DCP, with high physical, technical and optimal rheotechnological characteristics.

Materials and methods. The production of specimens was carried out on construction 3D printer "AMT S-6044" produced by "SPETSAVIA" LLC. Standard methods for studying rheological properties, physical and technical properties of concrete were applied.

Results. The composition of gypsum-cement-pozzolan concrete (GCPC) in 3DCP was theoretically substantiated and experimentally determined. Rational application of concrete with binder: aggregate ratio = 1:2, sand fineness modulus of Mk 3, providing the following characteristics of the control concrete composition: compressive strength — 22.1 MPa, bending strength — 4.9 MPa, average density — 1,892 kg/m³, dimensional stability 16 cm, ultimate shear stress 58.5 Pa was substantiated in 3DCP. The peculiarities of structure formation and some drawbacks of microstructure of the developed gypsum-cement-pozzolan concrete formed by the additive manufacturing method were studied.

Conclusions. Gypsum-cement-pozzolan concretes were developed for 3DCP with an optimal ratio of components in the binder composition. The prospects for further improvement of GCPC compositions by modifying them with multifunctional complex additives were shown.

KEYWORDS: construction, additive technologies, 3DCP, building materials, composite materials, gypsum-cement-pozzolan binder, mortar, concrete

Acknowledgements. The research was supported by Russian Science Foundation grant No. 23-79-01180 (URL: <https://rscf.ru/en/project/23-79-01180/>).

FOR CITATION: Rakhimov R.Z., Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Gypsum-cement-puzzolan concrete for 3D CP. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):580-595. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.580-595 (rus.).

Corresponding author: Rustem Kh. Mukhametrakhimov, muhametrahimov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

История развития производства и применения минеральных вяжущих веществ и материалов на их основе с древних времен и до сегодняшнего дня — это история непрерывных поисков путей разработки составов, технологии получения, повышения показателей физико-технических свойств, водостойкости и долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов [1, 2]. Сейчас основным общестроительным вяжущим служит портландцемент (ПЦ) и его разновидности, которые являются «хлебом» строительства и составляют около 80 % общего объема используемых в мире минеральных вяжущих, в том числе и в бетонах для аддитивного строительного производства. Вместе с тем их производство связано с высоким потреблением энергетических ресурсов и значительными объемами загрязняющих окружающую среду выбросов. Производство — крупный источник выделения в окружающую среду: углекислого газа до 1 т, оксидов азота до 9,5 кг, значительного количества пыли на 1 т ПЦ.

Одним из эффективных направлений совершенствования технической, экологической и экономической эффективности аддитивного строительного производства может стать применение бетонов на основе гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ), модифицированных комплексными минеральными и химическими добавками.

Казанская научная школа строительного материаловедения на протяжении многих десятилетий ведет систематические исследования по разработке эффективных модифицированных гипсовых вяжущих (ГВ), растворов и бетонов [3–6]. В настоящей работе приведены результаты исследований и разработок гипсоцементно-пуццолановых бетонов (ГЦПВ) для аддитивного строительного производства.

Аддитивное строительное производство (3D-печать) — один из активно развивающихся и пер-

спективных способов изготовления строительных изделий, конструкций, элементов зданий и сооружений [7–12]. 3D-печать осуществляется бетонными и растворными смесями на основе минеральных вяжущих (портландцемент, гипсовое и смешанные вяжущие). В значительной части исследований рассматриваются бетоны на основе цементного вяжущего [13–16]. Существенно меньшее внимание уделяется композитам на основе гипсовых и смешанных (гипсоцементно-пуццолановых) вяжущих.

Рассматривая гипсовое сырье в составе смесей для 3D-печати, стоит отметить его широкое применение в аддитивных технологиях методом формирования на выровненном слое порошка [17–21]. Выполненный анализ современного состояния исследований в области разработки композиционных материалов на основе ГЦПВ для строительной 3D-печати методом послойной экструзии свидетельствует об ограниченности его применения в данной технологии ввиду коротких сроков схватывания гипса. Среди возможных вариантов использования ГЦПВ в технологии 3D-печати методом послойной экструзии авторами в работах [22–25] предлагается их применение в пенобетонах, обладающих высокой теплоизоляцией, звукопоглощением и огнестойкостью.

Кроме того, широкое применение в строительстве материалов, изделий и конструкций на базе ГВ ограничивается наличием характерных для них недостатков, таких как низкие показатели водостойкости, пределов прочности и морозостойкости. Низкая водостойкость таких материалов и изделий обусловлена высокой растворимостью в воде частиц вяжущего [26, 27], а также возникающими внутренними напряжениями при адсорбции молекул воды поверхностями пустот и каверн в структуре материала с образованием водных пленок, сопровождающимися возникновением расклинивающего эффекта [28].

Ключевым направлением повышения физико-механических свойств и эксплуатационных показате-

телей материалов и изделий на основе ГВ является придание им свойств гидравлических вяжущих путем применения ПЦ совместно с активными минеральными добавками (АМД) [29], что обусловлено формированием водостойких гидратных новообразований и твердеющих в воде композитов при химическом взаимодействии компонентов смешанного вяжущего. А.В. Волженским и А.В. Ферронской разработаны эффективные ГЦПВ, материалы и изделия на основе которого обладают повышенными физико-механическими характеристиками, водостойкостью и морозостойкостью, а также меньшей ползучестью [30]. В исследовании [25] показана эффективность использования тонкоигольчатых и тонковолокнистых кристаллов гидросульфатоалюмината кальция для обеспечения условий формирования самоармированной упрочненной структуры гипсовых композиций.

Изучены физико-технические свойства материалов и изделий на основе ГЦПВ с различным соотношением и видом компонентов в составе вяжущего [29–34]. Эффективность широкого спектра АМД различного происхождения для ГЦПВ, обеспечивающих снижение концентрации оксидов и гидроксидов кальция в жидкой фазе, вступающих в реакцию с активным кремнеземом SiO_2 минеральных добавок, что обуславливает формирование в структуре композита низкоосновных гидросиликатов кальция и повышение его физико-механических свойств, рассмотрена в публикации [34]. Исследованы ГЦПВ на основе гипса марки Г10 (гипс — 65 %, ПЦ — 23 %, АМД — 12 %) [30]. Показано, что в зависимости от вида и гидравлической активности АМД коэффициент размягчения образцов составляет 0,55–0,8. Установлено, что введение в состав ГЦПВ опаловых пород взамен ГВ марки Г10 в количестве 10–30 % при постоянном содержании ПЦ позволяет увеличить водостойкость ГЦПК до 0,64–0,8 [35]. Определена эффективность применения широкого спектра природных и техногенных добавок для ГВ высоких марок, что выражается в увеличении пределов прочности гипсового камня [36]. При этом можно ожидать, что использование в вышеуказанных композициях низкомарочного гипса Г6 не позволит получить материалы и изделия с высокими физико-техническими и эксплуатационными показателями, что подтверждается результатами исследований [30]. Разработаны водостойкие изделия на основе модифицированного комплексной пластифицирующей добавкой ГЦПВ, при этом повышенный коэффициент размягчения достигается за счет высокого содержания ПЦ (не менее 34 % от массы вяжущего) [37, 38]. Известно, что материалы и изделия на основе ГЦПВ при содержании ПЦ в количестве 20–25 % обладают показателями ползучести, сопоставимыми с изделиями на ПЦ, что дает возможность определить минимальное содержание ПЦ в разрабатываемых композициях,

равное 20 %, которое принято для дальнейших экспериментальных исследований.

Одна из важнейших задач при разработке гипсоцементных композиций — обеспечение условий для формирования устойчивых структур при совместных гидратации и твердении гипсового и цементного вяжущих.

В соответствии с исследованиями А.В. Волженского [29–31] разрушение внутренней структуры ГЦПК при его твердении обусловлено кристаллизацией этtringита $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, который образуется с увеличением в объеме в условиях высокой концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе. Снижение концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обеспечивается введением в композицию гидравлических добавок, содержащих активный кремнезем SiO_2 , определяющий формирование низкоосновных гидроалюминатов кальция, гидросиликатов кальция и моносульфатной формы гидросульфатоалюмината кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), не создающих внутренних напряжений в структуре камня. При этом концентрация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе на 5 и 7 сутки должна удовлетворять требованиям¹ [39].

Эффективность АМД в ГЦП системах характеризуется их гидравлической активностью, обуславливающей их способность вступать в химическое взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, снижать его концентрацию в твердеющей системе и обеспечивать гидравлическое твердение ГЦПВ. Таким образом, необходимое содержание АМД в составе ГЦПВ будет зависеть от ее гидравлической активности.

Другими важными особенностями в технологии аддитивного строительного производства мелкозернистыми ГЦПВ, помимо обеспечения устойчивости ГЦП систем, является правильный выбор заполнителя, его крупность, соотношение с вяжущим [40], а также влияние на реотехнологические свойства смесей (подвижность, предельное напряжение сдвига, формоустойчивость) и физико-технические свойства мелкозернистого бетона (МЗБ) [41].

В работе [42] установлено, что введение в состав цементных систем полифракционных наполнителей в количестве 20–40 % от массы ПЦ позволяет обеспечить рациональное соотношение пластичности, структурной прочности и формоустойчивости смесей в технологии 3D-печати. Учитывая тот факт, что ползучесть изделий на основе ГЦПВ, содержащих не менее 20 % цемента, сопоставима с ползучестью изделий на ПЦ, можно ожидать, что полифракционные наполнители будут оказывать аналогичное влияние на изделия на основе разрабатываемого ГЦПВ. Наибольшая прочность характерна для цементных изделий при соотношении Ц/П = 1/1 [43]. Увеличение количества песка в составе смеси до Ц/П = 1:2 приводит к снижению прочности на 14 % при сопоста-

¹ ТУ 21-31-62–89. Гипсоцементнопуццолановое вяжущее. Технические условия. 1990. С. 17.

вимых значениях сроков схватывания, при этом дает возможность существенно сократить расход вяжущего и повысить экономическую целесообразность применения данных составов. Кроме того, в работе показано положительное влияние увеличения содержания песка в составе смеси на реотехнологические характеристики смесей в технологии аддитивного производства.

В рамках исследований [41] показана эффективность фракционирования мелкого заполнителя в составе бетонов на основе композиционного вяжущего при соотношении вяжущее:песок = 1:2 и его положительное влияние на формоустойчивость изделий, что соотносится с трудом [42]. Гипсовое вяжущее вводилось в состав данных бетонов для интенсификации процессов твердения, при этом в ходе исследований установлено его положительное влияние на физико-технические характеристики готовых изделий и показатели формоустойчивости бетонных смесей.

Изучены составы ГЦПБ для 3D-печати, в которых в качестве заполнителя применялся песок с модулем крупности M_k 2,63 [44]. Наилучшие результаты достигнуты при соотношении вяжущее:заполнитель = 1:1 и 1:2. Вместе с тем в работе не отражено влияние заполнителя на реологические и физико-технические свойства полученных ГЦПБ.

Предложены составы мелкозернистых бетонов на основе гипсоцементных вяжущих с комплексом химических добавок для эффективной 3D-печати контуров стеновых конструкций [25]. Лучшие показатели по критерию формоустойчивости были достигнуты при соотношении гипсоцементное вяжущее:заполнитель = 1:3–1:4 путем частичной поризации составов (10–15 %). При этом наблюдается закономерное снижение прочностных показателей и водостойкости готовых изделий по сравнению с составом с соотношением компонентов гипсоцементное вяжущее:заполнитель = 1:2. Задача формирования устойчивых структур в разработанных гипсоцементных системах решается преимущественно за счет минеральных добавок (опока, гранулированные шлаки), содержащихся в составе используемого ПЦ. В качестве компонента вяжущего применялся высокопрочный гипс марки Г16, существенно увеличивающий стоимость готовой продукции.

Анализ литературных данных свидетельствует об актуальности исследований, направленных на разработку стабильных составов ГЦПБ для 3D-печати на основе ГЦПВ, обладающих высокими физико-техническими и оптимальными реотехнологическими характеристиками для формования методом послойной экструзии.

Цель настоящей работы заключается в разработке гипсоцементно-пуццолановых бетонов для аддитивного строительного производства.

Объект исследования — гипсоцементно-пуццолановое вяжущее и бетоны на его основе в технологии аддитивного строительного производства.

Предмет исследования — сроки схватывания ГЦПВ, физико-технические характеристики ГЦПБ от вида и содержания АМД, реологические показатели смеси (формоустойчивость, предельное напряжение сдвига) и физико-технические показатели бетона (средняя плотность, пределы прочности при изгибе и сжатии) в зависимости от содержания мелкого заполнителя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись в лаборатории аддитивных технологий строительного производства Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

В качестве исходных материалов для приготовления сырьевой смеси для 3D-печати применялись следующие компоненты, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 59097–2020:

1) цементное вяжущее: ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Сухоложскцемент» по ГОСТ 31108–2020;

2) гипсовое вяжущее: полуводный гипс марки Г6 БП, нормально твердеющий, средней степени помола, производства ООО «Аракчинский гипс» по ГОСТ 125–2018;

3) заполнитель: речной кварцевый песок с модулем крупности M_k 1,2; 1,9; 2,4, 3 по ГОСТ 8736–2014;

4) активные минеральные добавки:

- биокремнезем производства ООО «Диамикс» по СТО 23998461-020–2018. Насыпная плотность — 403 кг/м³, рН водной вытяжки — 7,1, потери при прокаливании — 0,5 %. Массовая доля SiO₂ — 87,2 %;

- метакаолин месторождения «Журавлиный лог». Минералогический состав представлен полностью аморфизованным каолинитом (90–93 %), кристаллическая фаза — реликтовыми слюдой (2,5–3,0 %) и кварцем (4–5 %);

- активированный метакаолин, полученный термической обработкой исходного каолина при температуре 600 °С в течение 45 мин с последующей кислотной активацией в растворе муравьиной кислоты при массовом соотношении Т:Ж = 1:1 и измельчением;

- ферросилиций. Массовая доля SiO₂ — 63,7 %;

5) пластифицирующая добавка «БЕСТ-ТВ» (ООО «Инновационные Технологии»): суперпластификатор на основе эфиров карбоновых кислот с добавлением фосфатного компонента. Жидкость темно-коричневого цвета с плотностью (при 20 °С) 1,24 г/см³, средняя массовая доля сухого вещества — 25 %;

6) водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732–2011.

Определение необходимого количества минеральных добавок в составе ГЦПВ осуществлялось по концентрации оксида кальция, содержащегося в специальных препаратах, представляющих собой

водные суспензии полуводного гипса, ПЦ и АМД по методике, описанной в работе [39].

Сроки схватывания ГЦПВ определяли по ГОСТ 23789–2018, среднюю плотность — по ГОСТ 12730.1–2020, подвижность смесей — по ГОСТ 5802–86. Предельное напряжение сдвига ГЦПБ устанавливалось на границе гравитационной растекаемости в соответствии с методикой [45] при помощи простейшего вискозиметра, представляющего собой полый цилиндр из полипропилена высотой 200 мм, внутренним диаметром 105 мм. Пределы прочности при изгибе и сжатии определяли на образцах-балочках размерами 40 × 40 × 160 мм и половинках образцов-призм, полученных после испытания на изгиб, по ГОСТ 5802–86 с использованием испытательных машин ИП-100, ИП-1000-0, МИИ-100.

Формование образцов из ГЦП смеси методом послыонной экструзии выполнялось на цеховом строительном 3D-принтере AMT S-6044 производства компании ООО «СПЕЦАВИА» (г. Ярославль), организованном по порталной системе (рис. 1), посредством ее трехмерной печати по заранее разработанной трехмерной цифровой модели G-code.

Формоустойчивость ГЦПБ определяли по суммарной высоте слоев, печатаемых на 3D-принтере без технологического перерыва. Печать слоев производилась до достижения системой критического состояния — потери устойчивости образца в целом, характеризующейся его опрокидыванием, или потери устойчивости образца на локальном участке, характеризующейся смещением напечатанных слоев. Количество образцов в серии испытаний составляло 3.

Изучение микроструктуры ГЦПК проводилось с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа Merlin (Carl Zeiss), оснащенного спектрометром энергетической дисперсии AZtec X-Max (Oxford Instruments). Элементный ана-

лиз проводился при ускоряющем напряжении 20 кэВ и рабочем отрезке 9 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам первого этапа исследований установлены зависимости концентрации СаО в водных суспензиях полуводного гипса, ПЦ и АМД на 5-е и 7-е сутки от количества минеральной добавки (табл. 1).

Необходимое содержание АМД в составе ГЦПВ, определенное по результатам экспериментальных исследований, приведено на рис. 2.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 2, позволил установить, что наиболее эффективными АМД по критерию поглощения оксида кальция из водных ГЦП суспензий являются метакеолин, активированный метакеолин и ферросилиций, что обуславливает их наименьшее требуемое содержание в составе смеси — 20 % от массы ПЦ. На следующем этапе определено их влияние на сроки схватывания ГЦП смесей (рис. 3) и пределы прочности при изгибе и сжатии ГЦПК (рис. 4).

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить, что рассматриваемые АМД не оказывают существенного влияния на сроки схватывания и нормальную густоту смеси. При этом анализ данных, приведенных на рис. 3, свидетельствует о том, что исследуемые АМД дают возможность значительно повысить пределы прочности при изгибе и сжатии ГЦПК. Так, при использовании в качестве АМД ферросилиция пределы прочности при изгибе и сжатии увеличиваются на 15 и 9 %; метакеолина — на 48 и 49 %; активированного метакеолина — на 52 и 51 % соответственно. Кроме того, установлено, что исследуемые АМД позволяют повысить водостойкость ГЦПК, оцененную по коэффициенту размягчения, на 7–19 %. Следует отметить, что наилучшие показатели по критерию повышения пределов прочности при изгибе и сжатии получены при использовании в качестве АМД активированного метакеолина, однако затраты на его производство, связанные с активацией метакеолина в растворе органических кислот, обуславливают нецелесообразность его применения в качестве пуццоланового компонента ГЦПВ [46]. В этой связи в качестве пуццоланового компонента для ГЦП композиций в дальнейших исследованиях был принят метакеолин, а в качестве вяжущего для ГЦПБ, формируемых методом аддитивного производства, — ГЦПВ при следующем соотношении компонентов: гипс — 76 %; ПЦ — 20 %; АМД (метакеолин) — 4 %.

На следующем этапе изучены зависимости влияния модуля крупности песка на физико-технические характеристики ГЦПБ. По результатам анализа литературных данных соотношение



Рис. 1. Строительный 3D-принтер AMT S-6044, расположенный в лаборатории аддитивных технологий строительного производства КГАСУ

Fig. 1. Construction 3D printer AMT S-6044 in the laboratory of additive construction technologies of KSUAE

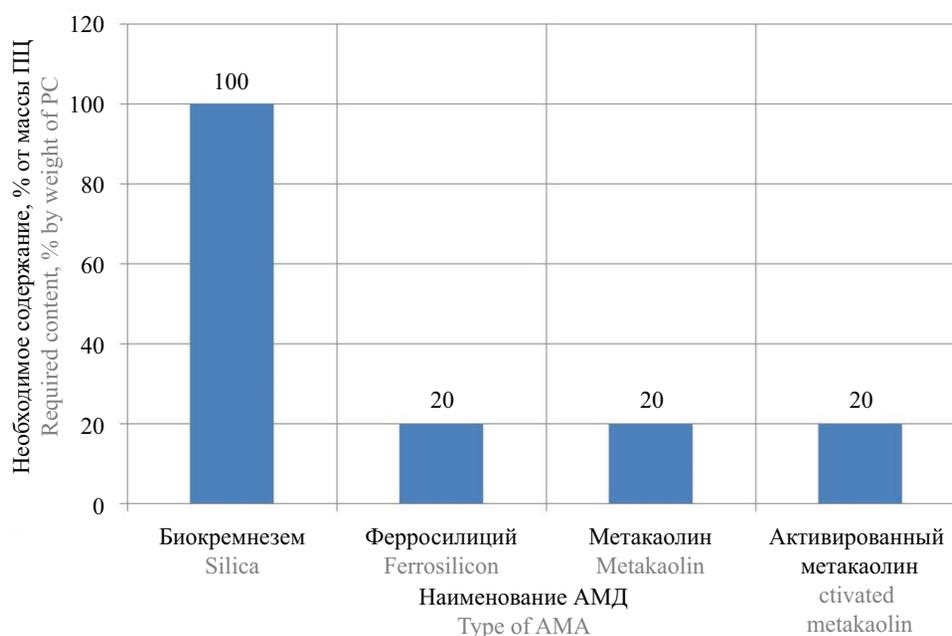
Табл. 1. Зависимость концентрации СаО в водных суспензиях полуводного гипса, ПЦ и минеральной добавки на 5-е и 7-е сутки от количества АД**Table 1.** Dependence of the CaO concentration in aqueous suspensions of calcined gypsum, PC and mineral additives on days 5 and 7 on the amount of AMA

Вид АД Type of AMA	Количество АД, г Amount of AMA, g	Концентрация СаО в водных суспензиях CaO concentration in aqueous suspensions	
		на 5-е сутки on day 5	на 7-е сутки on day 7
Биокремнезем Silica	1,25	1,23	1,00
	2,5	1,05	0,68
	3,75	0,99	0,26
Ферросилиций Ferrosilicon	0,25	0,91	0,89
	0,75	0,72	0,68
	1,25	0,63	0,53
	2,5	0,3	0,07
	3,75	0,08	0,07
Метакаолин Metakaolin	0,25	0,87	0,80
	0,75	0,74	0,20
	1,25	0,27	0,03
	2,5	0,045	0,02
	3,75	0,028	0,02
Активированный метакаолин Activated metakaolin	0,25	0,77	0,67
	0,75	0,71	0,57
	1,25	0,64	0,40
	2,5	0,08	0,06
	3,75	0,06	0,03

ГЦПВ:заполнитель принято равным 1:2. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Установлено, что наилучшие показатели при формировании образцов методом 3D-печати по критериям

средней плотности и пределу прочности при сжатии достигаются при использовании крупного песка с модулем крупности $M_k 3$. Так, средняя плотность возрастает на 0,7–4,2 % по сравнению с песками

**Рис. 2.** Необходимое содержание исследуемых АД в составе ГЦПВ**Fig. 2.** Required content of the studied AMA in GPCP

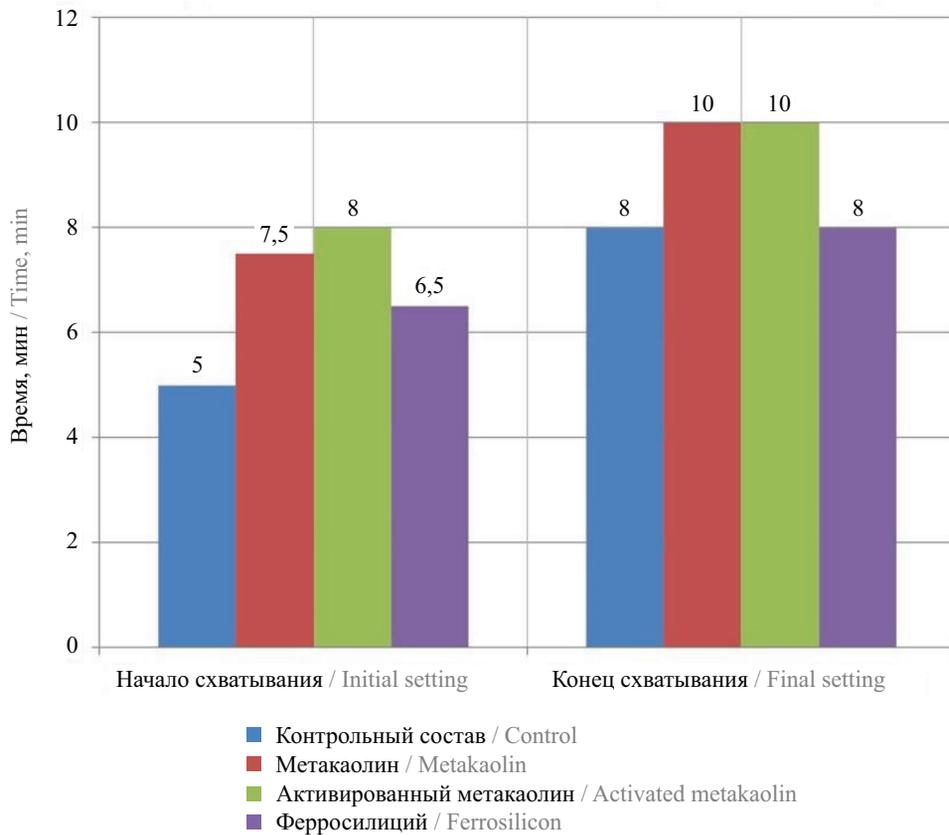


Рис. 3. Влияние исследуемых АМД на сроки схватывания ГЦПВ

Fig. 3. Influence of the studied AMA on the setting time of GPCPC

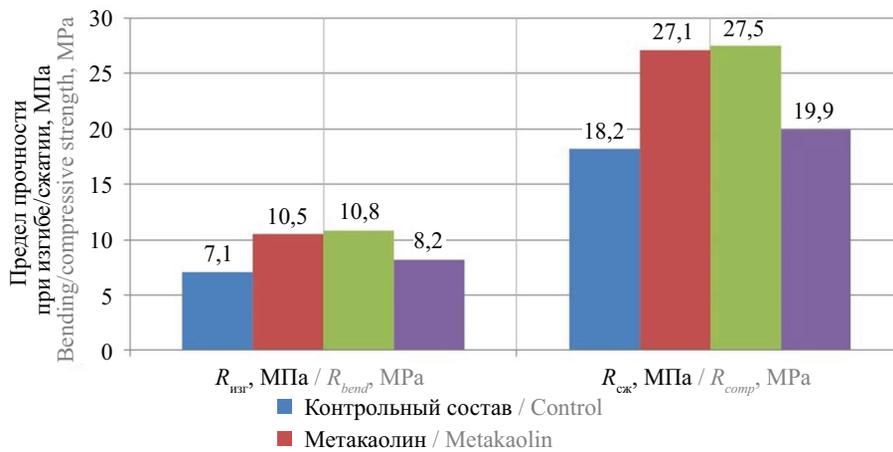


Рис. 4. Влияние исследуемых АМД на пределы прочности при изгибе и сжатии ГЦП композиций

Fig. 4. Influence of the studied AMA on the bending and compressive strengths of GCP compositions

других групп, предел прочности при сжатии — на 5,7–26,3 %. При этом модуль крупности песка в меньшей степени оказывает влияние на пределы прочности при изгибе (1,9–9,6 %). В связи с этим для проведения последующих исследований принят песок с модулем крупности Мк 3.

С целью определения влияния содержания заполнителя (песка) в составе разрабатываемого ГЦПБ на его физико-технические свойства и реотехнологические свойства смесей изготовлены 3 состава ГЦПБ (далее № 1–3), сформованные методом

3D-печати, с соотношением ГЦПВ:песок = 1:1, 1:2, 1:3 соответственно, определенным как наиболее оптимальное по данным литературного обзора. Подвижность смесей для формования методом послойной экструзии принята Пк 2 [47, 48], модуль крупности песка — Мк 3. Требуемое время жизнеспособности смеси обеспечивалось путем модифицирования исследуемых составов замедляющим схватывание СП «Бест-ТБ».

Результаты экспериментальных исследований влияния содержания песка в составе ГЦПБ на рео-

Табл. 2. Влияние модуля крупности песка на физико-технические характеристики ГЦПБ

Table 2. Influence of sand fineness modulus on physical-technical characteristics of GCPC

Модуль крупности песка, Мк Sand fineness modulus, Mk	Группа песка Sand group	Средняя плотность, кг/м ³ Average density, kg/m ³	Предел прочности при изгибе, МПа Bending strength, MPa	Предел прочности на сжатие, МПа Compressive strength, MPa
1,2	Очень мелкий Very fine	1816	5,2	17,5
1,9	Мелкий Fine	1864	5,7	19,5
2,4	Средний Medium	1879	5,4	20,9
3	Крупный Fine gravel	1892	5,3	22,1

технологические показатели смесей (формоустойчивость, подвижность, предельное напряжение сдвига) приведены на рис. 5.

Анализ данных рис. 5 позволил установить, что наибольшее повышение реологических показателей исследуемых составов достигается при соотношении ГЦПВ:песок = 1:2 и 1:3. Так, формоустойчивость составов № 2 и 3 выше по сравнению с составом № 1 на 14 и 21 %; предельное напряжение сдвига — на 37 и 89 % соответственно, что согласуется с результатами исследования [47].

Результаты экспериментальных исследований влияния содержания песка на среднюю плотность и пределы прочности ГЦПБ приведены на рис. 6.

Анализ данных (рис. 6) дал возможность определить, что наилучшие показатели по критерию повышения прочностных показателей и средней плотности готовых изделий достигаются при соотношении ГЦПВ:песок = 1:2. Предел прочности при сжатии состава № 2 выше по сравнению с составами № 1 и 3 на 15 и 169 % соответственно; предел прочности при изгибе — на 19 и 63 % соответственно; средняя плотность — на 3 и 4 % соответственно.

По результатам выполненных исследований выявлено, что при соотношении компонентов ГЦПВ:песок = 1:2 в составе разрабатываемого ГЦПБ достигаются наилучшие физико-технические и реотехнологические свойства исследуемых композиций. При этом следует отметить, что особенности формирования внутренней структуры цементных композитов являются важнейшими факторами, определяющими их физико-технические и эксплуатационные показатели. В этой связи на следующем этапе изучены особенности структурообразования оптимального состава ГЦПБ, сформированного методом аддитивного производства (3D-печати), методом электронно-микроскопического и микронзондового анализов. Результаты исследований приведены на рис. 7, 8.

Анализ микроструктуры ГЦПК (рис. 7) демонстрирует формирование сравнительно неупорядоченной структуры композита, что обусловлено применением в его составе ПЦ с высокой ранней активностью (ЦЕМ I). Для таких цементов характерны быстрые темпы образования гидросиликатных фаз, совпадающие с периодом кристаллизации гипсового вяжущего, в результате чего в структуре наблюдается «перемешивание» данных гидратных новообразований.

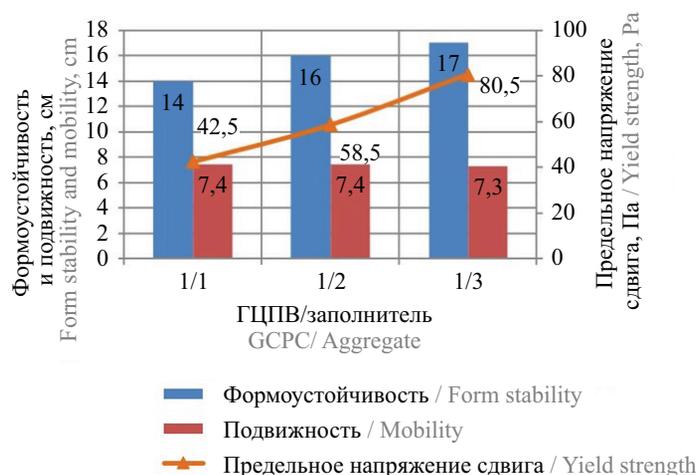


Рис. 5. Влияние содержания песка в составе ГЦПБ на реотехнологические показатели смесей

Fig. 5. Influence of sand content in composition of GCPC on the rheotechnological characteristics of mixtures

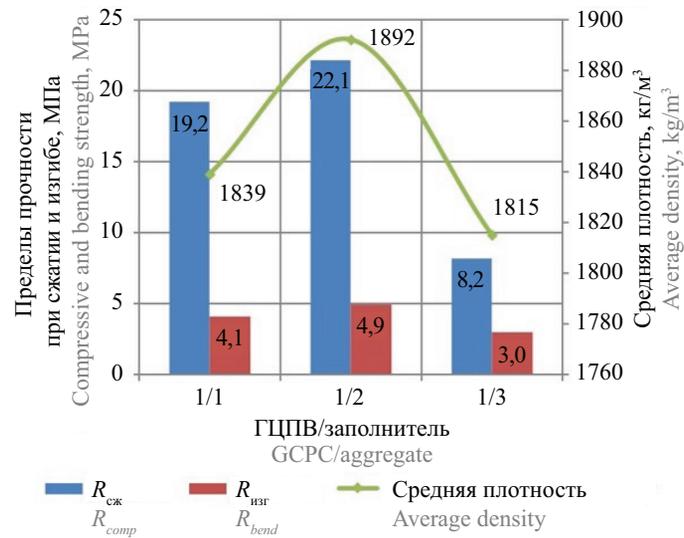


Рис. 6. Влияние содержания песка на среднюю плотность и пределы прочности ГЦПВ

Fig. 6. Influence of sand content on the average density and strength of GPCPC

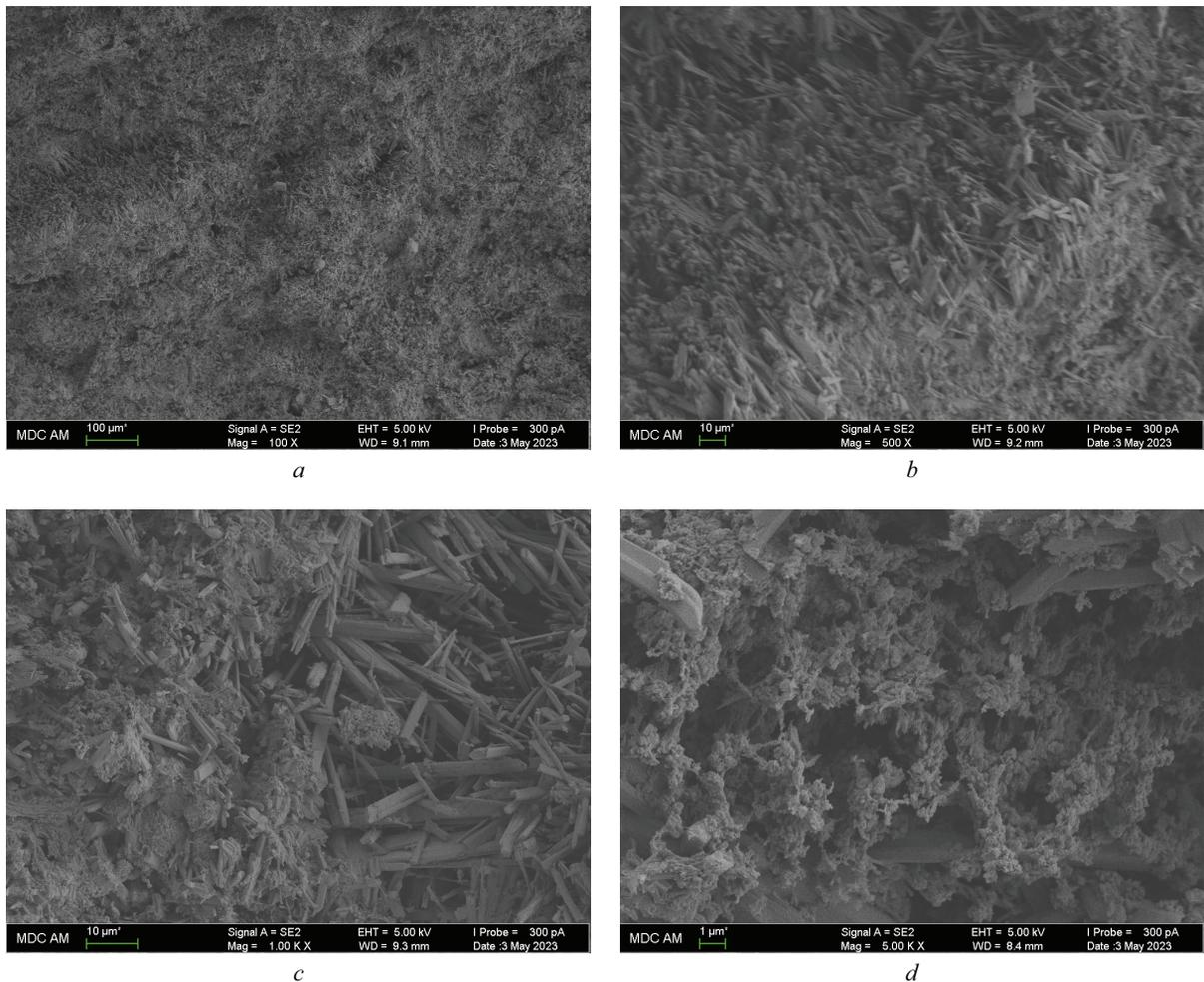
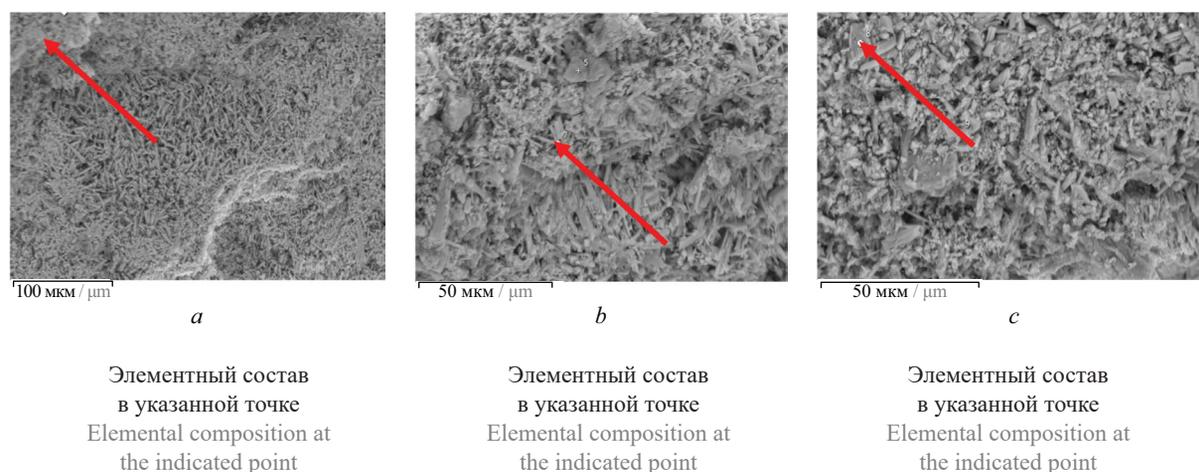


Рис. 7. Электронно-микроскопические снимки исследуемого состава ГЦПК при различных увеличениях: *a* — увеличение $\times 100$; *b* — увеличение $\times 500$; *c* — увеличение $\times 1000$; *d* — увеличение $\times 5000$

Fig. 7. SEM images of the studied composition of GPCPC at various magnifications: *a* — magnification $\times 100$; *b* — magnification $\times 500$; *c* — magnification $\times 1,000$; *d* — magnification $\times 5,000$



Элемент Element	Атомный процент Atomic percent
O	72,99
Al	0,38
Si	1,05
S	12,10
Ca	13,40
Fe	0,08

Элемент Element	Атомный процент Atomic percent
C	34,05
O	55,90
Na	0,09
Mg	0,09
Al	0,18
Si	0,62
S	1,96
Cl	0,05
Ca	7,07

Элемент Element	Атомный процент Atomic percent
O	47,28
Al	0,45
Si	1,45
S	11,89
Cl	0,19
Ca	36,91
Fe	1,83

Рис. 8. Элементный состав продуктов гидратации состава № 1 в указанных точках: *a* — увеличение $\times 250$; *b* — увеличение $\times 750$; *c* — увеличение $\times 830$

Fig. 8. Elemental composition of hydration products of composition No. 1 at the indicated points: *a* — magnification $\times 250$; *b* — magnification $\times 750$; *c* — magnification $\times 830$

Изучение элементного состава образца в указанной на рис. 8, *b* точке свидетельствует о незначительном количестве игольчатых включений высокоосновной формы гидросульфалюмината кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Вышеуказанные явления подтверждают потенциал дальнейшего совершенствования составов ГЦПБ, формуемых методом аддитивного строительного производства, для повышения физико-технических свойств и долговечности готовых изделий. В этой связи особую актуальность при проведении дальнейших исследований представляет оптимизация состава ГЦПБ для 3D-печати, разработка полифункциональных комплексных добавок и изучение их влияния на свойства модифицированных бетонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теоретически обосновано и экспериментально определено соотношение компонентов в составе ГЦПВ для МЗБ в технологии аддитивного производства, обеспечивающее формирование композитов с устойчивыми и стабильными структурой и физико-техническими характеристиками: гипс — 76 %; ПЦ — 20 %; АМД (метакаолин) — 4 %.

На основе анализа имеющихся теоретических представлений о роли заполнителя в формировании реотехнологических и физико-механических характеристик МЗБ и экспериментальных исследований обоснована рациональность применения в технологии аддитивного производства бетонов с соотношением ГЦПВ:заполнитель = 1:2 при модуле крупности песка Мк 3, обеспечивающим следующие характеристики контрольного состава бетона: $R_{\text{сж}} = 22,1$ МПа, $R_{\text{нзг}} = 4,9$ МПа, $r_{\text{ср}} = 1892$ кг/м³, формоустойчивость — 16 см, $t_0 = 58,5$ Па.

Изучение особенностей структурообразования ГЦПБ оптимального состава, сформированного методом аддитивного производства, с применением электронно-микроскопического и микрозондового анализов позволило установить формирование сравнительно неупорядоченной структуры композита вследствие применения ПЦ с высокой ранней активностью, характеризующегося быстрыми темпами образования гидросиликатных фаз, совпадающих с периодом кристаллизации ГВ. Выявлено формирование в структуре композита игольчатых включений этрингита, что, по мнению авторов, может

приводить к снижению физико-технических свойств и долговечности готовых изделий и свидетельствует о потенциале дальнейшего совершенствования составов ГЦПБ в технологии аддитивного строительного производства.

Особую актуальность при проведении дальнейших исследований представляет разработка полифункциональных комплексных добавок и изучение их влияния на свойства модифицированных ГЦПБ, формируемых методом 3D-печати.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. История науки и техники : учебное пособие. СПб. : Лань, 2022. 528 с.
2. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. История композиционных минеральных вяжущих веществ : учебное пособие. СПб. : Лань, 2023. 268 с.
3. Хакимов Ф.М. Бетон на гипсоангидридовом цементе // Труды Казанского института коммунального строительства. 1936.
4. Рахимов Р.З., Халиуллин М.И. Состояние и тенденции развития промышленности гипсовых строительных материалов // Строительные материалы. 2010. № 12. С. 44–46. EDN NQTZQF.
5. Алтыкис М.Г., Рахимов Р.З. Гипс. Строительные материалы и изделия : учебное пособие. Казань : КИСИ, 1994. 107 с.
6. Khaliullin M., Rakhimov R., Faizrakhmanov I. The influence of thermally activated clay additives on the properties of composite gypsum binder // ZKG International. 2017. Vol. 70. Issue 5. Pp. 58–63. EDN XNKKCU.
7. Chen Y., Figueiredo S.C., Li Z., Chang Z., Jansen K., Çopuroğlu O. et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 132. P. 106040. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106040
8. Muthukrishnan S., Ramakrishnan S., Sanjayan J. Effect of microwave heating on interlayer bonding and buildability of geopolymers 3D concrete printing // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 265. P. 120786. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120786
9. Chen Y., Jansen K., Zhang H., Rodriguez C.R., Gan Y., Çopuroğlu O. et al. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 262. P. 120094. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120094
10. Ma G., Salman N.M., Wang L., Wang F. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 244. P. 118305. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118305
11. Liu J., Li S., Gunasekara C., Fox K., Tran P. 3D-printed concrete with recycled glass: Effect of glass gradation on flexural strength and microstructure // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 314. P. 125561. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125561
12. Van den Heever M., Bester F., Kruger J., van Zijl G. Numerical modelling strategies for reinforced 3D concrete printed elements // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 50. P. 102569. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102569
13. Weng Y., Li M., Zhang D., Tan M.J., Qian S. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 143. P. 106386. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106386
14. Baduge S.K., Navaratnam S., Abu-Zidan Y., McCormack T., Nguyen K., Mendis P. et al. Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods // Structures. 2021. Vol. 29. Pp. 1597–1609. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.061
15. Lu B., Li M., Wong T.N., Qian S. Effect of printing parameters on material distribution in spray-based 3D concrete printing (S-3DCP) // Automation in Construction. 2021. Vol. 124. P. 103570. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103570
16. Salman N.M., Ma G., Ijaz N., Wang L. Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3D concrete printing (3DCP): Prospects and challenges // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 291. P. 123281. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123281
17. Shakor P., Nejadi S., Paul G., Sanjayan J. Dimensional accuracy, flowability, wettability, and porosity in inkjet 3DP for gypsum and cement mortar materials // Automation in Construction. 2020. Vol. 110. P. 102964. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102964
18. 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 // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
19. Ma X., Tan L., Lu Y., Yao W., Wei Y. Upcycling of waste plasterboard for the synthesis of high-quality gypsum-based 3D printing powder // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 373. P. 130846. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130846
20. Ma B., Jiang Q., Huang J., Wang X., Leng J. Effect of different silica particles on flowability of

gypsum powder for 3D powder printing // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 217. Pp. 394–402. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.097

21. *Dantas A.C.S., Scalabrin D.H., De Farias R., Barbosa A.A., Ferraz A.V., Wirth C.* Design of highly porous hydroxyapatite scaffolds by conversion of 3d printed gypsum structures – a comparison study // Procedia CIRP. 2016. Vol. 49. Pp. 55–60. DOI: 10.1016/j.procir.2015.07.030

22. *Chernyisheva N.V., Shatalova S.V., Drebezgova M.Yu., Lesnichenko E.N.* Thermal insulating and constructive foamed concrete on a composite gypsum binder // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 125–130. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.974.125

23. *Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Елистраткин М.Ю., Дребезгова М.Ю., Масалитина С.В.* Реологические свойства гипсоцементных вяжущих и формовочных смесей на их основе для 3D-аддитивных технологий строительства // Строительные материалы. 2022. № 8. С. 23–30. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-805-8-23-30. EDN WSXKNG.

24. *Чернышева Н.В., Шаталова С.В., Масалитина С.В.* Композиционные гипсовые вяжущие для поризованных композитов в технологии строительной печати // Университетская наука. 2021. № 1 (11). С. 91–94. EDN ZSAQTD.

25. *Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шеремет А.А.* Разработка комплексного решения для 3D-печати стеновых конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19. EDN NMUSWL.

26. *Будников П.П.* Гипс, его исследование и применение. М. ; Л. : Гос. изд-во строит. лит., 1943. 372 с.

27. *Юнг В.Н., Бутт Ю.М., Журавлев В.Ф., Окольков С.Д.* Технология вяжущих веществ : учебник. М. : Гос. изд-во лит. по строит. материалам, 1952. 600 с.

28. *Ребиндер П.А.* Физико-химические исследования процессов деформации твердых тел // Сборник АН СССР. 1947. Т. 1. С. 84–88.

29. *Волженский А.В., Иванникова Р.В.* Гипсоцементные и гипсошлаковые вяжущие вещества // Строительные материалы, изделия и конструкции. 1955. № 4. С. 13–16.

30. *Волженский А.В., Стамбулко В.И., Ферронская А.В.* Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, бетоны и изделия. М. : Стройиздат, 1971. 318 с.

31. *Волженский А.В., Коган Г.С., Краснослободская З.С.* Влияние активного кремнезема на процессы взаимодействия алюминатных составляющих портландцементного клинкера с гипсом // Строительные материалы. 1963. № 1. С. 31–34.

32. *Волженский А.В., Коган Г.С., Арбузов Н.Т.* Гипсобетонные панели для перегородок и внутренней облицовки наружных стен. М. : Промстройиздат, 1955. 186 с.

33. *Ферронская А.В.* Долговечность гипсовых материалов, изделий и конструкций. М. : Стройиздат, 1984. 253 с.

34. *Сегодник Д.Н., Потапова Е.Н.* Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее с активной минеральной добавкой метакаолин // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28. № 8 (157). С. 77–79. EDN STFXJF.

35. *Волженский А.В., Роговой М.И., Стамбулко В.И.* Гипсоцементные и гипсошлаковые вяжущие изделия. М. : Госстройиздат, 1960. 168 с.

36. *Булычев Г.Г.* Смешанные гипсы: производство и применение в строительстве. М. : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952. 135 с.

37. *Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Власов В.В.* Высокопрочное гипсоцементно-цеолитовое вяжущее // Строительные материалы. 2010. № 2. С. 53–55. EDN MBCHZR.

38. *Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Ильичева О.М.* Деформации высокопрочного композиционного гипсового вяжущего при твердении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2010. № 15 (191). С. 51–53. EDN MNJOMJ.

39. *Ферронская А.В.* Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) : справочник. М. : Изд-во АСВ, 2004. 485 с.

40. *Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С.* Формирование свойств композиций для строительной печати // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 6–14. DOI: 10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178. EDN ZOWEOF.

41. *Шорстова Е.С., Клюев А.В., Клюев С.В., Гарькина И.А.* Тонкомолотый отсев дробления кварцито-песчаника в фибробетонной смеси для 3D-печати // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 3 (56). С. 69–76. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_69. EDN MBGPIR.

42. *Славчева Г.С., Ибряева А.И.* Влияние концентрации и гранулометрии наполнителей на реологические свойства цементных систем // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 2 (2). С. 29–36. EDN SHMTRK.

43. *Торшин А.О., Боровикова С.О., Корчунов И.В., Потапова Е.Н.* Разработка строительной смеси для 3D-печати // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 2 (198). С. 164–166. EDN VMNBEG.

44. Potapova E., Guseva T., Shchelchkov K., Fischer H.B. Mortar for 3D Printing Based on Gypsum Binders // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037. Pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26

45. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Из-во АСВ, 2006. 368 с. EDN QNMNZZ.

46. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Механоактивированное гипсоцементно-пуццолановое вяжущее на основе модифицированного низкомарочного сырья // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 1 (43). С. 187–195. EDN XNGJFB.

47. Мухаметрахимов Р.Х., Лукманова Л.В. Влияние поргланцементов с различным минералогическим составом на основные свойства композитов, сформованных методом послойного экструдирования (3D-печати) // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. № 2 (56). С. 37–49. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_37. EDN DXDYSR.

48. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Influence of cement-sand mortar mobility on the quality of 3D printed hardened composite // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021. Vol. 94. P. 9404. DOI: 10.4123/CUBS.94.4

Поступила в редакцию 16 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 2 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Равиль Зуфарович Рахимов** — доктор технических наук, профессор, советник ректората, член-корреспондент РААСН; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 612876, Scopus: 7005848197, ResearcherID: AAG-2224-2019, ORCID: 0000-0002-4251-1605; rahimov11@bk.ru;

Рустем Ханифович Мухаметрахимов — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительного производства; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, Республика Татарстан; РИНЦ ID: 616214, Scopus: 57194452261, ResearcherID: N-9429-2016, ORCID: 0000-0003-2062-5289; muhametrakhimov@mail.ru;

Альберт Радикович Галаутдинов — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительного производства; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, Республика Татарстан; РИНЦ ID: 836160, Scopus: 57194458273, ResearcherID: G-6938-2018, ORCID: 0000-0001-9999-6925; galautdinov89@mail.ru;

Лилия Валиевна Зиганшина — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры технологий строительного производства; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, Республика Татарстан; SPIN-код: 6496-7055, Scopus: 57194444416, ResearcherID: AAG-9477-2020, ORCID: 0000-0003-0090-2410; lilya0503199@gmail.com.

Вклад авторов:

Рахимов Р.З. — научное консультирование, концепция исследования, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Мухаметрахимов Р.Х. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, проведение лабораторных испытаний, обработка результатов испытаний, написание исходного текста, итоговые выводы.

Галаутдинов А.Р. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов испытаний, доработка текста, итоговые выводы.

Зиганшина Л.В. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов испытаний, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. *History of science and technology : textbook*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022; 528. (rus.).

2. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. *History of composite mineral binders : textbook*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2023; 268. (rus.).

3. Khakimov F.M. Concrete on gypsum anhydride cement. *Proceedings of the Kazan Institute of Communal Construction*. 1936. (rus.).

4. Rakhimov R.Z., Khaliullin M.I. State and trends in the development of the gypsum construction materials industry. *Construction Materials*. 2010; 12:44-46. EDN NQTZQF. (rus.).

5. Altykis M.G., Rakhimov R.Z. *Gips. Construction materials and products : textbook*. Kazan, KISI, 1994; 107. (rus.).

6. Khaliullin M., Rakhimov R., Faizrakhmanov I. The influence of thermally activated clay additives

on the properties of composite gypsum binder. *ZKG International*. 2017; 70(5):58-63. EDN XNKKCU.

7. Chen Y., Figueiredo S.C., Li Z., Chang Z., Jansen K., Çopuroğlu O. et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. *Cement and Concrete Research*. 2020; 132:106040. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106040

8. Muthukrishnan S., Ramakrishnan S., Sanjayan J. Effect of microwave heating on interlayer bonding and buildability of geopolymers 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*. 2020; 265:120786. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120786

9. Chen Y., Jansen K., Zhang H., Rodriguez C.R., Gan Y., Çopuroğlu O. et al. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*. 2020; 262:120094. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120094

10. Ma G., Salman N.M., Wang L., Wang F. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2020; 244:118305. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118305

11. Liu J., Li S., Gunasekara C., Fox K., Tran P. 3D-printed concrete with recycled glass: Effect of glass gradation on flexural strength and microstructure. *Construction and Building Materials*. 2022; 314:125561. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125561

12. Van den Heever M., Bester F., Kruger J., van Zijl G. Numerical modelling strategies for reinforced 3D concrete printed elements. *Additive Manufacturing*. 2022; 50:102569. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102569

13. Weng Y., Li M., Zhang D., Tan M.J., Qian S. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process. *Cement and Concrete Research*. 2021; 143:106386. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106386

14. Baduge S.K., Navaratnam S., Abu-Zidan Y., McCormack T., Nguyen K., Mendis P. et al. Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods. *Structures*. 2021; 29:1597-1609. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.061

15. Lu B., Li M., Wong T.N., Qian S. Effect of printing parameters on material distribution in spray-based 3D concrete printing (S-3DCP). *Automation in Construction*. 2021; 124:103570. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103570

16. Salman N.M., Ma G., Ijaz N., Wang L. Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3D concrete printing (3DCP): Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*. 2021; 291:123281. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123281

17. Shakor P., Nejadi S., Paul G., Sanjayan J. Dimensional accuracy, flowability, wettability, and poros-

ity in inkjet 3DP for gypsum and cement mortar materials. *Automation in Construction*. 2020; 110:102964. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102964

18. 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. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 143:172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012

19. Ma X., Tan L., Lu Y., Yao W., Wei Y. Upcycling of waste plasterboard for the synthesis of high-quality gypsum-based 3D printing powder. *Construction and Building Materials*. 2023; 373:130846. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130846

20. Ma B., Jiang Q., Huang J., Wang X., Leng J. Effect of different silica particles on flowability of gypsum powder for 3D powder printing. *Construction and Building Materials*. 2019; 217:394-402. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.097

21. Dantas A.C.S., Scalabrin D.H., De Farias R., Barbosa A.A., Ferraz A.V., Wirth C. Design of Highly Porous Hydroxyapatite Scaffolds by Conversion of 3D Printed Gypsum Structures – A Comparison Study. *Procedia CIRP*. 2016; 49:55-60. DOI: 10.1016/j.procir.2015.07.030

22. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Drebezgova M.Yu., Lesnichenko E.N. Thermal Insulating and Constructive Foamed Concrete on a Composite Gypsum Binder. *Materials Science Forum*. 2019; 974:125-130. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.974.125

23. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Elistratkin M.Yu., Drebezgova M.Yu., Masalitina S.V. Rheological properties of gypsum cement binders and molding mixtures based on them for 3d additive construction technologies. *Construction Materials*. 2022; 8:23-30. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-805-8-23-30. EDN WSXKNG. (rus.).

24. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Masalitina S.V. Composite gypsum binders for porous composites in construction printing technology. *University Science*. 2021; 1(11):91-94. EDN ZSAQTD. (rus.).

25. Shatalova S., Chernysheva N., Lesovik V., Elistratkin M., Sheremet A. Development of a comprehensive solution for 3D printing of wall structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 10:8-19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19. EDN NMUSWL. (rus.).

26. Budnikov P.P. *Gypsum, its research and application*. Moscow; Leningrad, State Publishing House of Construction Literature, 1943; 368. (rus.).

27. Yung V.N., Butt Yu.M., Zhuravlev V.F., Okorokov S.D. *Technology of binders*. Moscow, State publishing house of literature on building materials, 1952; 600. (rus.).

28. Rebinder P.A. Physico-chemical studies of the deformation processes of solids. *Collection of the USSR Academy of Sciences*. 1947; 1:84-88. (rus.).

29. Volzhenskiy A.V., Ivannikova R.V. Gypsum cement and gypsum slag binders. *Building Materials, Products and Structures*. 1955; 4:13-16. (rus.).
30. Volzhenskiy A.V., Stambulko V.I., Ferronskaya A.V. *Gypsum-cement-pozzolan binders, concretes and products*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971; 318. (rus.).
31. Volzhenskiy A.V., Kogan G.S., Krasnoslobodskaya Z.S. The effect of active silica on the processes of interaction of aluminate components of Portland cement clinker with gypsum. *Construction Materials*. 1963; 1:31-34. (rus.).
32. Volzhenskiy A.V., Kogan G.S., Arbuzov N.T. *Gypsum concrete panels for partitions and interior cladding of exterior walls*. Moscow, Promstroyizdat, 1955; 186. (rus.).
33. Ferronskaya A.V. *Durability of gypsum materials, products and structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984; 253. (rus.).
34. Segodnik D.N., Potapova E.N. Gypsum cement — pozzolanic binder with active mineral additives metakaolin. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2014; 28(8):(157):77-79. EDN STFXJF. (rus.).
35. Volzhenskiy A.V., Rogovoy M.I., Stambulko V.I. *Gypsum cement and gypsum slag products*. Moscow, Gosstroyizdat, 1960; 168. (rus.).
36. Bulychev G.G. *Mixed gypsum: production and application in construction*. Moscow, State Publishing House of Literature on Construction and Architecture, 1952; 135. (rus.).
37. Sagdatullin D.G., Morozova N.N., Khozin V.G., Vlasov V.V. High-strength gypsum cement-ceolite binder. *Construction Materials*. 2010; 2:53-55. EDN MBCHZR. (rus.).
38. Sagdatullin D.G., Morozova N.N., Khozin V.G., Ilichyova O.M. Deformations of high-strength composition of gypseous binding during maturing. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2010; 15(191):51-53. EDN MNJOMJ. (rus.).
39. Ferronskaya A.V. *Gypsum materials and products (production and application) : guide*. Moscow, ASV, 2004; 485. (rus.).
40. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Glagolev E.S., Shatalova S.V., Starikov M.S. Formation of properties of compositions for construction printing. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017; 10:6-14. DOI: 10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178. EDN ZOWEOF. (rus.).
41. Shorstova E.S., Klyuev A.V., Klyuev S.V., Garkina I.A. Thin-grounded quartzite sandstone crushing screening in fiber concrete mixture for 3D-printing. *Regional Architecture and Engineering*. 2023; 3(56):69-76. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_69. EDN MBGPPI. (rus.).
42. Slavcheva G.S., Ibryaeva A.I. Effect of concentration and filler's granulometry for rheological properties cement paste. Bulletin of the Tver State Technical University. Construction series. *Electrical engineering and chemical technologies*. 2019; 2(2):29-36. EDN SHMTRK. (rus.).
43. Torshin A.O., Borovikova S.O., Korchnov I.V., Potapova E.N. Development of construction mixture for 3D-printing. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2018; 32(2):(198):164-166. EDN VMNBEG. (rus.).
44. Potapova E., Guseva T., Shchelchikov K., Fischer H.B. Mortar for 3D printing based on gypsum binders. *Materials Science Forum*. 2021; 1037:26-31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26
45. Bazhenov Yu.M. *Modified high-quality concrete*. Moscow, ASV Publ., 2006; 368. EDN QNMNZZ. (rus.).
46. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R. Mechanically activated gypsum-cement-pozzolan binder based on modified low-grade raw materials. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 1(43):187-195. EDN XNGJFB. (rus.).
47. Mukhametrakhimov R.Kh., Lukmanova L.V. Influence of Portland cements with different mineralogical composition on basic properties of 3d-printed composites. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2021; 2(56):37-49. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_37. EDN DXDYSR. (rus.).
48. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Influence Of Cement-Sand Mortar Mobility On The Quality Of 3D Printed Hardened Composite. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021; 94:9404. DOI: 10.4123/CUBS.94.4

Received November 16, 2023.

Adopted in revised form on November 27, 2023.

Approved for publication on February 2, 2024.

B I O N O T E S : **Ravil Z. Rakhimov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor to the Rector's Office, Corresponding Member of the RAASN; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 612876, Scopus: 7005848197, ResearcherID: AAG-2224-2019, ORCID: 0000-0002-4251-1605rahimov11@bk.ru;

Rustem Kh. Mukhametrakhimov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production Technologies; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 616214, Scopus: 57194452261, ResearcherID: N-9429-2016, ORCID: 0000-0003-2062-5289; muhametrahimov@mail.ru;

Albert R. Galautdinov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production Technologies; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 836160, Scopus: 57194458273, ResearcherID: G-6938-2018, ORCID: 0000-0001-9999-6925; galautdinov89@mail.ru;

Liliya V. Ziganshina — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Department of Construction Production Technologies; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; Scopus: 57194444416, ResearcherID: AAG-9477-2020, ORCID: 0000-0003-0090-2410; lilya0503199@gmail.com.

Contribution of the authors:

Ravil Z. Rakhimov — scientific consulting, research concept, development of methodology, revision of the text, final conclusions.

Rustem Kh. Mukhametrakhimov — scientific leadership, research concept, development of methodology, carrying out laboratory tests, processing of test results, writing the source text, final conclusions.

Albert R. Galautdinov — carrying out laboratory tests, processing of test results, revision of the text, final conclusions.

Liliya V. Ziganshina — carrying out laboratory tests, processing of test results, revision of the text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.