

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ / CONSTRUCTION MATERIALS

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2022.30.6.002>

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

Научная статья

Суровцев И.А.^{1*}, Солонина В.А.², Филипенко П.В.³

^{1, 2, 3} Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

* Корреспондирующий автор (v-surovtsev22[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассмотрены особенности аддитивных технологических процессов в строительстве. Определены базовые принципы формирования структуры мелкозернистых цементных бетонов для 3D-печати. Основная научно-исследовательская часть данной статьи содержит сравнительный анализ свойств и физико-механических характеристик мелкозернистых бетонных смесей, состав которых варьируется за счет изменения соотношения инертной части заполнителя к базовому вяжущему. В качестве мелкого заполнителя был использован оптимально подобранный двух фракционный состав кварцевого песка, а основным вяжущим был принят общестроительный портландцемент. Полученные в ходе работы результаты демонстрируют изменение реологических характеристик мелкозернистых бетонных смесей в сторону уменьшения их подвижности с увеличением количества инертной части заполнителя. При этом влияние на физико-механические характеристики минимально, класс бетона составил В35.

Ключевые слова: строительная 3D-печать, мелкозернистая бетонная смесь, мелкозернистый бетон, портландцемент, кварцевый песок.

OPTIMIZING THE STRUCTURE OF FINE GRAIN CONCRETE FOR CONSTRUCTION 3D PRINTING

Research article

Surovtsev I.A.^{1*}, Solonina V.A.², Filipenko P.V.³

^{1, 2, 3} Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

* Corresponding author (v-surovtsev22[at]mail.ru)

Abstract

The article considers the features of additive technological processes in construction. The basic principles for the formation of the structure of fine-grained cement concretes for 3D printing have been determined. The main research part of this article contains a comparative analysis of the properties and physical and mechanical characteristics of fine-grained concrete mixtures, the composition of which varies due to a change in the ratio of the inert part of the aggregate to the base binder. An optimally selected two-fractional composition of quartz sand was used as a fine aggregate, and general construction Portland cement was adopted as the main binder. The results obtained in the course of the work demonstrate a change in the rheological characteristics of fine-grained concrete mixtures towards a decrease in their mobility with an increase in the amount of the inert part of the aggregate. At the same time, the impact on the physical and mechanical characteristics is minimal, the concrete class was B35.

Keywords: building 3D printing, fine-grained concrete mix, fine-grained concrete, Portland cement, quartz sand.

Введение

За последнее десятилетие произошло существенное развитие аддитивных технологий 3D-печати в строительстве, о чем свидетельствует количество публикаций и научных разработок, внедряемых в производство проектов изделий, конструкций, зданий и сооружений в разных странах, в том числе и на территории России [1], [2], [3]. Большинство авторов в качестве основных преимуществ данной технологии выделяют: отсутствие опалубки; сокращение времени строительства; сокращение трудозатрат, стоимости материалов и отходов при производстве работ [4], [5], [6].

Основной целью научных разработок в области материалов для аддитивных технологий является установление зависимостей и связи состава бетона с эффективностью его применения в условиях автоматизированного процесса печати, с учетом изменения его свойств во времени. Состав будущего композита влияет на качество и стабильность печати, что предопределяет параметры принтера, форму сопла, геометрические характеристики слоя и разнообразие формы конструкций при производстве на строительном принтере.

Аддитивное производство открывает большие перспективы для строительного материаловедения с точки зрения состава и свойств будущего композита. Так, спектр различных сырьевых материалов, добавок химического и минерального состава постепенно расширяется. Однако остается необходимость в исследованиях свойств бетонных смесей для строительной печати с учетом параметров принтера, изменения реотехнологических характеристик самой бетонной смеси во времени.

В качестве основного вяжущего материала распространение получили воздушные вяжущие, такие как гипс и смеси на его основе, в том числе гипсоцементные составы [9]. Гидравлические вяжущие, т.е. портландцемент также рассматривается в качестве основной матрицы 3D-композита [10]. Однако в данном случае применение портландцемента в чистом виде ограничивается рядом факторов. Например, особенностями изменения вязкости цементного теста во времени [11], в том числе экологическими причинами, которые рассматривают комплекс мер по

эффективному использованию вяжущих веществ, полученных на основе цементного клинкера, так как при его производстве образуется значительная доля выбросов углекислого газа CO₂ в окружающую среду [12].

В связи с этим, основные способы получения бетона для строительной 3D-печати на цементном вяжущем подразумевают несколько различных подходов (см. рисунок 1), таких как [6], [13], [15], [16]:

- частичная замена традиционных портландцементов материалами с дополнительными вяжущими свойствами (пуццоланической активностью и др.), при этом оптимизация состава инертной части отсутствует;
- регулирование соотношения инертного заполнителя к вяжущему в сторону его увеличения, при этом в качестве вяжущего выступает традиционный портландцемент, а в качестве инертного заполнителя могут применяться пески кварцевые, в том числе частичная замена природного заполнителя искусственным или отходами производств;
- совмещение принципов двух предыдущих пунктов, т.е. уменьшение количества портландцемента за счет изменения его содержания в составе комплексного вяжущего и уменьшение количества вяжущего за счет увеличения доли оптимально подобранного заполнителя.

Широкое распространение портландцемента в строительстве является на сегодняшний день неоспоримым, поэтому для относительно новой технологии строительной печати необходима адаптация портландцемента к условиям и временным рамкам для данного производства. Конечно, помимо указанных способов формирования структуры мелкозернистых бетонов важную роль играют применяемые химические и минеральные добавки [17], [18]. Однако в данной статье фокус смещен именно к упомянутым выше принципам оптимизации структуры мелкозернистого бетона.

Исследования в области разработки и проектирования рецептур мелкозернистых бетонов являются актуальными и определяют скорость дальнейшего развития аддитивных технологий. Так, именно рецептура композита позволит обеспечить эффективное производство в условиях 3D печати за счет применения различных в количественном и качественном отношении сырьевых материалов.

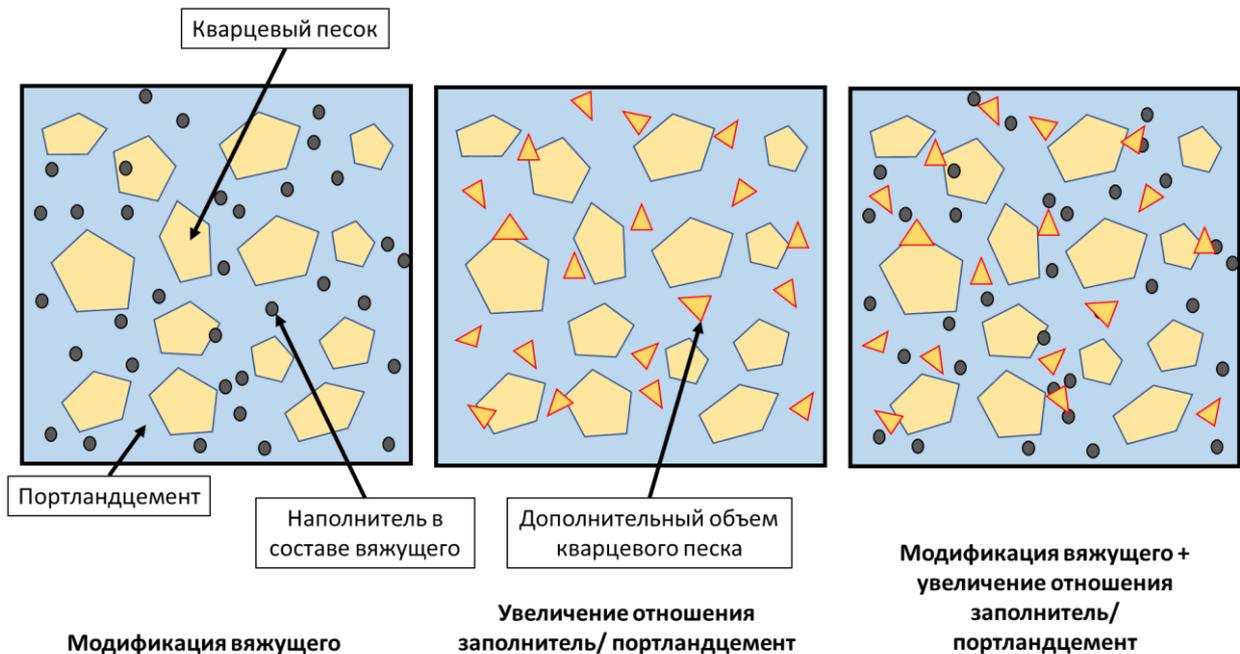


Рис. 1 – Принципы снижения количества портландцемента в составе мелкозернистого бетона для строительной 3D-печати

Методы и материалы исследования

В данной работе исследовался состав мелкозернистой смеси для строительной 3D-печати. В качестве основного способа формирования структуры мелкозернистого бетона был выбран второй принцип, при котором обеспечивается увеличение соотношения заполнителя к вяжущему.

Количественные отношения сырьевых материалов исследуемых составов мелкозернистых бетонных смесей (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Расход сырьевых материалов

Сырьевые материалы		Состав 1	Состав 2	Состав 3
Портландцемент	ЦЕМ II В-И 32,5 Б, кг/м ³	780	780	780
Кварцевый песок	фр. 0,63-0,315, кг/м ³	437	546	655
	фр. 0,315-0,16, кг/м ³	187	234	281
Пластификатор	Sika VS-200, %	0,8	0,8	0,8
Модификатор вязкости	Centrament VMA, %	0,2	0,2	0,2
Основные соотношения компонентов				
Водоцементное отношение В/Ц		0,3	0,3	0,3
Отношение песка к вяжущему П/Вяз		0,8	1,0	1,2

Оценка реологии мелкозернистых смесей с различной концентрацией кварцевого заполнителя в матрице вяжущего вещества проводилась по следующей методике: форма-конус устанавливалась на лабораторный встряхивающий столик (см. рисунок 2А) и заполнялась смесью в два приема. Затем форма-конус снималась, и замерялась первичная осадка конуса. После 10-ти ударов на ручном встряхивающем столике измерялся результирующий диаметр расплыва конуса.

Полученные составы формовались в формы размером 40х40х40 мм (см. рисунок 2Б). В первые сутки твердения формы с образцами выдерживались в камере нормального твердения, после чего образцы расформовывались и погружались в воду. Испытания по определению прочностных показателей на сжатие проводились в возрасте 2-х, 7-ми и 28-ми суток твердения на гидравлическом прессе.

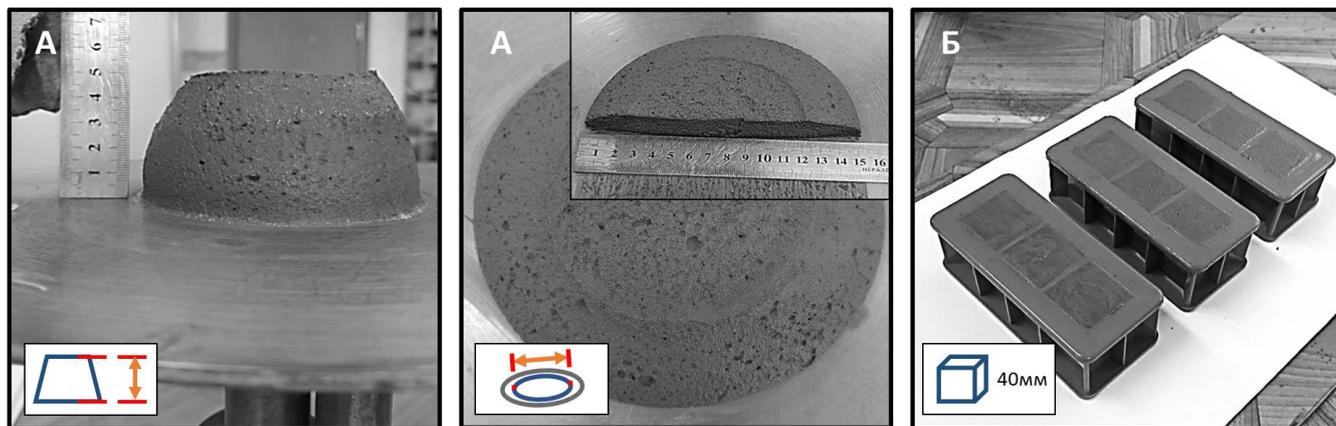


Рис. 2 – Методики испытания:

А – расплыв смеси на ручном встряхивающем столике; Б – формование образцов мелкозернистого бетона

Основные результаты

Принцип формирования структуры мелкозернистого бетона, предполагающий уменьшение количества портландцемента в общем объеме композита за счет обеспечения плотной упаковки зерен заполнителя, предполагает применение песка разной фракции, в том числе мелкой и очень мелкой. В данной работе получение оптимальной фрактальной структуры достигалось за счет применения двух фракций песка 0,63-0,315 и 0,315-0,16 в соотношении 70% на 30%, соответственно. При этом соотношение заполнителя к портландцементу варьировалось в диапазоне от 0,8 до 1,2, с шагом в 0,2.

Таблица 2 – Результаты испытания мелкозернистой бетонной смеси

Состав №	Диаметр расплыва конуса, мм		Осадка конуса, мм
	до*	после*	
Состав 1	110±1	158±1	5±1
Состав 2	108±1	135±1	2±1
Состав 3	105±1	112±1	2±1

Примечание: * – 10-ти ударов на встряхивающем столике

Полученные результаты расплывов исследуемых смесей (см. таблицу 2) после 10-ти ударов на встряхивающем столике показали, что подвижность смеси снижается при увеличении доли инертной части. Это связано с увеличением количества контактов и суммарного трения между зернами мелкого заполнителя. Количество цементного теста в качестве основной матрицы системы резко сокращается, что приводит к изменению реологии бетонной смеси. Портландцемент оказывает большее влияние на результирующую подвижность бетонной смеси, в том числе на эффективность применяемых пластифицирующей и стабилизирующей добавок. Так, состав №1 показал расплыв конуса равный 158±1 мм, что в сравнении с остальными составами является максимальным расплывом. Соотношение заполнитель к вяжущему веществу в данном составе №1 составило 0,8. Анализируя осадку конуса бетонных смесей, можно сделать вывод, что максимальное значение до механических воздействий на смесь было зафиксировано у состава №1, который равен 5±1 мм, однако с увеличением базового отношения песка к цементу стабильность системы увеличивается, что отражается в уменьшении осадки конуса.

Таблица 3 – Результаты физико-механических испытаний

Состав №	Прочность при сжатии в возрасте, МПа			Плотность, кг/м ³
	2 суток	7 суток	28 суток	
Состав 1	24,5	31,6	50,8	2223
Состав 2	22,7	28,5	48,4	2198
Состав 3	21,1	27,1	47,2	2202

Результат испытания образцов кубов на прочность при сжатии показал незначительный сброс средней прочности серии образцов. Так, для состава №1 прочность при сжатии в возрасте 2 суток составила 24,5 МПа, а в возрасте 28 суток – 50,8 МПа, что соответствует классу по прочности В35. Снижение прочностных показателей для состава №2 составило 5%, а для состава №3 – 7%, в сравнении с составом №1. Класс бетона по прочности состава №2 и состава №3 так же относится к В35. Средняя плотность всех составов находится в пределах реальных значений с допустимой погрешностью.

Заключение

Действительно, мелкозернистые бетоны отлично работают в традиционных диапазонах соотношения заполнитель к вяжущему, т.е. составы со стандартно большим количеством портландцемента. Это является необходимым условием для эффективной прокачки бетонной смеси на участке транспортировки. Однако недостаток цемента в условиях строительной 3D печати проявляется на выходе из сопла экструдера. Сроки схватывания и скорость увеличения вязкости таких цементных систем являются длительными, в сравнении, например, с гипсовыми вяжущими. Так, возникает необходимость в модификации цементных вяжущих, в том числе снижения их количества в системе с сохранением возможности для перекачки. Увеличения соотношения кварцевого песка к портландцементу позволяет регулировать свойства смеси и повышать её стабильность в условиях послойной укладки при строительной печати. Хочется отметить, что необходимость в дополнительных химических добавках, регулирующих сроки схватывания и обеспечивающих формирование первичной структуры цементного теста, остается ключевой для обеспечения внутреннего каркаса слоя на ранних этапах строительной печати. Применение таких добавок станет предметом рассмотрения дальнейших исследований. Анализ физико-механических показателей бетона показал возможность регулирования структуры за счет снижения количества цемента в системе и увеличения содержания мелкого заполнителя без значительной потери прочности, в данном исследовании класс прочности при сжатии бетона составил В35.

Conflict of Interest

None declared.

Конфликт интересов

Не указан.

Список литературы / References

1. Иноземцев А. С. Анализ существующих технологических решений в 3D-печати в строительстве / А. С. Иноземцев, Е. В. Королёв, Т. К. Зыонг // Вестник МГСУ. – 2018. – № 17(7). – С. 863–876.
2. Лунева Д. А. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития / Д. А. Лунева, Е. О. Кожевникова, С. В. Калошина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета, Строительство и архитектура. – 2017 – Т. 8. – №1. – С. 90–101.
3. Славчева Г. С. Управление реологическим поведением смесей для строительной 3D-печати: экспериментальная оценка возможностей арсенала «нано» / Г. С. Славчева, О. В. Артамонова. // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Т. 11. – № 3. – С. 325–334.
4. Biernacki J. J. Cements in the 21st century: challenges, perspectives, and opportunities / J. J. Biernacki, J. W. Bullard, G. Sant et al. // Journal of the American Ceramic Society. – 2017. – V. 100. – P. 2746–2773.
5. Buswell R. A. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research / R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones et al. // Cement and Concrete Research. – 2018. – V. 112. – P. 37–49.
6. Chen Y. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing / Y. Chen, S. He, Y. Gan et al. // Journal of Building Engineering. – 2022. – V. 45. – P. 103599.
7. Le T. T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete / T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim et al. // Materials and Structures. – 2012. – V. 45. – P. 1221–1232.
8. Mechtcherine V. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – production steps, processes, and their underlying physics: a review / V. Mechtcherine, F. P. Bos, A. Perrot, et al. // Cement and Concrete Research. – 2020. – V. 132. – P. 106037.
9. Мухаметрахимов Р. Х. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего / Р. Х. Мухаметрахимов, А. Р. Галаутдинов // Вестник технологического университета. – 2017. – № 6(20). – С. 60–63.
10. Bhattacharjee S. Sustainable materials for 3D concrete printing / S. Bhattacharjee, A.S. Basavaraj, A.V. Rahul et al. // Cement and Concrete Composites. – 2021. – V. 122. – P. 104156.
11. Mohan, M. K. Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content / M. K. Mohan, A. V. Rahul, K. Van Tittelboom et al. // Cement and Concrete Research. – 2021. – V. 139. – P. 106258.
12. Malhotra V. Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions / V. Malhotra // Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century. – London: E&FN Spon, 1999. – P. 226–235.
13. Иващенко Ю. Г. Оценка влияния минеральных добавок природного и техногенного происхождения на кинетику формирования прочности мелкозернистого бетона / Ю. Г. Иващенко // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т.4. – №3. – С. 25–29.
14. Ильина Л. В. Влияние дисперсных минеральных добавок на прочность мелкозернистого бетона / Л. В. Ильина, С. В. Хакимуллина, Д. А. Кадоркин // Наука молодых - будущее России сборник научных статей международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. – 2016. – С. 31–35.

15. Slavcheva G. S. Rheological Behavior and Mix Design for 3D Printable Cement Paste / G. S. Slavcheva, O. V. Artamonova // *Key Engineering Materials*. – 2019. – V. 799. – P. 282–289.
16. Zhang C. Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content / C. Zhang, Z. Hou, C. Chen et al. // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – V. 104. – P. 103406.
17. Лесовик В. С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом генезиса / В. С. Лесовик, Л. Д. Шахова, Д. Э. Кучеров и др. // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2012. – №3. – С. 10–14.
18. Мухаметрахимов Р. Х. Роль дисперсного армирования в формировании технологических свойств и реологических свойств бетонных смесей для строительной 3D-печати / Р. Х. Мухаметрахимов, П. С. Горбунова // *Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса*. – 2019. – С. 270–274.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Inozemcev A. S. Analiz sushchestvuyushchih tekhnologicheskikh reshenij v 3D-pechati v stroitel'stve [Analysis of actual technological solutions in 3D printing in construction] / A. S. Inozemcev, E. V. Korolev, T. K. Zyong // *Vestnik MGSU [Vestnik MGSU]*. – 2018. – № 17(7). – P. 863–876. [in Russian]
2. Luneva D. A. Primenenie 3D-pechati v stroitel'stve i perspektivy ee razvitiya [The use of 3D printing in construction and the prospects for its development] / D. A. Luneva, E. O. Kozhevnikova, S. V. Kaloshina // *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture]*. – 2017 – V. 8. – №1. – P. 90–101. [in Russian]
3. Slavcheva G. S. Upravlenie reologicheskimi povedeniyami smesey dlya stroitel'noj 3D-pechati: eksperimental'naya ocenka vozmozhnostej arsenalа «nano» [Controlling the Rheological Behavior of Mixtures for Construction 3D Printing: An Experimental Evaluation of the Possibilities of the "Nano" Arsenal] / G. S. Slavcheva, O. V. Artamonova. // *Nanotekhnologii v stroitel'stve [Nanotechnologies in construction]*. – 2019. – V. 11. – № 3. – P. 325–334. [in Russian]
4. Biernacki J. J. Cements in the 21st century: challenges, perspectives, and opportunities / J. J. Biernacki, J. W. Bullard, G. Sant et al. // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2017. – V. 100. – P. 2746–2773.
5. Buswell R. A. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research / R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones et al. // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – V. 112. – P. 37–49.
6. Chen Y. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing / Y. Chen, S. He, Y. Gan et al. // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – V. 45. – P. 103599.
7. Le T. T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete / T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim et al. // *Materials and Structures*. – 2012. – V. 45. – P. 1221–1232.
8. Mechtcherine V. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – production steps, processes, and their underlying physics: a review / V. Mechtcherine, F. P. Bos, A. Perrot, et al. // *Cement and Concrete Research*. – 2020. – V. 132. – P. 106037.
9. Muhametrahimov R. H. Rol' aktivnykh mineral'nykh dobavok prirodnoho proiskhozhdeniya v formirovaniі struktury i svoystv gipsocementno-puccolanovogo vyazhushchego [The role of active mineral additives of natural origin in the formation of the structure and properties of gypsum-cement-pozzolanic binder] / R. H. Muhametrahimov, A. R. Galautdinov // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Technological University]*. – 2017. – № 6(20). – P. 60–63. [in Russian]
10. Bhattacharjee S. Sustainable materials for 3D concrete printing / S. Bhattacharjee, A.S. Basavaraj, A.V. Rahul et al. // *Cement and Concrete Composites*. – 2021. – V. 122. – P. 104156.
11. Mohan, M. K. Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content / M. K. Mohan, A. V. Rahul, K. Van Tittelboom et al. // *Cement and Concrete Research*. – 2021. – V. 139. – P. 106258.
12. Malhotra V. Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions / V. Malhotra // *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*. – London: E&FN Spon, 1999. – P. 226–235.
13. Ivashchenko YU. G. Ocenka vliyaniya mineral'nykh dobavok prirodnoho i tekhnogennoho proiskhozhdeniya na kinetiku formirovaniya prochnosti melkozernistogo betona [Evaluation of the influence of mineral additives of natural and technogenic origin on the kinetics of the formation of strength of fine-grained concrete] / YU. G. Ivashchenko // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Saratov State Technical University]*. – 2010. – V. 4. – №3. – P. 25–29. [in Russian]
14. Il'ina L.V. Vliyanie dispersnykh mineral'nykh dobavok na prochnost' melkozernistogo betona [Influence of dispersed mineral additives on the strength of fine-grained concrete] / L. V. Il'ina, S. V. Hakimullina, D. A. Kadorkin // *Nauka molodykh - budushchee Rossii sbornik nauchnykh statej mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh [Science of the young - the future of Russia collection of scientific articles of the international scientific conference of promising developments of young scientists]*. – 2016. – P. 31–35. [in Russian]
15. Slavcheva G. S. Rheological Behavior and Mix Design for 3D Printable Cement Paste / G. S. Slavcheva, O. V. Artamonova // *Key Engineering Materials*. – 2019. – V. 799. – P. 282–289.
16. Zhang C. Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content / C. Zhang, Z. Hou, C. Chen et al. // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – V. 104. – P. 103406.
17. Lesovik V. S. Klassifikaciya aktivnykh mineral'nykh dobavok dlya kompozitsionnykh vyazhushchih s uchetom genezisa [Classification of active mineral additives for composite binders, taking into account the genesis] / V. S. Lesovik, L. D. SHahova, D. E. Kucherov et al. // *Vestnik BGTU im. V.G. SHuhova [The Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]*. – 2012. – №3. – P. 10–14. [in Russian]
18. Muhametrahimov R. H. Rol' dispersnogo armirovaniya v formirovaniі tekhnologicheskikh svoystv i reologicheskikh svoystv betonnykh smesey dlya stroitel'noj 3D-pechati [The role of dispersed reinforcement in the formation of technological properties and rheological properties of concrete mixtures for building 3D printing] / R. H. Muhametrahimov, P. S. Gorbunova // *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa [Actual problems and prospects for the development of the construction complex]*. – 2019. – P. 270–274. [in Russian]