

## Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при обеспечении адгезии бетона для 3D-печати

Оксана Александровна Ларсен, Илья Омарович Раббаа

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В технологии строительной 3D-печати при больших объемах бетонирования требуется обеспечение технологических перерывов и разделение объекта на захватки, при этом растворная смесь должна успевать обрести несущую способность материала в ходе наращивания высоты вертикальных элементов. Из-за особенности ведения работ с применением этой технологии строительства возникают проблемы образования «холодных» швов, связанные с обеспечением прочности сцепления граничащих слоев при одновременном обеспечении регулирования требуемых реологических и технологических показателей материалов для 3D-печати. Рассмотрены основные направления исследования модификаторов реологических свойств растворной смеси, применяемых на строительном рынке, а также способы повышения межслойной адгезии мелкозернистых бетонов для аддитивного строительного производства (АСП). Активные минеральные добавки используются для регулирования реологических свойств растворной смеси. Органические добавки могут повышать прочность сцепления и адгезию, но требуют совместимости с другими группами добавок. Для этого необходимо изучение влияния органической модифицирующей добавки и гидрофобизатора на адгезионную прочность с бетонным основанием.

**Материалы и методы.** Приготовление растворной смеси и водного раствора органической полифункциональной добавки проводилось по установленному режиму с учетом полного диспергирования модифицирующего компонента в воде при последующем изготовлении и хранении образцов испытаний в соответствии с методикой, регламентированной нормативными документами.

**Результаты.** Результаты испытания показывают снижение адгезии материала к бетону при добавлении модификатора вязкости при совместном использовании с гидрофобизатором, поскольку при взаимодействии на границе раздела растворной смеси с бетоном не обеспечивается протекание процессов образования физико-химической связи. Также при введении гидрофобного компонента в состав растворной смеси наблюдается пластифицирующее действие с увеличением проникающей способности во внутренние слои бетона, на что указывает изменение преимущественно когезионного характера разрушения образцов на адгезионный с появлением участков с видом отрыва по материалу основания.

**Выводы.** Обоснована и подтверждена важность обеспечения совместимости органического модификатора и гидрофобизатора для обеспечения адгезионной прочности материала в АСП. Актуальность темы дальнейшей работы заключается в установлении рационального соотношения гидрофобизатора и органической добавки для обеспечения высоких значений адгезионной прочности и проникающей способности растворной смеси.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительство, материалы для АСП, аддитивные технологии, органическая полифункциональная добавка, гидрофобизатор, прочность сцепления с основанием, композиционное гипсовое вяжущее, межслойная адгезия

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ларсен О.А., Раббаа И.О. Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при обеспечении адгезии бетона для 3D-печати // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 592–603. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.592-603

Автор, ответственный за переписку: Илья Омарович Раббаа, [ilya\\_rabbaa@mail.ru](mailto:ilya_rabbaa@mail.ru).

## Compatibility of viscosity modifiers and hydrophobic agents in ensuring concrete adhesion for 3D printing

Oksana A. Larsen, Ilya O. Rabbaa

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In 3D construction printing, where large volumes of concrete are involved, it is necessary to allow for construction breaks and to divide the structure into sections; at the same time, the concrete mix must have time to develop its load-bearing capacity as the vertical elements are built up. The peculiarity of conducting work using this construction technology results in problems of forming "cold" joints associated with ensuring the strength of the adhesion of adjacent layers while simultaneously regulating the required rheological and technological parameters of materials for 3D printing. Most studies

concern the operation of cement systems in comparison with gypsum systems due to the difficulties in regulating the setting time and water resistance of the stone. The main directions of research on viscosity modifier agents of mortar mixtures used in the construction market, as well as ways to increase the interlayer adhesion of fine-grained concretes for additive construction production, were considered. Active mineral additives are used to regulate the rheological properties of the mortar mixture. Organic additives can increase the strength of adhesion and adhesion, but require compatibility with other groups of additives. This requires studying the effect of an organic modifying additive and a hydrophobic agent on the adhesive strength with a concrete base.

**Materials and methods.** The preparation of the solution mixture and the aqueous solution of the organic polyfunctional additive was carried out according to the established mode, taking into account the complete dispersion of the modifying component in water during the subsequent production and storage of test specimens in accordance with the methodology regulated by regulatory documents.

**Results.** The test results indicate a decrease in the adhesion of the material to concrete when adding a viscosity modifier when used together with a hydrophobic agent, since the interaction at the interface of the mortar mixture with concrete does not ensure the formation of a physical and chemical bond. Also, when introducing a hydrophobic component into the composition of the mortar mixture, a plasticizing effect is observed with an increase in penetrating ability into the inner layers of concrete, which is indicated by changes in the predominantly cohesive nature of the destruction of specimens to adhesive with the appearance of areas with a type of tearing along the base material.

**Conclusions.** The relevance of ensuring the compatibility of an organic modifier and a hydrophobic agent to ensure the adhesive strength of the material in additive construction production is substantiated and confirmed. The relevance of the topic of further work lies in establishing a rational ratio of a hydrophobic agent and an organic additive to ensure high values of adhesive strength and penetrating ability of the mortar mixture.

**KEYWORDS:** construction, materials for AC, additive technologies, organic multifunctional additive, hydrophobic agent, adhesion strength to the base, composite gypsum binder, interlayer adhesion

**FOR CITATION:** Larsen O.A., Rabbaa I.O. Compatibility of viscosity modifiers and hydrophobic agents in ensuring concrete adhesion for 3D printing. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):592-603. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.592-603 (rus.).

*Corresponding author:* Ilya O. Rabbaa, [ilya\\_rabbaa@mail.ru](mailto:ilya_rabbaa@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Технология возведения строительных объектов с применением строительной трехмерной печати подразумевает наличие технологических перерывов в работе оборудования и разделение объекта на технологические захватки. По прошествии времени нанесенная растворная смесь успевает приобрести кристаллизационную структуру с набором прочности для обеспечения несущей способности материала [1, 2], на который начинают оказывать воздействие нарастающие слои укладки, после чего затвердевший цементный камень (ЦК) следует рассматривать в качестве основания под нанесение материала для аддитивного строительного производства (АСП), поскольку возникает риск появления холодных швов [3, 4].

Используемые на строительном рынке материалы для АСП отличают не решенные вопросы в обеспечении прочности сцепления затвердевшего цементного камня граничащих слоев в связи с технологическими принципами при экструдировании растворной смеси через сопло 3D-принтера, а также адгезии к поверхности нанесения, выражаемые бесшовным переходом при увеличении уровня возведения вертикальной конструкции, в результате чего требуется проведение мероприятий по обеспечению однородности характеристик сцепления материала строительного объекта для соответствия принципам монолитности. Озвученная проблема затрагивается в научных публикациях [5, 6], для ее решения предлагается регулировка рецептуры состава для строительной 3D-печати путем обеспечения сохраняемости технологических показателей во времени при одновременном придании на-

несенному материалу несущей способности при использовании активных минеральных добавок (МД) в качестве модификаторов реологических свойств растворной смеси.

В большинстве исследовательских работ по изучению реологических и технологических показателей материалов для строительной 3D-печати рассматриваются смеси, приготовленные на цементном вяжущем, по сравнению с гипсовым и его композитными аналогами [7], поскольку подобный выбор сырья обусловлен простотой обеспечения сохраняемости технологических свойств растворной смеси в соответствии с установленным режимом и требуемой скоростью возведения, а также отсутствием возможности получения композиционного вяжущего с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками с применением вяжущего низкой марки. К наиболее значимым проблемам применения гипсового сырья при разработке рецептуры материала для АСП относится обеспечение легкости регулирования сроков схватывания и стойкости к воздействию воды гипсового камня, выражаемое коэффициентом его размягчения.

Влияние добавок для бетонов и строительных растворов, позволяющих регулировать реологические свойства и технологические показатели растворной смеси состава для строительной 3D-печати, рассматривалось во многих отечественных и зарубежных трудах. Изготовлена мелкозернистая бетонная смесь для 3D-печати с помощью гипсоцементно-пуццоланового вяжущего и проанализированы полученные технологические показатели при регулировании содержания МД и крупности заполни-

теля [8]. Эти результаты свидетельствуют об эффективности применения метакаолина и активированного метакаолина на основании достижения высоких показателей при минимальном содержании в составе затвердевшего камня. Однако следует выделить высокий расход исследуемых компонентов, составляющих пятую часть от массы вяжущего, что приводит к удорожанию мелкозернистого бетона на единицу площади.

Приводится решение вопроса образования «холодных» швов в теле напечатанного мелкозернистого бетона при длительных технологических перерывах с использованием переходного слоя в составе с полифункциональной добавкой, изучаются ее состав и влияние на прочность сцепления основного и переходного слоев при длительных технологических перерывах в работе оборудования [9]. Автором было установлено влияние устройства переходного слоя на мелкозернистой бетонной смеси на снижение прочности сцепления слоев с увеличением времени технологического перерыва при использовании переходного слоя в технологии 3D-печати. Интенсивность снижения адгезионной прочности граничащих слоев при устройстве переходного слоя с увеличением продолжительности технологического перерыва и, как следствие, времени структурообразования и набора прочности цементным камнем в несколько раз меньше по сравнению с образцами, полученными без устройства переходного слоя. Подобное технологическое решение позволяет регулировать процесс экструзии материала в широком временном интервале с возможностью составления гибкого графика возведения объектов при сохранении высокого качества готовой продукции.

Проведен исследовательский анализ по оценке реологических свойств широкого перечня добавок-модификаторов различного происхождения с целью модифицирования цементной системы с использованием кварцевого заполнителя и изучен процесс гидратации с нарастания структурной прочности при их применении методом сдавливающей реометрии и микроструктурного анализа [10]. Данные результаты отражают наибольшую сочетаемость цементной системы на кварцевом песке при совместном применении метакаолина и модифицированной наноразмерной добавки комплексного назначения для обеспечения удовлетворительных показателей структурной прочности дисперсной системы, выраженной формоустойчивостью, при обеспечении ее пластичности и оптимальной скорости структурообразования ЦК при высоких показателях прочности на сжатие в проектном возрасте.

Рассмотрено использование органических добавок для модификации реологических свойств цементного теста в технологии сухих строительных смесей путем изучения технологических показателей и процесса гидратации составов с применением эфира целлюлозы и эфира крахмала, а также

их взаимного сочетания при регулировании соотношения добавок в составе цементной системы [11]. Общие результаты тестирования указывают на то, что эфир целлюлозы обладает наибольшим воздействием на увеличение связности растворной смеси, объема вовлеченного воздуха и водоудерживающей способности по сравнению с эфиром крахмала. Однако составы с преобладающим количеством эфира крахмала влияли на процесс гидратации и структурообразования ЦК в большей степени при заметном увеличении сроков схватывания и затвердевания по сравнению с эфиром целлюлозы. Оказываемый эффект полимерных добавок на свойства цементного теста усиливался с ростом содержания используемого органического модификатора в составе растворной смеси.

Изучено влияние органических модификаторов на основе стиролакриловой дисперсии, этиленвинилацетата, сополимера винилацетата и акрила и других добавок, представленных в порошкообразном и эмульсионном виде, содержащихся в цементных растворах для обмазочной гидроизоляции на водонепроницаемость и прочность сцепления с бетонным основанием [12]. В процессе анализа микроструктуры затвердевшего материала, показателей адгезионной прочности и количества поглощенной воды определено, что величина этих показателей во многом зависит от способности добавок к диспергированию в объеме свежего раствора, исходя из чего увеличение содержания труднорастворимого компонента приводит к замедлению его распределения в системе до момента набора прочности, что вызывает рост внутренних дефектов ЦК, при этом в ходе изменения содержания вяжущего в составе смеси не было установлено значительного влияния на величину технологических показателей строительного раствора. Наибольшую эффективность по увеличению водонепроницаемости строительного раствора показал модификатор на основе этиленвинилацетата, так как он подвергается быстрому диспергированию в растворной смеси, образуя однородное тесто с равномерно распределенными гидратами и более мелкими заполнителями с компактной упаковкой частиц заполнителя в затвердевшем растворе. В ходе сравнения модифицирующих добавок, вводимых в цементно-песчаное тесто в порошкообразном или жидком виде, не выявлено значительного влияния на изменение показателей адгезионной прочности и однородности системы ЦК, вследствие чего порошкообразные добавки-модификаторы, представленные в исследовательской работе, имеют достаточную скорость диспергирования для их конкурентоспособности с эмульсионными аналогами.

При обобщении основных направлений исследования повышения адгезионной прочности мелкозернистого бетона для АСП на границе затвердевшего и свеженаносимого слоя при изуче-

нии влияния органического модификатора вязкости и гидрофобизатора в порошкообразном виде следует руководствоваться порядком их введения в состав растворной смеси, режимом ее приготовления для обеспечения однородного распределения компонентов, химическим взаимодействием органических компонентов с дисперсной системой и между собой, а также их оптимальным расходом для обеспечения заданных реологических свойств и технологических показателей.

Поэтому для получения требуемых показателей материалов на многокомпонентном гипсовом вяжущем для аддитивных строительных технологий предлагается использование активных минеральных добавок, участвующих в регулировании реологических и технологических свойств растворной смеси и обеспечивающих гидравлическую активность применяемого вяжущего [13]. В некоторых научных трудах авторов, посвященных изучению реологических свойств растворной смеси с применением МД, показано, что их эффективность действия в качестве модификаторов вязкости системы возможна при значительных расходах по массе вяжущего [14–16]. По этой причине в качестве эффективных добавок, модифицирующих реологические свойства растворной смеси, используют материалы органического происхождения, которые также могут повышать прочность сцепления граничащих слоев материала и к основанию нанесения, однако при этом необходимо руководствоваться их совместимостью с другими применяемыми добавками в составе смеси, поскольку при препятствии действию одного из компонентов механизму работы другого снижается эффективность работы состава, затрудняя при этом подбор рецептуры [17–19].

Цель исследования — изучение влияния органической модифицирующей добавки полифункционального назначения на адгезионную прочность с бетонным основанием. Кроме того, важно учитывать его совместимость с гидрофобизаторами при подборе оптимального соотношения в составе на композиционном гипсовом вяжущем для повышения водостойкости затвердевшего камня, поскольку несоблюдение этого условия может вызвать уменьшение эффекта отталкивания и привести к увеличению водопоглощения материала, а также снижению адгезионной прочности материала за счет нейтрализации действия макромолекул модификатора по образованию полимерной связи с основанием нанесения и других эксплуатационных характеристик [20, 21].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного сырья, удовлетворяющего требованию нормативного документа на материалы для АСП, использованы следующие компоненты:

1) гипсовое вяжущее высокопрочное марки Г-16 Б II ЗАО «Самарский гипсовый комбинат» в соответствии с ГОСТ 125–2018;

2) гипсовое вяжущее строительное марки Г-5 Б II ЗАО «Самарский гипсовый комбинат» в соответствии с ГОСТ 125–2018;

3) портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Белгородский цемент» в соответствии с ГОСТ 31108–2020;

4) зола-уноса ООО «ЭКО-Золопродукт» в соответствии с ТУ 5712-003-84800065–2010;

5) мелкий пористый заполнитель, полученный из отсева дробления некондиционной фракции пеностеклянного щебня фракции с размером зерен 0,63–0,16 мм;

6) порошкообразный суперпластификатор Sika ViscoCrete-226 P на основе эфиров поликарбонатов;

7) гидрофобизирующая добавка: порошок олеат натрия с содержанием вещества не менее 95 %;

8) органическая полифункциональная добавка, выполняющая функцию модификатора вязкости с внутренним шифром VM-XG;

9) водопроводная вода питьевая в соответствии с ГОСТ 23732–2011.

Расходы компонентов для получения материала исследования были приняты на основании ранее разработанного состава, применяемого при изучении реологических свойств и технологических показателей растворной смеси с модифицирующим компонентом. Количество гидрофобизатора для приготовления материала исследования было принято 0,3 % от массы сухой смеси.

Затворение сухой смеси осуществлялось с помощью 8%-ного водного раствора органической полифункциональной добавки. С целью обеспечения полного протекания процесса диспергирования модифицирующего компонента в объеме жидкой фазы проводилось периодическое перемешивание набухающего модификатора с помощью дрели с лопастной насадкой с частотой вращения не более 450 об/мин. Для устранения влияния непрогидратировавших частиц органической полифункциональной добавки на образование дефектов в затвердевшем гипсовом камне использование приготовленного геля в качестве затворителя сухой смеси при приготовлении раствора проводилось не ранее чем через 90 мин от начала приготовления раствора модификатора вязкости.

При приготовлении растворной смеси водотвердое отношение (В/Т) составляло 0,3, из которых 0,15 — вода затворения, оставшаяся часть — приготовленный 8%-ный раствор модификатора вязкости. Для приготовления растворной смеси в течение первых 60 с осуществлялось перемешивание сухой смеси с водой затворения. Далее смеситель останавливался и на протяжении последующих 15 с в чашу с затворенной смесью добавлялся приготовленный раствор модификатора, после чего производился запуск смесителя для перемешивания в течение минуты. По прошествии 120 с от общего времени смеситель останавливался на 90 с для снятия налипшей растворной смеси на лопасть и смесительную чашу.

По истечении времени осуществлялся третий запуск смесителя для финального перемешивания в течение 60 с. Общее время приготовления растворной смеси обоих составов составляло не более 3 мин.

С целью определения подвижности растворной смеси применялись метод расплыва кольца и расплыва конуса согласно ГОСТ Р 58277–2018, использовались металлическое кольцо диаметром 70 мм и усеченный конус с диаметром основания 100 мм совместно со встряхивающим столиком соответственно. Растворная смесь заполнялась в два приема с штыкованием каждого слоя при помощи шпателя с шириной лезвия 10 мм. Расплыв конуса проводился после 15 ударов на встряхивающем столике через 30 с. Диаметр расплыва растворной смеси, оцениваемый с помощью кольца, определялся через 60 с от момента его снятия.

Прочность сцепления раствора с бетонным основанием устанавливалась по методике ГОСТ Р 58276–2018. Приготовленная растворная смесь наносилась на поверхность бетонной плиты-основания шпателем с шириной лезвия 10 мм в один прием с прижатием смеси и выравниванием лицевой поверхности образцов стальной линейкой. Для изготовления образцов длиной ребра 50 мм использовался силиконовый аппликатор, обеспечивающий толщину нанесения слоя растворной смеси 5 мм. Снятие аппликатора с плиты основания осуществлялось при сохранении свойств растворной смеси, при этом предварительно проводилось подрезание внешней грани вдоль отверстий аппликатора с помощью лезвия для предотвращения возможности нарушения целостности изготовленных образцов.

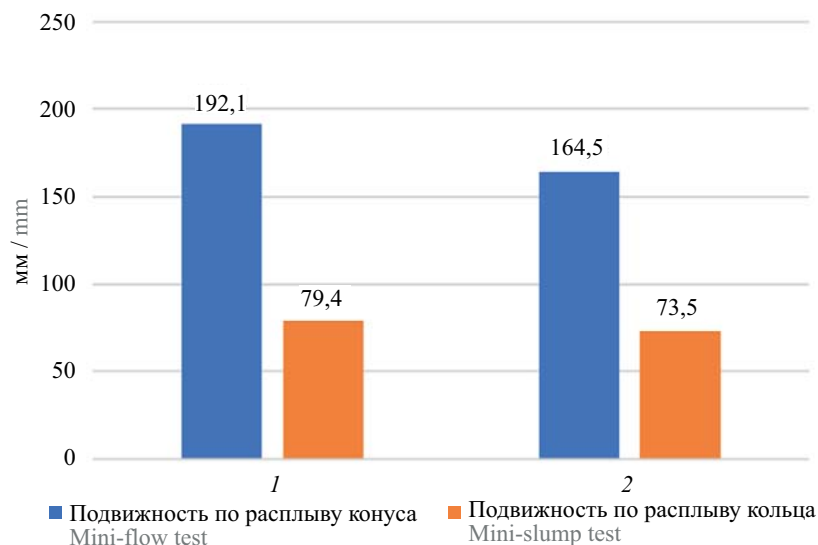
Плита-основание с образцами испытания хранилась в течение 7 сут в помещении, обеспечивающем поддержание температуры и относительной влажности воздуха  $t = (22 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\phi = (52 \pm 10) \%$  соответственно. По прошествии времени хранения плиты к затвердевшим образцам приклеивались стальные штампы квадратного сечения с размером граней 50 мм

двухкомпонентным клеем на основе эпоксидной смолы. Перед наклеиванием штампов проводилось выравнивание поверхности материала испытания путем затирки образцов с помощью шлифовальной бумаги с последующим обеспыливанием поверхности. Испытание на адгезионный отрыв образцов от бетонной плиты осуществлялось через 24 ч после приклеивания штампов с применением портативной испытательной машины для измерения усилия отрыва (адгезии) с использованием гидравлического силового цилиндра с максимальным измеряемым усилием отрыва 9 кН при скорости нарастания нагрузки  $250 \pm 50 \text{ Н/с}$ .

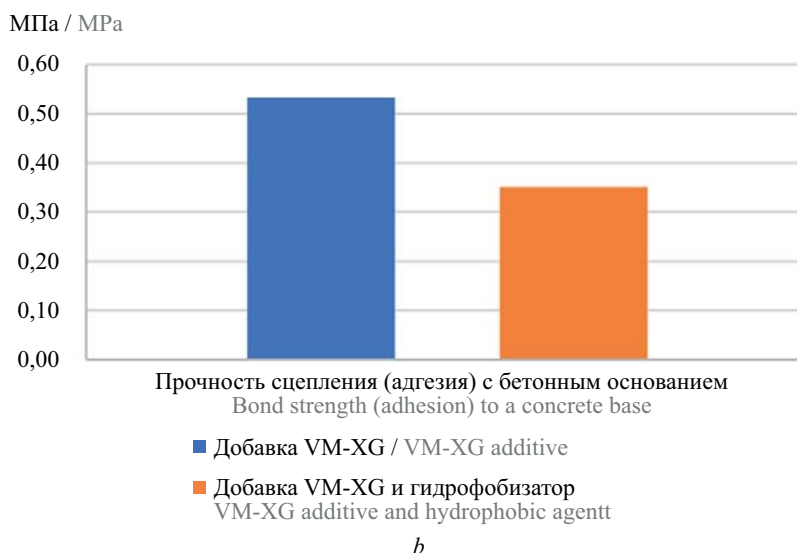
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате исследования технологических показателей мелкозернистого бетона для АСП с применением органической полифункциональной добавки установлено ее влияние на подвижность растворной смеси и ее прочность сцепления с бетонным основанием при совместном использовании с гидрофобизирующей добавкой.

Полученные результаты оценки показателей подвижности разных методов свидетельствуют об увеличении связности структуры растворной смеси при наличии натриевых солей, на что указывает снижение подвижности по расплыву конуса на 14,4 % и расплыву кольца на 7,4 %. При предварительном добавлении гидрофобного компонента в состав сухой смеси при затворении происходит адсорбирование молекул на частицах с образованием боковых звеньев, обеспечивающих их стерическое отталкивание, вследствие чего подвижность растворной смеси увеличивается. При этом с повышением содержания добавки также возрастает и число звеньев. В итоге система становится более структурированной с связной, а ее удобоукладываемость начинает снижаться, что подтверждается полученными результатами определения подвижности (рис. 1, а).



а



**Рис. 1.** Влияние органической полифункциональной добавки и гидрофобизатора: *a* — на подвижность растворной смеси для 3D-печати; *b* — на адгезию материала для 3D-печати

**Fig. 1.** The effect of an organic multifunctional additive and a hydrophobic agent: *a* — on the mobility of a mortar for 3D printing; *b* — on the adhesion of the material for 3D-printing

Полученные значения прочности сцепления серии образцов свидетельствуют о снижении адгезии материала к бетонному основанию с 0,53 до 0,35 МПа при добавлении гидрофобизирующей добавки совместно с модификатором в состав сухой смеси (рис. 1, *b*). Подобное проявление подтверждается механизмом действия гидрофобных компонентов, механизм действия которых заключается в протекании химических процессов на границе раздела поверхности затвердевающего раствора и основания, а также внутри микродефектов бетона с образованием пленок олеата кальция, образующихся в ходе ионообменной реакции и препятствующих дальнейшему капиллярному подосу воды из растворной смеси, который необходим для образования физико-химической связи с бетоном [22, 23].

При визуальной оценке характера отрыва (рис. 2) было установлено, что образцы состава затвердевшего камня в процессе применения органической полифункциональной добавки обеспечивают 55,2 % когезионного разрушения и 44,8 % адгезионного разрушения в серии образцов испытания. В то же время серия образцов, изготовленных при совместном применении модифицирующего компонента и гидрофобизатора, обладает долей поверхности испытанного раствора с разрушением материала основания 25,3 %.

При использовании органического модификатора вязкости в растворе обеспечивается получение однородной структуры раствора без ослабления адсорбционных сил к поверхности бетона. В результате получения однородного по структуре затвердевшего камня и удовлетворительного физико-химического взаимодействия на границах материала, превышающего адгезионную прочность частиц системы ввиду

особенностей применяемого вяжущего, обеспечивается разрушение по растворной смеси (рис. 3).

При введении гидрофобного компонента можно наблюдать ослабление физико-химических связей частиц мелкозернистого бетона на участке раздела двух материалов, результатом которого служит преобладание прочной связи внутри затвердевшего материала со слабой адгезией к бетону (рис. 4).

Продemonстрированное изменение характера отрыва от бетонной поверхности при содержании гидрофобизатора в растворной смеси может быть объяснено тем, что с повышением содержания натриевых солей в составе дисперсной системы при их адсорбировании на частицах вяжущего происходит их стерическое отталкивание с увеличением пластифицирующего действия и проникающей способности растворной смеси с заполнением микродефектов и капиллярных пор бетонного основания [24]. Также предварительное обеспыливание поверхности бетонного основания путем увлажнения плиты при очистке от пылевидных частиц привело к ухудшению образования химических связей на границе раздела основания и частиц раствора с адсорбированными гидрофобными молекулами, в результате чего возникает десорбция.

На основании изложенных вариантов причин снижения прочности сцепления растворной смеси с бетонным основанием при использовании гидрофобного компонента следует, что адгезия материала к плите обеспечивается за счет физико-механического взаимодействия, обусловленного развитостью поверхности основания и дефектами его микроструктуры, не оказывая при этом увеличения технологических показателей растворной смеси при ее структурировании.



*a*



*b*



*c*

**Рис. 2.** Внешний вид образцов для определения прочности сцепления (адгезии) материала для АСП с бетонным основанием: *a* — перед приклеиванием штампов; *b* — после отрыва серии образцов с органической модифицирующей добавкой; *c* — после отрыва серии образцов с органической модифицирующей добавкой и гидрофобизатором

**Fig. 2.** Appearance of specimens for determining the adhesion strength of the AC material to the concrete base: *a* — before bonding the stamps; *b* — after peeling off a series of specimens with an organic modifying additive; *c* — after peeling off a series of specimens with an organic modifying additive and a hydrophobic agent



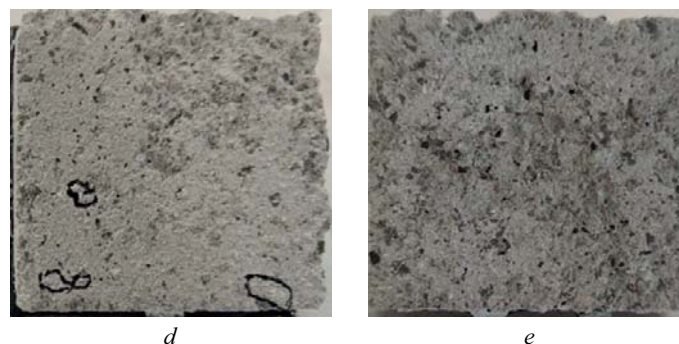
*a*



*b*

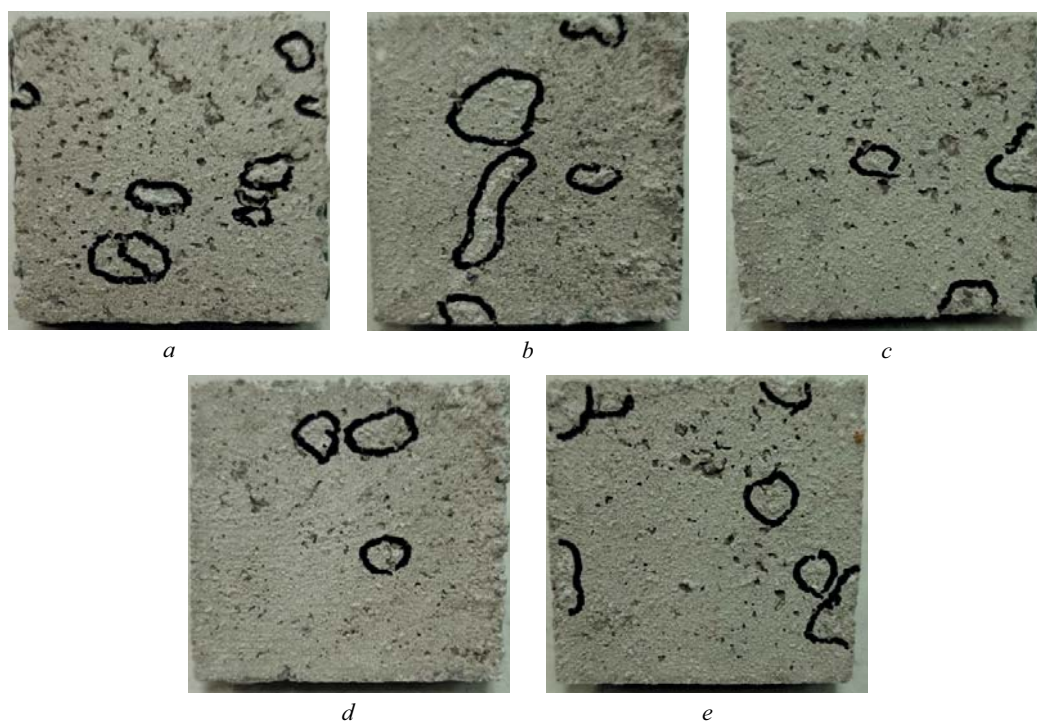


*c*



**Рис. 3.** Визуальная оценка характера отрыва серии образцов состава с органической полифункциональной добавкой от бетонного основания при определении адгезии мелкозернистого бетона для аддитивного строительного производства с бетонным основанием

**Fig. 3.** Visual assessment of the nature of separation of a series of specimens of a composition with an organic multifunctional additive from a concrete base when determining the adhesion of fine-grained concrete for additive construction with a concrete base



**Рис. 4.** Визуальная оценка характера отрыва серии образцов состава с органической полифункциональной добавкой и гидрофобизатором от бетонного основания при определении адгезии мелкозернистого бетона для аддитивного строительного производства с бетонным основанием

**Fig. 4.** Visual assessment of the nature of separation of a series of specimens of a composition with an organic multifunctional additive and a hydrophobic agent from a concrete base when determining the adhesion of fine-grained concrete for additive construction to a concrete base

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе анализа влияния совместного применения органического модификатора вязкости и гидрофобизатора на прочность сцепления затвердевшего раствора с бетонным основанием по полученным результатам были сделаны следующие выводы:

1. Обоснована возможность совместного использования органического модификатора реологических

свойств и гидрофобизатора для обеспечения адгезионной прочности растворной смеси для 3D-печати на композиционном гипсовом вяжущем с оптимальным соотношением компонентов для обеспечения межслойной адгезии.

2. Установлено влияние совместной работы гидрофобизирующей добавки и органического модификатора вязкости на технологические свойства растворной смеси. При введении натриевых солей в состав

мелкозернистой бетонной смеси с применением органической полифункциональной добавки происходит увеличение связности системы при снижении подвижности по расплыву конуса при встряхивании, а также повышение структурной прочности системы на основании результатов подвижности по расплыву кольца при свободном оседании.

3. Определено, что введение гидрофобизатора совместно с модифицирующей добавкой способствует снижению адгезионной прочности к бетону. Применение объемной гидрофобизации приводит к снижению прочности сцепления на 34,2 %. Изучение характера отрыва затвердевшего раствора к бетонному основанию свидетельствует об увеличении проникающей способности растворной смеси, что объ-

ясняется положительным влиянием гидрофобизатора на улучшение консистенции растворной смеси, обеспечение ее связности с системой.

В ходе будущих исследовательских работ, посвященных изучению сочетаемости органического модификатора вязкости с гидрофобными добавками, необходимо подобрать минимальное содержание солей натрия в растворной смеси, не препятствующих образованию физико-химических связей с затвердевшим основанием при обеспечении водостойкости композитного камня и связности растворной смеси. Также требуется проведение анализа микроструктуры мелкозернистого бетона на границе сцепления с основанием нанесения и в его теле в присутствии гидрофобизатора при затвердении смеси.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Иноземцев А.С.* Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 216–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245. EDN PYHOAX.

2. *Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F.* 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2015. Vol. 6. Issue 4. Pp. 14–22.

3. *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. EDN YEXMXZ.

4. *Гончарова Ю.Ю., Дроботов А.В., Торубаров И.С., Волохов М.А.* Исследование адгезионных свойств поверхностей для 3D-печати // Сифра. Машиностроение. 2024. № 2 (3). DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.3. EDN VQTFWM.

5. *Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю.* Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17). С. 174–180. EDN WHAIQB.

6. *Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Füssel U.* 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behaviour // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 179. Pp. 125–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

7. *Potapova E., Guseva T., Shchelchikov 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. EDN HWAQRJ.

8. *Рахимов Р.З., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганишина Л.В.* Гипсоцементно-пуц-

цолановые бетоны для аддитивного строительного производства // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 4. С. 580–595. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.580-595. EDN DZSMZH.

9. *Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганишина Л.В.* Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1 (67). С. 127–134. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13. EDN ULXEQB.

10. *Славчева Г.С., Артамонова О.В., Бабенко Д.С., Шведова М.А.* Исследование влияния модифицирующих добавок на структурообразование и твердение цементных композитов для 3D-печати // Конденсированные среды и межфазные границы. 2023. Т. 25. № 1. С. 112–124. DOI: 10.17308/kcmf.2023.25/10979. EDN XDOJLP.

11. *Spychal E., Stepień P.* Effect of Cellulose Ether and Starch Ether on Hydration of Cement Processes and Fresh-State Properties of Cement Mortars // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 24. P. 8764. DOI: 10.3390/ma1524-8764. EDN LNHVQQ.

12. *Brachaczek W., Chleboś A., Giergiczny Z.* Influence of Polymer Modifiers on Selected Properties and Microstructure of Cement Waterproofing Mortars // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 24. DOI: 10.3390/ma14-247558. EDN SEAEXN.

13. *Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Слепухин А.С., Крушельницкая Е.А., Толстой А.Д.* Влияние модифицирующей добавки с гидрофобизирующим эффектом на повышение эксплуатационных характеристик вибропрессованных изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 8–13. DOI: 10.34031/article\_5da44154d5e735.90950690. EDN SHYITR.

14. Сураев В.А. Гидрофобизация. Теория и практика // Технологии строительства. 2002. № 1 (17). С. 120–121.
15. Славчева Г.С., Артамонова О.В. Управление реологическим поведением смесей для строительной 3D-печати: экспериментальная оценка возможностей арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т. 11. № 3. С. 325–334. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334. EDN NNOLZG.
16. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 59–65. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6\_9. EDN NGGKBO.
17. Славчева Г.С., Шведова М.А., Бабенко Д.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 34–40. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. EDN YROONV.
18. Славчева Г.С., Артамонова О.В., Котова К.С., Шведова М.А., Юров П.Ю. Исследования факторов регулирования прочности адгезионного соединения «цементная матрица – армирующее волокно» в композитах для строительной 3D-печати // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 2. С. 124–133. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-124-133. EDN BMRGWY.
19. Wang Ya., Qiu L.Ch., Chen S.G., Liu Yi. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 411. P. 134403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134403. EDN XGYFDI.
20. Строганов В.Ф., Амельченко М.О., Мухаметрахимов Р.Х., Вдовин Е.А., Табаева Р.К. Повышение уровня адгезии стирол-акриловых покрытий, модифицированных наполнителем — шунгитом при защите строительных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 9. С. 29–32. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-9-29-32. EDN SZNZHL.
21. Tao Y., Yuan Y., Vantighem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings // ACI Materials Journal. 2021. Vol. 118. Issue 6. DOI: 10.14359/51733105
22. Yu M., Li P., Feng Y., Li Q., Sun W., Quan M. et al. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics // Applied Surface Science. 2018. Vol. 450. Pp. 492–501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.204
23. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes // Petroleum Chemistry. 2018. Vol. 58. Issue 4. Pp. 279–288. DOI: 10.1134/S0965544118040035. EDN SFRMPY.
24. Weger D., Baier D., Straßer A., Protting S., Kränkel T., Bachmann A. et al. Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing — A First Feasibility Study // RILEM Bookseries. 2020. Pp. 978–987. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7\_95

Поступила в редакцию 15 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 21 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 16 февраля 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Оксана Александровна Ларсен — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 803516, Scopus: 57194441930, ResearcherID: S-7860-2017, ORCID: 0000-0002-9612-7190; LarsenOA@mgsu.ru;

Илья Омарович Раббаа — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2276-8348, ORCID: 0009-0004-8493-9564; ilya\_rabbaa@mail.

Вклад авторов:

Ларсен О.А. — научное руководство, концепция исследования, научное консультирование, доработка текста, итоговые выводы.

Раббаа И.О. — концепция исследования, сбор материала, изготовление образцов, проведение испытаний, обработка результатов, написание исходного текста, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Inozemtcev A.S. Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):216-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245. EDN PYHOAX. (rus.)
2. Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine

and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015; 6(4):14-22.

3. 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. EDN YEXMXZ.

4. Goncharova J.Y., Drobotov A.V., Torubarov I.S., Volokhov M.A. A study of adhesion properties of surfaces for 3D-printing. *Cifra. Engineering*. 2024; 2(3). DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.3. EDN VQTFWM. (rus.).

5. Tolstoi A.D., Lesovik V.S., Novikov K.Iu. High endurance concretes on composite bindings with the use of man-made raw materials. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2016; 2(17):174-180. EDN WHAIQB. (rus.).

6. Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Füssel U. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behaviour. *Construction and Building Materials*. 2018; 179:125-137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

7. 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. EDN HWAQRJ.

8. Rakhimov R.Z., Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Gypsum-cement-puzzolanic concrete for additive construction production. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(4):580-595. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.580-595. EDN DZSMZH. (rus.).

9. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 1(67):127-134. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13. EDN ULXEQB. (rus.).

10. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Babenko D.S., Shvedova M.A. Studying the effect of modifying additives on the hydration and hardening of cement composites for 3D printing. *Condensed Matter and Interphases*. 2023; 25(1):112-124. DOI: 10.17308/kcmf.2023.25/10979. EDN XDOJLP. (rus.).

11. Spychał E., Stępień P. Effect of Cellulose Ether and Starch Ether on Hydration of Cement Processes and Fresh-State Properties of Cement Mortars. *Materials*. 2022; 15(24):8764. DOI: 10.3390/ma15248764. EDN LNHVQQ.

12. Brachaczek W., Chleboś A., Giergiczyński Z. Influence of Polymer Modifiers on Selected Properties and Microstructure of Cement Waterproofing Mortars. *Materials*. 2021; 14(24). DOI: 10.3390/ma14247558. EDN SEAEXN.

13. Suleymanova L., Malyukova M., Slepuhin A., Krushel'nickaya E., Tolstoy A. Influence of modifying

agent with hydrophobization effect on increase of operational characteristics of vibropressed products. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019; 9:8-13. DOI: 10.34031/article\_5da44154d5e735.90950690. EDN SHYITR. (rus.).

14. Suraev V.A. Hydrophobization. Theory and practice. *Technology of Building Construction*. 2002; 1(17):120-121. (rus.).

15. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. The control of rheological behaviour for 3D-printable building mixtures: experimental evaluation of “nano” tools prospects. *Nanotechnologies in Construction*. 2019; 11(3):325-334. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334. EDN NNOLZG. (rus.).

16. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 95:59-65. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6\_9. EDN NGGKBO.

17. Slavcheva G.S., Shvedova M.A., Babenko D.S. Analysis and criteria assessment of rheological behavior of mixes for construction 3D printing. *Construction Materials*. 2018; 12:34-40. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. EDN YROONV. (rus.).

18. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Kotova K.S., Shvedova M.A., Yurov P.Yu. Study of the strength regulation factors for the adhesive bonding “cement matrix – reinforcing fiber” in composites for 3D-build printing. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(2):124-133. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-124-133. EDN BMRGWY. (rus.).

19. Wang Ya., Qiu L.Ch., Chen S.G., Liu Yi. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion. *Construction and Building Materials*. 2024; 411:134403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134403. EDN XGYFDI.

20. Stroganov V.F., Amelchenko M.O., Mukhametrakhimov R.Kh., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Increase in adhesion degree of sterol-acrylic coatings, modified with schungite-filler, for protection of building materials. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2021; 9:29-32. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-9-29-32. EDN SZNZHL. (rus.).

21. Tao Y., Yuan Y., Vantghem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings. *ACI Materials Journal*. 2021; 118(6). DOI: 10.14359/51733105

22. Yu M., Li P., Feng Y., Li Q., Sun W., Quan M. et al. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics. *Applied Surface Science*. 2018; 450:492-501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.204

23. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes. *Petroleum Chemistry*. 2018; 58(4):279-288. DOI: 10.1134/s0965544118040035. EDN SFRMPY.

24. Weger D., Baier D., Straßer A., Prottung S., Kränkel T., Bachmann A. et al. Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing — A First Feasibility Study. *RILEM Bookseries*. 2020; 978-987. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7\_95

*Received October 15, 2025.*

*Adopted in revised form on October 21, 2025.*

*Approved for publication on February 16, 2026.*

**B I O N O T E S:** **Oksana A. Larsen** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 803516, Scopus: 57194441930, ResearcherID: S-7860-2017, ORCID: 0000-0002-9612-7190; LarsenOA@mgsu.ru;

**Ilya O. Rabbaa** — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2276-8348, ORCID: 0009-0004-8493-9564; ilya\_rabbaa@mail.

*Contribution of the authors:*

*Oksana A. Larsen — scientific supervision, study concept, scientific consulting, text revision, final conclusions.*

*Ilya O. Rabbaa — study concept, material collection, sample preparation, testing, results processing, writing the original text, drawing up the conclusion.*

*The authors declare that they have no conflict of interest.*