

Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 55–63.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2021; (11): 55–63.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.327

DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-55-63

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Борис Александрович Бондарев, Анастасия Олеговна Корнеева,
Александр Николаевич Роговский, Алексей Андреевич Мещеряков**
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Аннотация. Приведены результаты экспериментов, позволяющие продолжить разработки в области строительного материаловедения по оптимизации составов строительных смесей, применяемых в аддитивных технологиях. Приведенные уравнения показывают зависимость искомых параметров от заданных исходных условий. По уравнениям регрессии построена поверхность отклика «прочность при сжатии», которая позволила определить оптимальный состав строительной смеси с необходимыми реологическими свойствами и оптимальными сроками схватывания для 3D-печати. Установлено, что введение доменного шлака в состав смеси, применяемой для аддитивных технологий, позволяет снизить расход цемента.

Ключевые слова: 3D-печать, бетонная смесь, сроки схватывания, реологические свойства, подвижность бетонной смеси, 3D-принтер, аддитивные технологии, микрокремнезем, доменный шлак

Для цитирования: Бондарев Б.А., Корнеева А.О., Роговский А.Н., Мещеряков А.А. Разработка составов строительных смесей для аддитивных технологий // Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 55–63. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-55-63.

Original article

DEVELOPMENT MIXTURES FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

**Boris A. Bondarev, Anastasiya O. Korneeva, Alexandr N. Rogotovskiy,
Aleksey A. Meshcheryakov**
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract. The results of experiments are given, allowing to continue developments in the field of building materials science to optimize the composition of building mixtures used in additive technologies. The above equations show the dependence of the sought parameters on the given initial conditions. According to the regression equations, the «compressive strength» response surface was constructed, which made it possible to determine the optimal composition of the mortar with the required rheological properties and optimal setting times for 3D-printing. It has been established that the introduction

© Бондарев Б.А., Корнеева А.О., Роговский А.Н., Мещеряков А.А.,
2021

of blast-furnace slag into the mixture used for additive technologies makes it possible to reduce the consumption of cement.

Keywords: 3D-printing, concrete mix, setting time, rheological properties, flowability of concrete, 3D-printer, additive technologies, microsilica, blast furnace slag

For citation: Bondarev B.A., Korneeva A.O., Rogotovskiy A.N., Meshcheryakov A.A. Development mixtures for additive technologies. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; (11): 55–63. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-55-63.

Введение. Высокая точность соответствия проектным решениям, скорость возведения зданий, возможность обходиться без опалубки, безотходность и широкое разнообразие форм и структур, позволяющее не только снизить напряжения, но и повысить уровень стилистического качества, – все это неумолимые достоинства 3D-принтера, которые актуализируют вопрос разработки смесей для аддитивных технологий¹.

Ввиду недостаточной разработанности нормативной базы, в частности технических условий и ГОСТов, в области строительной 3D-печати, на сегодняшний день сдерживается применение аддитивных технологий в массовом строительстве. В ближайшем будущем станет возможным формирование исследовательской базы составов строительных бетонных смесей и появятся возможности для разработки сухих строительных смесей для применения в аддитивных технологиях [1].

Бетонные смеси для строительных 3D-принтеров разрабатываются не только за рубежом, но и в России [2–6]. Группа компаний «АМТ-Спецавиа» выпускает 3D-принтеры для строительства в г. Ярославль, для этих принтеров уже разработаны составы бетонных смесей на основе стеклофибробетона, цемента, пескобетона и т.д. Компанией «Apis Cor» (США) разработаны составы смесей для аддитивных технологий на основе фибробетона, геополимербетона. «Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co» (шанхайская компания) разработала смесь, включающую отходы строительства, бой стекла, цемент и стальной лом.

Следует учитывать, что применение минерального вяжущего, традиционного цемента для аддитивных технологий предполагает решение следующего ряда проблем, которые определяются свойствами обычных цементных смесей (высокая степень усадки, недостаточная адгезия между слоями бетона, невысокий показатель пластичности, сроки схватывания и твердения и т.д.).

Бетонную смесь необходимо модифицировать для получения достаточных для 3D-печати реологических свойств и технологических параметров, в частности уменьшать вязкость при механическом воздействии, а в состоянии покоя – увеличивать, смесь должна быть достаточно пластична для нормального прохождения через экструдер, при этом предел текучести материала должен быть достаточным, чтобы выдержать нагрузку последующих слоев. Для данной цели можно в состав бетонной смеси включить суперпластификатор [7].

Таким образом, объектом исследования выступают характеристики бетонных смесей, применяемых для аддитивных технологий, в качестве сырья

¹ Бондарев Б.А., Баязов В.А., Корнеев О.О., Востриков И.А., Мещеряков А.А., Корнеева А.О. Подбор составов смесей для 3D-печати. URL: <https://esj.today/PDF/29SAVN321.pdf> (дата обращения: 23.08.2021).

используется вторичный продукт металлургической промышленности ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» – доменный шлак, а также суперпластификатор.

Цели и задачи исследования. Целью исследований является изучение бетонных смесей различных составов и их реологических свойств, в том числе условной вязкости, удобоукладываемости, консистенции бетонного теста, а также подбор оптимального состава смеси, пригодной для 3D-печати.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка оптимальных составов бетонных смесей на основе портландцемента, микрокремнезема и модифицирующих добавок с позиции физико-механических и реологических свойств;
- получение математических зависимостей влияния состава на прочностные характеристики бетонных смесей.

Исследования проводились на готовой бетонной смеси и на образцах кубах размерами 100×100×100 мм и балочках размерами 40×40×160 мм. Учитывая представленные данные, была разработана и реализована программа эксперимента. На первом этапе исследований изготавливали образцы бетона, на втором этапе определяли физико-механические свойства.

Для каждого состава определялись:

- сроки схватывания по прибору Вика с иглой (ГОСТ 30744–2001);
- подвижность по погружению конуса (ГОСТ 5802–86);
- прочность образцов на сжатие в возрасте 28 сут (ГОСТ 30744–2001);
- прочность образцов на изгиб в возрасте 28 сут (ГОСТ 30744–2001).

Анализ полученных данных позволил определить компоненты бетонной смеси, пригодной для применения в строительной 3D-печати. Данный состав имеет высокое значение прочности в 28-дневном сроке твердения, оптимальные показатели подвижности и сроки схватывания.

Далее методом математического планирования эксперимента путем изменения соотношения компонентов, влияющих на различные свойства, определяли оптимальный состав бетонной смеси для аддитивных технологий. Таким образом, устанавливалась алгебраическая зависимость характеристик получаемой смеси от расхода компонентов, их свойств и воздействующих переменных факторов.

Составлялась матрица планирования эксперимента, число опытов определялось исходя из количества факторов, а также в соответствии с условиями решаемой задачи. Результаты экспериментов подвергались обработке с использованием методов математической статистики. В конечном итоге получали уравнения регрессии, отражающие связь между исследуемыми свойствами и воздействующими факторами. На основании данных алгебраических уравнений строили графики, что позволило оперативно установить значение выходного параметра при изменении каждого фактора [8].

Статистическая обработка результатов испытаний. Качественно материал управляют с помощью варьирования рецептурно-технологических факторов, выбор которых зависит от знаний о материале и технологии, фактических возможностей управления производством (уровня техники). Для этого методами математического планирования эксперимента устанавливают уравнения регрессии для каждого свойства (рис. 1). Материал представля-

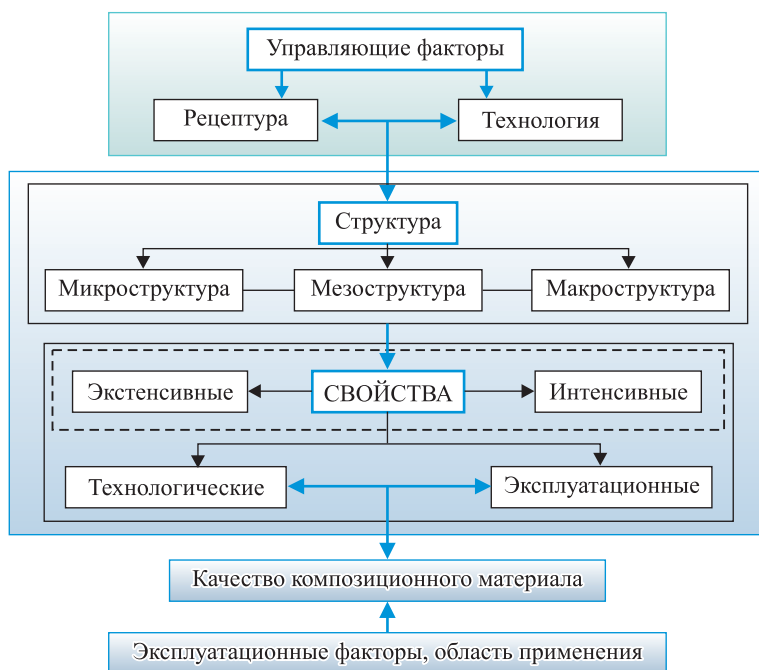


Рис. 1. Схема конструирования строительного материала с позиции полиструктурной теории

Fig. 1. Construction material design scheme from the perspective of polystructural theory

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования независимых переменных
Table 1. Levels and intervals of variation of independent variables

Уровень	Переменные величины		
	x_1	x_2	x_3
Нижний [-1]	350	50	5
Основной [0]	400	100	10
Верхний [+1]	450	150	15
Интервал варьирования	50	50	5

ется в виде модели «черного ящика». Такой подход пригоден для решения практических инженерных задач и установления основных закономерностей для новых строительных материалов (первый и второй этапы развития технологии)² [9].

Подбор составов смесей для 3D-печати. При планировании эксперимента в качестве варьируемых факторов был принят расход цемента, доменного шлака и микрокремнезема. Для обеспечения более точного описания поверхностей откликов свойств бетонной смеси в зависимости от варьируемых факторов в виде полиномов второй степени было применено орто-

² Бормотов А.Н., Прошин И.А., Королев Е.В. и др. Научно-технический отчет по Государственному контракту 14.740.11.1066 от 24 мая 2011 г. на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд. Пенза, 2012. С. 24–25.

Таблица 2. Условия планирования эксперимента

Table 2. Experiment planning conditions

Варьируемые факторы	Математический символ	Среднее значение фактора	Интервал варьирования	Значения факторов на уровнях			
				+1	-1	+1,215	-1,215
Расход цемента	x_1	400	50	450	350	460,75	339,25
доменного шлака	x_2	100	50	150	50	170,75	49,25
Пластификатор	x_3	10	5	15	5	5,03	4,67

гональное, центральное композиционное планирование (ОЦКП) [8]. Уровни и интервалы варьирования независимых переменных условий планирования с указанием натуральных значений кодируемых факторов представлены в табл. 1, а условия планирования эксперимента с указанием натуральных величин варьируемых факторов в табл. 2.

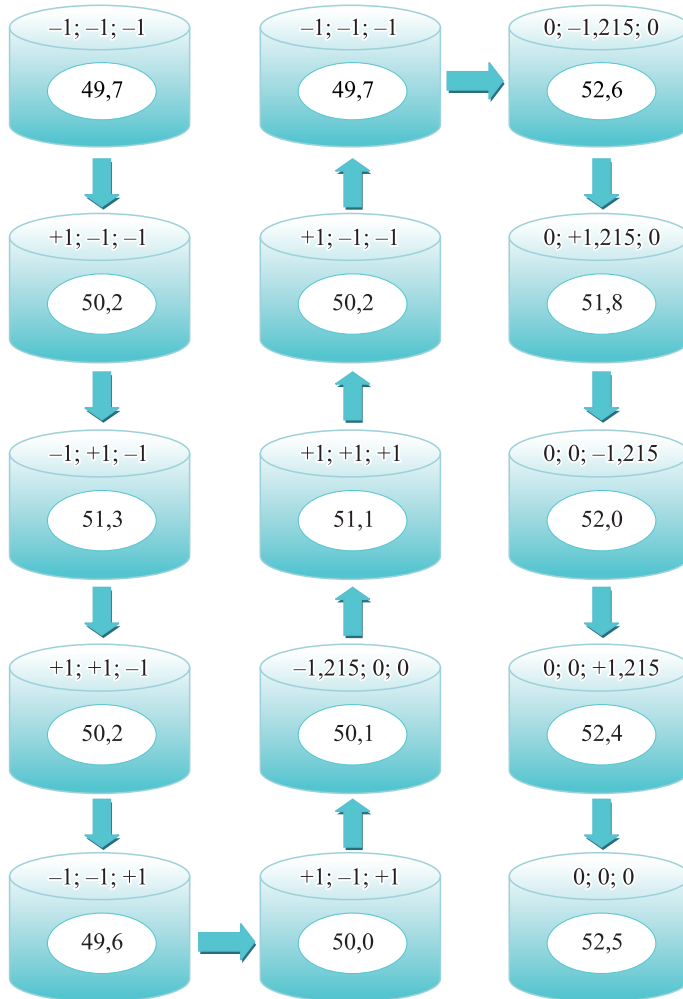


Рис. 2. Результаты испытаний по планированию эксперимента

Fig. 2. Test results for experiment planning

№ оп.	x_0	x_1	x_2	x_3		x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_1	y_2	y_3		
1	1	1	1	1	0,27	0,27	1	1	51,1	51,3	50,9	51,1	0,04
2	1	1	1	-1	0,27	0,27	1	-1	51,5	51,2	51,3	51,3	0,02
3	1	1	-1	1	0,27	0,27	-1	1	50,2	49,7	50,1	50,0	0,07
4	1	1	-1	-1	0,27	0,27	-1	-1	50,4	50,1	50,2	50,2	0,02
5	1	-1	1	1	0,27	0,27	-1	-1	50,0	49,8	49,9	49,9	0,01
6	1	-1	1	-1	0,27	0,27	-1	1	51,3	51,4	51,1	51,3	0,02
7	1	-1	-1	1	0,27	0,27	1	-1	49,5	49,8	49,4	49,6	0,04
8	1	-1	-1	-1	0,27	0,27	1	1	49,8	49,6	49,7	49,7	0,01
9	1	-1,215	0	0	0,746	-0,73	0	0	50,1	50,3	49,9	50,1	0,04
10	1	1,215	0	0	0,746	-0,73	0	0	52,7	52,6	52,3	52,5	0,04
11	1	0	-1,215	0	-0,73	0,746	0	0	52,5	52,7	52,6	52,6	0,01
12	1	0	1,215	0	-0,73	0,746	0	0	51,9	51,7	51,9	51,8	0,01
13	1	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,746	0	52,2	52,4	52,5	52,4	0,02
14	1	0	0	1,215	-0,73	-0,73	0,746	0	51,9	52,1	51,9	52,0	0,01
15	1	0	0	0	-0,73	-0,73	0	0	52,3	52,7	52,6	52,5	0,04
$\sum x_i^*y_{cp}$	767,0	5,2	3,2	-2,5	-5,3	-2,7	-2,8	1,0	-1,2			$\sum S_j^2$	0,43
$\sum x_i^*x_j^2$	15	11,0	11,0	11,0	4,4	4,4	8	8	8			$S_j^2_{max}$	0,07
bi	51,85	0,47	0,29	-0,22	-1,22	-0,61	-0,65	0,04	0,13	-0,15		G	0,16
S_y^2	0,029											$n-1$	2,00
γ	0,95											N	15,00
f_1	30											$G_{кр}$	0,33
t_T	2,04											$G - G_{кр}$	-0,17
												Выбод	дисп.
												$(G < G_{кр})$	однор.

Рис. 3. Расчет коэффициентов уравнения регрессии для поверхности отклика «прочность при сжатии»
 Fig. 3. Calculation of the coefficients of the regression equation for the «compressive strength» response surface

Для бетонных смесей оптимизацию рецептуры и технологии приготовления целесообразно проводить по прочности. Остальные показатели качества не оптимизируются, так как предполагается, что их значения должны варьироваться в заданном диапазоне.

По полученным данным [10] выведено уравнение регрессии, характеризующее зависимость свойств бетонной смеси от уровня варьируемых факторов. Для расчета коэффициентов уравнений регрессии и проверки адекватности полученной модели использован программный продукт Microsoft Excel. Результаты испытаний по планированию эксперимента показаны на рис. 2, расчет коэффициентов уравнения регрессии для отклика «прочность при сжатии» приведен на рис. 3, адекватность модели представлена на рис. 4.

Уравнение регрессии для отклика «прочность при сжатии» имеет следующий вид

$$R(x_1, x_2, x_3) = 51,85 + 0,47x_1 + 0,29x_2 - 0,22x_3 - 1,22x_1^2 - 0,61x_2^2 - 0,65x_3^2 + 0,04x_1x_2 + 0,13x_1x_3 - 0,15x_2x_3.$$

Далее исключаются незначимые коэффициенты и уравнение регрессии приобретает вид

$$R(x_1, x_2, x_3) = 51,85 + 0,47x_1 + 0,29x_2 - 0,22x_3 - 1,22x_1^2 - 0,61x_2^2 - 0,65x_3^2 - 0,15x_2x_3.$$

x_0	x_1	x_2	x_3				x_2x_3			
1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	1	51,1	51,6	0,221
1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	1	51,3	52,0	0,469
1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	-1	50,0	51,3	1,690
1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	50,2	51,7	2,294
1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	-1	49,9	50,9	1,063
1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	51,3	51,4	0,013
1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	1	49,6	50,0	0,228
1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	1	49,7	50,5	0,627
1	-1,215	0	0	0,746	-0,73	-0,73	0	50,1	51,3	1,404
1	1,215	0	0	0,746	-0,73	-0,73	0	52,5	52,4	0,009
1	0	-1,215	0	-0,73	0,746	-0,73	0	52,6	52,4	0,037
1	0	1,215	0	-0,73	0,746	-0,73	0	51,8	53,1	1,634
1	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,746	0	52,4	53,0	0,379
1	0	0	1,215	-0,73	-0,73	0,746	0	52,0	52,4	0,222
1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	52,5	53,7	1,276
51,85	0,47	0,29	-0,22	-1,22	-0,61	-0,65	-0,15			11,564
									Сад ²	3,2
									Fкр(Фиш)	1,1
									vad=15-3-1	11
									Fкр (табл)	2,1
									vb=15*(3-1)	30
									F-Fкр=	-1,0
									F<Fкр	

Рис. 4. Проверка адекватности модели
Fig. 4. Checking the adequacy of the model

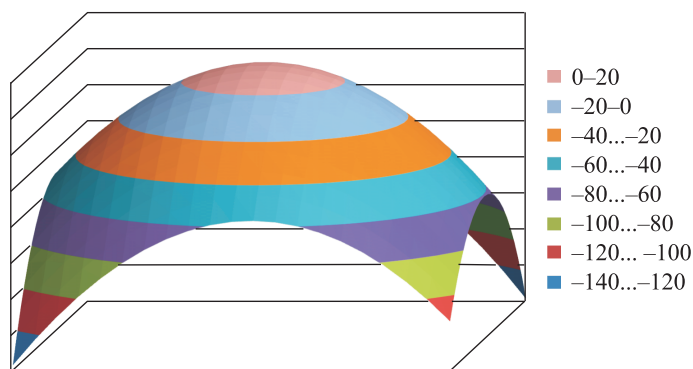


Рис. 5. Поверхность отклика «прочность при сжатии»

Fig. 5. Response surface «compressive strength»

По найденному уравнению регрессии построена поверхность отклика каждого параметра, задающая фиксированные значения одному из варьируемых факторов. Поверхность отклика в трехмерном пространстве «прочность при сжатии» при минимальном значении параметра $x_1 = -1,215$ представлена на рис. 5.

При переходе от кодированных факторов к натуральным найден расход материалов на 1 м³ бетонной смеси, пригодной для аддитивных технологий, кг: цемент – 385; вода – 520; доменный шлак – 70; пластификатор – 13; песок – 1170; микрокремнезем – 150; метакаолин (ВМК) – 80; известь гашеная – 195; полипропиленовая фибра – 1,2.

Заключение. Оптимальный состав бетонной смеси, который был найден в ходе данных исследований, позволяет достичь достаточно высокое значение прочности при сжатии (51 МПа). При этом введение доменного шлака в состав бетонной смеси, применяемой для аддитивных технологий, дает возможность снизить расход цемента до 150 кг на 1 м³ смеси.

Список источников

1. Панфилова А.Д., Шиняева М.В., Когай В.В., Шаранова А.В. Материалы для аддитивных технологий в строительстве // Дни науки: Материалы межвуз. науч.-техн. конф. студентов и курсантов на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». Калининград, 2019. С. 372–375.
2. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С. и др. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1. С. 27.
3. Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes // Automation in construction. 2012. Vol. 21. P. 262–268.
4. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications // Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36, no. 10. P. 1797–1806.
5. Ferron R.P. et al. Rheological method to evaluate structural buildup in self-consolidating concrete cement pastes // ACI materials journal. 2007. Vol. 104, no. 3. P. 242.
6. Tianrong Y., Qiaoling L. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: Pat. CN10 4891891A. 2015.
7. Полуэктова В.А. Электрокинетические свойства и агрегативная устойчивость полимерминеральных дисперсий для строительной 3D-печати // Журн. физ. химии. 2019. Т. 93, № 9. С. 1378–1384.
8. Немахов И.В. Получение сухих строительных смесей с оптимальными физико-механическими свойствами // Аллея науки. 2018. Т. 3, № 8. С. 256–259.

9. Королев Е.В., Баженов Ю.М., Смирнов В.А. Строительные материалы вариатропно-каркасной структуры. М.: МГСУ, 2011. С. 55.
10. Проскурякова А.О. Оптимизация составов наполненных пенополиуретанов повышенной долговечности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2014. 20 с.

References

1. Panfilova A.D., Shinyayeva M.V., Kogay V.V., Sharanova A.V. Materials for additive technologies in construction. Days of science: Materials of the interuniversity scientific and technical conference of students and cadets on the basis of the Kaliningrad State Technical University. Kaliningrad, 2019. P. 372–375. (In Russ.).
2. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S. et al. 3D printing in construction. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy = Construction of unique buildings and structures*. 2017; (1): 27. (In Russ.).
3. Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*. 2012; (21): 262–268.
4. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*. 2006; 36 (10): 1797–1806.
5. Ferron R.P. et al. Rheological method to evaluate structural buildup in self-consolidating concrete cement pastes. *ACI materials journal*. 2007; 104 (3): 242.
6. Tianrong Y., Qiaoling L. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: Pat. CN10 4891891A. 2015.
7. Poluektova V.A. Electrokinetic properties and aggregative stability of polymer mineral dispersions for construction 3D printing. *Zhurnal fizicheskoy khimii = Journal of Physical Chemistry*. 2019; 93 (9): 1378–1384. (In Russ.).
8. Nemakhov I.V. Obtaining dry building mixes with optimal physico-mechanical properties. *Alleya nauki = Alley of Science*. 2018; 3 (8): 256–259. (In Russ.).
9. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Smirnov V.A. Building materials of variatropno-frame structure. Moscow: MGSU, 2011. P. 55. (In Russ.).
10. Proskuryakova A.O. Optimization of compositions of filled polyurethane foams of increased durability: Abstract ... PhD. Voronezh, 2014. 20 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Б.А. Бондарев – доктор технических наук, профессор
А.О. Корнеева – кандидат технических наук, доцент
А.Н. Роготовский – кандидат технических наук, доцент
А.А. Мещеряков – аспирант

Information about the authors

B.A. Bondarev – DSc, Professor
A.O. Korneeva – PhD, Ass. Professor
A.N. Rogotovskiy – PhD, Ass. Professor
A.A. Meshcheryakov – Post-graduate Student

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.09.2021
Одобрена после рецензирования 18.10.2021
Принята к публикации 25.10.2021

The article was submitted 17.09.2021
Approved after reviewing 18.10.2021
Accepted for publication 25.10.2021