



## Материалы на основе модифицированного гипса для фасадных систем

А.Д. Жуков<sup>1,2,3</sup> , И.В. Бессонов<sup>1</sup> , Е.Ю. Боброва<sup>3\*</sup> , Э.А. Горбунова<sup>1,2</sup> , Б.А. Демисси<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

\*Контакты: e-mail: mla-gasis@mail.ru

**РЕЗЮМЕ: Введение.** Применение гипса в строительных системах, подвергаемых атмосферным воздействиям, предполагает введение модифицирующих добавок различного типа: полимерных композиций, минеральных тонко- и нанодисперсных компонентов, которые могут быть также продуктами других производств. **Методы и материалы.** С целью повышения атмосферостойкости гипсового камня, его прочностных характеристик и водостойкости в исследованиях рассматривался комплексный способ модификации гипсового вяжущего путем введения водных растворов поликонденсационных смол, отверждающихся в материале и нанокomпонентов. Эксперимент по оценке влияния состава комплексно модифицированного гипса на его свойства проводился на основе матрицы полного квадратичного трехфакторного эксперимента. **Результаты.** Прочность комплексно модифицированного гипсового камня при сжатии и при изгибе за 80 суток хранения на воздухе возрастает соответственно на 30% и 25%. Прочность при сжатии составляет 60 МПа, при изгибе – 12 МПа. Образцы выдерживают 150 циклов попеременного замораживания и оттаивания. **Обсуждение.** Введение в состав гипсовой смеси полимерных добавок ведет к тому, что гипс при гидратации создает каркас из кристаллических сростков дугидрата, а смола, отверждаясь, образует непрерывную полимерную матрицу. Полимергипс обладает свойством увеличивать прочность во времени за счет продолжающейся полимеризации смолы. **Заключение.** Получен атмосферостойкий гипсосодержащий материал. Использование техногенных отходов позволяет решать задачу их утилизации, что определяет снижение отрицательной нагрузки на окружающую среду. Осуществлена апробация методики оценки атмосферостойкости гипсового камня и, в первую очередь, морозостойкости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гипсовый камень, водорастворимые полимеры, техногенные добавки, нанотрубки, водостойкость, прочность.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Жуков А.Д., Бессонов И.В., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Демисси Б.А. Материалы на основе модифицированного гипса для фасадных систем // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 3. – С. 144–149. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-3-144-149.

### ВВЕДЕНИЕ

Использование гипсосодержащих материалов в фасадных системах ограничивается, в первую очередь, невысокой водостойкостью гипсового камня, при этом гипсовые материалы и изделия широко используют при отделочных работах внутри помещений. Для этой цели применяются гипсокартонные или гипсоволокнистые листы, изделия лепного декора, наливные полы, разнообразные сухие

штукатурные, шпаклевочные и клеевые гипсовые смеси, стеновые камни.

В связи с тенденцией расширения области применения изделий на основе гипсовых вяжущих не только при отделке внутри помещений, но и для фасадов строящихся и реконструируемых зданий сформировалось несколько направлений исследований. Во-первых, это изучение возможности использования различных минеральных добавок, а также применения техногенных гипсосодержащих

продуктов, формирующих повышенную стойкость гипсового камня к атмосферным воздействиям. Многие исследователи предлагают достигать повышения водостойкости гипсового камня за счет модификации вяжущего компонента пуццоланами, в частности, были разработаны гипсоцементнопуццолановые (ГЦПВ) и гипсошлакоцементнопуццолановые (ГШЦПВ); технологии композиционного (КГВ) и водостойкого гипсового вяжущего низкой водопотребности (ВГВНВ) [1–3]. Во-вторых, это разработка научных основ направленного формирования структуры и свойств ангидритовых гипсовых композиций и камня под действием микро-, ультра- и нанодисперсных систем. В-третьих, это исследования, направленные на поверхностную или объемную гидрофобизацию гипсового камня [4–6].

Круг техногенных гипсосодержащих материалов достаточно широк, но наибольший объем исследований проводился по фосфогипсу и его модификациям. Разработаны энергосберегающие технологии переработки фосфодигидрата и фосфополугидрата, а также способы его применения в стеновых конструкциях, лепных декоративных составах из гипса и отделочных составах искусственных мраморов на органических красителях [7, 8].

Изучалась также возможность применения различных минеральных техногенных добавок на свойства гипсового вяжущего [9, 10], возможность использования полых стеклянных микросфер для получения облегченного гипсового материала для реставрационных работ [11], а также возможность модифицирования ангидритовых и гипсовых композиций сверхмелкозернистыми техногенными добавками [12].

Углеродные нанотрубки и фуллерены перспективны как с точки зрения их использования в качестве центров кристаллизации, так и в качестве объектов, изменяющих направление и скорость физико-химических процессов в твердеющих материалах [13, 14]. Нанотрубки, используемые для модификации гипсового вяжущего, могут быть отходами других производств, в частности, может быть использована ультрадисперсная пыль доменных печей [15, 16].

Введенные в растворную смесь нанотрубки армируют гипсовый камень. С точки зрения здравого смысла, такой процент армирования кажется явно недостаточным, чтобы существенно повлиять на прочностные характеристики. Тем не менее, стойкий эффект присутствует, но возникает он не за счет непосредственного армирования, которое действительно ничтожно, а за счет направленного регулирования кристаллизационных процессов. Нанотрубки ведут себя в гипсовом растворе как «зародыши» кристаллов: разрастаясь, кристаллы переплетаются,

частично прорастают друг в друга и образуют пространственную сеть, пронизывающую и связывающую в единое целое весь гипсовый камень [17, 18].

Повысить водо- и атмосферостойкость гипсового камня можно за счет его объемной или поверхностной гидрофобизации. Поверхностная обработка гидрофобизаторами имеет свойство терять свою эффективность со временем, и для более продолжительного использования изделий ее необходимо периодически повторять. Периодичность обработки гидрофобизаторами зависит от условий эксплуатации изделий.

Объемную гидрофобизацию осуществляют введением различных полимеров в виде водных растворов или эмульсий, в том числе аминокальдегидных смол с мономерами нелинейного вида (меламин, резорцин, бензогуанимин). Смолы этого вида относятся к поликонденсационным, т.е. при отверждении происходит выделение низкомолекулярных продуктов, в частности, воды. Для химического связывания выделяющейся воды в состав композиции вводилась структурирующая добавка на основе полиизоцианатов [19–21].

С учетом имеющегося опыта в исследованиях рассматривается комплексный способ модификации гипсового вяжущего путем введения водных растворов поликонденсационных смол, отверждающихся в материале, и наноконфигуров. Отметим, что применение изделий на основе модифицированного гипсового вяжущего в фасадных системах непосредственно связано с разработкой методики оценки атмосферостойкости гипсового камня, и, в первую очередь, морозостойкости.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В эксперименте использовали гипсовое вяжущее марок Г7...Г10, меламиноформальдегидную смолу, углеродные кластеры (нанотрубки). Углеродные кластеры представляют собой полые трубки из одного или нескольких слоев атомов углерода. Они имеют диаметр от одного до нескольких нанометров и длину от нескольких диаметров до нескольких микрометров, они, по сути, являются полыми волокнами.

Оценка влияния состава комплексно модифицированного гипса на его свойства проведена на основе матрицы полного квадратичного трехфакторного эксперимента. Полученные уравнения регрессии проверяли по всем статистическим гипотезам и осуществляли проверку адекватности моделей по критерию Фишера.

В эксперименте в качестве варьируемых факторов приняты прочность гипсового вяжущего ( $X_1$ ), расход меламиноформальдегидной смолы ( $X_2$ ) и расход нанодобавки ( $X_3$ ). В качестве функции отклика принята

Таблица 1

## Интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Символ $X_i$	Среднее значение фактора, $\bar{X}_i$	Интервал варьирования, $\Delta X_i$	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Прочность гипса, МПа	$X_1$	6	1	5	7
Расход смолы, %	$X_2$	13	3	10	16
Расход нанодобавки, %	$X_3$	0,04	0,01	0,03	0,05

прочность гипсового камня через 7 суток твердения образцов ( $Y_1$ ), а в качестве параметра оптимизации – коэффициент размягчения образцов гипсового камня по результатам климатических испытаний ( $Y_2$ ). Условия эксперимента приведены в табл. 1.

Наряду с проведением испытаний морозостойкости на образцах-кубиках исследовались последствия циклических климатических воздействий на самих изделиях. Цикл испытаний заключается в том, что одна из сторон фрагмента была направлена в холодную зону камеры с температурой  $-18^\circ\text{C}$ , а вторая – в теплую зону с температурой  $+18^\circ\text{C}$ . В течение 2-х часов сторона, направленная в теплую зону, может подвергаться ультрафиолетовому облучению, следующие 2 часа орошается водой таким образом, чтобы при повороте замораживанию подвергалась увлажненная поверхность образца. Поворот обоймы, а следовательно, испытуемых фрагментов осуществляется через каждые 4 часа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Математическая обработка результатов эксперимента позволила получить уравнения регрессии для прочности при сжатии образцов гипсополимера ( $Y_1$ ) и его коэффициента размягчения ( $Y_2$ ). Значимость коэффициента проверялась по доверительным интервалам, соответственно доверительный интервал для прочности составил  $\Delta b_1 = 0,01$  МПа, а коэффициента размягчения  $\Delta b_2 = 0,04$ .

Получены следующие математические модели (полиномы):

- для прочности при сжатии

$$Y_1 = 64 + 14X_1 + 9X_2 + 8X_3 + 4X_1X_3 + 2X_2X_3$$

- для коэффициента размягчения:

$$Y_2 = 0,84 + 0,03X_1 + 0,09X_2 + 0,07X_3 + 0,04X_1X_3 - 0,05X_2^2$$

Полученные модели проверены на адекватности по критерию Фишера. Расчетные значения критериев Фишера равны для модели прочности при сжатии  $F_1 = 15,2$  и для модели коэффициента размягчения

$F_2 = 15,7$ . Табличные же значения критериев, соответственно, равны 19,2 и 19,3. Рассчитанные значения  $F$ -критерия не превышают табличного, и с соответствующей доверительной вероятностью (98%) модель можно считать адекватной. Этот факт будет учтен при аналитической оптимизации математических моделей.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ коэффициентов уравнения  $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$  показывает, что прочность композиционного модифицированного вяжущего увеличивается при повышении прочности камня без добавок (марки гипса), расходов смолы и наноконпонета на интервалах, принятых в эксперименте (положительные коэффициенты при  $X_1, X_2, X_3$ ).

Анализ коэффициентов уравнения  $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$  показывает, что наибольшее влияние на коэффициент размягчения оказывают увеличение расхода смолы и нанодобавки. При этом при больших расходах смолы рост прочности замедляется (коэффициент при  $X_2^2$ ), что может быть объяснено ограничением доступа к реакционным поверхностям.

Установлены значимые эффекты парных взаимодействий (по прочности и коэффициенту размягчения при  $X_1X_3$  и по прочности при  $X_2X_3$ ), что позволяет предположить наличие синергетических эффектов влияния расхода смолы и нанодобавки на прочность и коэффициент размягчения гипсового камня при его комплексной модификации.

Функция  $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$  (по своей сути являющаяся функцией нескольких переменных) по одной из этих переменных, по расходу смолы ( $X_2$ ), имеет локальный экстремум. Поэтому мы можем воспользоваться математическим аппаратом аналитической локальной оптимизации.

Аналитическая оптимизация основана на том, что функции для прочности и плотности  $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$  и  $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$  – математические, и к ним допустимо применение методов математического анализа при условии, что не будет нарушаться условие адекватности. В рассматриваемом случае принята следующая схема:

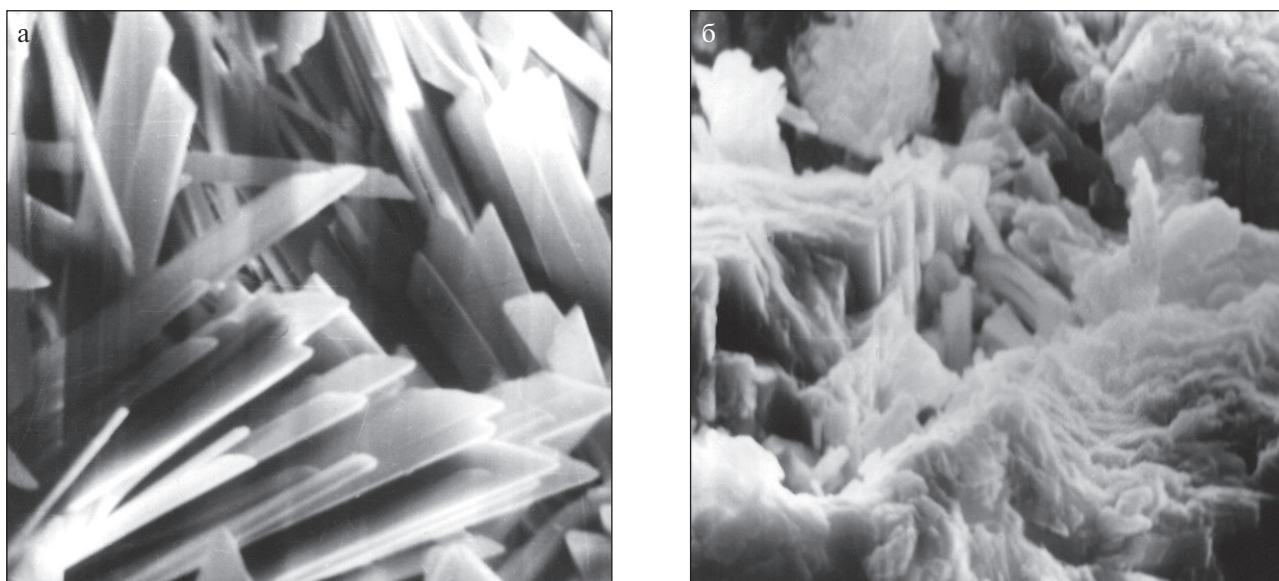


Рис. 1. Структура гипсового камня: а – без добавок; б – структура модифицированного гипсового камня

- алгебраический полином  $Y_2 = f_1(X_1, X_2, X_3)$  дифференцируют по  $X_2$  и приравнивают к нулю, определяя экстремум функции  $Y_2$  по  $X_2$ ;
- решают функции  $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$  и  $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$  при  $X_2 = \text{opt}$  и осуществляют локальную оптимизацию.

Аналитическая оптимизация включает следующую последовательность действий:

- 1) Определяем величину локального экстремума функции  $Y_1$  по  $X_2$ :

$$\partial Y_1 / \partial X_2 = 0,9 - 1,0X_2 = 0 \rightarrow X_2 = 0,09$$

- 2) Рассчитываем величину натурального значения расхода смолы (соответствующего возможному получению максимальной прочности при сжатии полигипса), используя формулу декодирования фактора:

$$\tilde{X}_2 = \bar{X}_2 + \Delta X_2 \cdot 0,9 = 13 + 3 \cdot 0,9 = 15,7\%$$

- 3) Рассчитываем математические модели (полиномы) для оптимизированного значения фактора  $X_2 = 0,9$ :

- для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 73 + 14X_1 + 8X_3 + 4X_1X_3$$

- для коэффициента размягчения:

$$Y_2 = 0,89 + 0,03X_1 + 0,07X_3 + 0,04X_1X_3$$

Введение в состав смеси полимерных добавок (поликонденсационных смол) ведет к тому, что гипс

при гидратации создает каркас из кристаллических сростков двуhydrата, а смола, отверждаясь, образует непрерывную полимерную матрицу. Поры в гипсовом теле заполняются стекловидной субстанцией. Проницаемость материала для жидкой влаги существенно понижается. Образующийся защитный экран из полимерной пленки вокруг кристаллов гипса препятствует доступу воды к обладающему высокой растворимостью сульфату кальция.

На фотографиях, сделанных при увеличении на растровом электронном микроскопе в 2400 раз (рис. 1), видно, что структура материала представляет собой сетку полимера, которая является непрерывной фазой, расположенной в трехмерном скелете закристаллизованного гипса. Сростки гидратных новообразований, пластинчатых по структуре, пронизывают блоки полимера. В порах идет кристаллизация мелких кристаллов гипса призматической и игольчатой формы.

При увеличении возраста образцов существенных изменений в характеристиках композита не происходит. Прирост прочности во времени можно объяснить продолжающейся полимеризацией смолы. Степень полимеризации смолы в присутствии отвердителя в естественных условиях практически та же, что и при термообработке.

Введение углеродных наносистем меняет структуру кристаллов гипса, а также фазовый состав в сторону увеличения содержания двуhydrата сульфата кальция. Морфология кристаллов из пластинчатой трансформируется в ромбовидную с более плотной упаковкой кристаллов, при этом отмечается уменьшение дефектности самих кристаллов. Использо-

ние модифицирующих добавок в виде углеродных наносистем при приготовлении фторангидридной композиции позволяет повысить физико-механические свойства изделий на её основе, улучшить теплофизические характеристики композиции за счет снижения её теплопроводности. Отмечено, что при введении углеродных наносистем в поризованные фторангидридные композиции достигается активация гидратации ангидрита, происходит повышение прочности композиций, улучшение однородности и стабильности пор [9].

Анизотропия и высокая механическая и термодинамическая устойчивость формы большинства фуллероидов определяют стабильность их свойств. Весьма значительные по сравнению с обычными органическими молекулами размеры определяют их способность превращаться во внешних полях в аномально большие диполи. Наведенный дипольный момент, например, нанотрубок может достигать несколько тысяч дебай. Логично рассматривать фуллероиды как потенциальный инструмент для модификации межфазных границ в самых различных конденсированных средах, причем при малых количествах наномодификаторов, что подтверждается на практике.

Прочность коплесно модифицированного гипсового камня при сжатии и при изгибе за 80 суток хранения на воздухе возрастает соответственно на 30% и 25%. Прочность при сжатии составляет

60 МПа, при изгибе – 12 МПа. Образцы выдерживают 150 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Паропроницаемость гипсополимера равна 0,092 мг/(м·ч·Па).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Расширение областей применения гипсосодержащих материалов обусловлено, с одной стороны, требованиями рынка строительной продукции, а с другой стороны, возможностями самого гипса, в настоящее время еще неполно реализованными в современных технологиях.

Существующий опыт свидетельствует о возможности применения гипсосодержащих систем на фасадах зданий, что делает необходимым повышение морозостойкости и влагостойкости гипсового камня до уровня, предъявляемого к материалам, используемым в контакте с окружающей средой. Существенную роль для реализации таких свойств выполняет комплексная модификация гипсового вяжущего как основы материала. Модифицирующее воздействие может реализовываться за счет применения водорастворимых полимеров, отверждающихся в теле гипсового камня, минеральных добавок микро- и наноуровня, наносистем фуллероидного типа. Особой интерес представляет возможность использования техногенных отходов для модификации гипсосодержащих систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурьянов А.Ф. Гипс, его исследование и применение от П.П. Будникова до наших дней // Строительные материалы. – 2005. – № 9. – С. 46–48.
2. Волженский А.В., Ферронская А.В. Гипсовые вяжущие и изделия. – М.: Стройиздат. – 1974. – 328 с.
3. Волженский А.В., Бузов Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат. – 1986. – 464 с.
4. Бессонов И.В. Гипс повышенной водостойкости / 3 науч.-практ. конф. «Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях» / Сб. докл. – М.: НИИСФ, 1998. – С.112–117.
5. Панченко А.И., Бурьянов А.Ф., Козлов Н.В., Соловьев В.Г., Пашкевич С.А. Комплексная оценка эффективности применения гипсового вяжущего повышенной водостойкости // Строительные материалы. – 2014. – № 12. – С. 72–74.
6. Meshheryakov Yu.G., Fedorov S.V. *Die baustoffproduktion mittels der dielectricischen*. Int.Congress Euro ECO. Hannover; 2010.
7. Meshheryakov Yu.G., Tairov T.N., Fedorov S.V. *Processing of complex production of anhydrite and gypsum binder into*. Congress trade fair Euro ECO. Hannover; 2011.
8. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Энергосберегающие технологии переработки фосфогипса и фосфополугидрата // Строительные материалы. – 2005. – № 12. – С. 56–57.
9. Bozhenov P.I., Meshheryakov Yu.G. *Influence of the admixtures and the technical characteristics son Gipsbinderu*. 6 Int. Building materials and Sieikattagung Weimaz. 1976.
10. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Kazantseva A., Gaynetdinova D. Binders Based on Natural Anhydrite and Modified by Finely-Dispersed Galvanic and Petrochemical Waste. *Procedia Engineering Modern Building Materials, Structures and Techniques*. 2013; 57: 1022–1028.
11. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Модифицированный облепченный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // Строительные материалы. – 2017. – № 10. – С. 45–51.
12. Yakovlev G., Polyanskikh I., Fedorova G., Gordina A., Buryanov A. Anhydrite and gypsum compositions modified with ultrafine man-made admixtures. *Procedia Engineering “7th Scientific Technical Conference Material Problems in Civil Engineering”*. 2018; Vol. 108: 13–21.

13. Писаренко Ж.В., Иванов Л.А., Ванг Ц. Нанотехнологии в строительстве: современное состояние и тенденции развития // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 223–231. – DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-4-223-231](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-4-223-231).
14. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 2010; 24: 2060–2071. Available from: doi: [10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014).
15. Yakovlev G., Khozin V., Polyanskikh I., Keriene J., Gordina A., Petrova T. Utilization of blast furnace flue dust while modifying gypsum binders with carbon nanostructures. In: The 9<sup>th</sup> International Conference “ENVIRONMENTAL ENGINEERING” 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania. 2014. P. 1–5.
16. Gordina A., Tokarev Y., Yakovlev G., Keriene J., Sychugov S., Sayed Mohamed Ali El. Evaluation of the Influence of Ultradisperse Dust and Carbon Nanostructures on the Structure and Properties of Gypsum Binders. *Procedia Engineering Modern Building Materials, Structures and Techniques*. 2013; 57: 334–342.
17. Яковлев Г.И., Первущин Г.Н., Крутиков В.А., Макарова И.С., Керене Я, Фишер Х.-Б., Бурьянов А.Ф. Газобетон на основе фторангидрита, модифицированный углеродными наноструктурами // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 70–72.
18. Izryadnova O., Yakovlev G., Nurieva L., Sychugov S., Pervuchin G. Role of polyfunctional admixture based on silica fume and carbon nanotubes in forming the structure of gypsum cement composition. *Procedia Engineering “7<sup>th</sup> Scientific Technical Conference Material Problems in Civil Engineering”*. 2015; 108: 380–386.
19. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: Стройиздат, 2008. – 768 с.
20. Пустовгар А.П., Бурьянов А.Ф., Василик П.Г. Особенности применения гиперпластификаторов в сухих строительных смесях / А.П. Пустовгар, А.Ф. Бурьянов // Строительные материалы. – 2010. – № 12. – С. 61–64.
21. Бессонов И.В. «Столица» – атмосферостойкая гипсовая облицовка зданий // Строительные материалы. – 1999. – № 9. – С. 12–14.
22. Zhukov A., Shokodko E., Bobrova E., Bessonov I., Dosanova G., Ushakov N. Interior Acoustic Materials and Systems. *EMMFT-2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 983: 740–747. Available from: doi: [10.1007/978-3-030-19868-8\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_72).
23. Zhukov A., Shokodko E. Mathematical Methods for Optimizing the Technologies of Building Materials. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 1116: 413–421. Springer, Cham. Available from: doi: [10.1007/978-3-030-37919-3\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_40).
24. Bessonov I., Zhukov A., Shokodko E., Chernov A. Optimization of the technology for the production of foam glass aggregate. *TPACEE 2019, E3S Web of Conferences*. 2020; 164: 14016. Published online: 05 May 2020. Available from: doi: [10.1051/e3s-conf/202016414016](https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202016414016).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Жуков Алексей Дмитриевич**, доцент, к.т.н., доцент кафедры Строительных материалов и материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), заместитель директора НОЦ комплексной модернизации инфраструктуры ЖКХ института ГАСИС Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), член-корреспондент Российской инженерной академии (РИА), г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0593-3259>, e-mail: [lj211@yandex.ru](mailto:lj211@yandex.ru)

**Бессонов Игорь Вячеславович**, к.т.н., главный научный сотрудник Научно-исследовательского института (НИИСФ РААСН), советник Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9234-4075>, e-mail: [bessonoviv@mail.ru](mailto:bessonoviv@mail.ru)

**Боброва Екатерина Юрьевна**, к.э.н., советник директора Института строительства и жилищно-коммунального хозяйства Государственной академии специалистов инвестиционной сферы Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6541-4552>, e-mail: [m1a-gasis@mail.ru](mailto:m1a-gasis@mail.ru)

**Горбунова Элина Александровна**, студентка бакалавриата Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), инженер Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7241-4136>, e-mail: [eg15082000@mail.ru](mailto:eg15082000@mail.ru)

**Демисси Бекеле Арега**, магистр строительства, аспирант кафедры Строительных материалов и материаловедения НИУ МГСУ, г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1689-7003>, e-mail: [aregabekalu@gmail.com](mailto:aregabekalu@gmail.com)

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 08.04.2021.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 27.04.2021.

Статья принята к публикации: 13.05.2021.