

УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-87-95

*Е.А. СОРОКИНА, Н.О. КОПАНИЦА,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Контроль свойств бетонной смеси и затвердевшего бетона является неотъемлемой частью строительного процесса. Однако с применением в строительстве технологии 3D-печати некоторые методики оценки свойств бетонной смеси и бетона будут иметь свои особенности, связанные с формированием структуры и свойств бетонной смеси и бетона в условиях укладки и набора прочности в тонких слоях. Нормативная документация для достоверной оценки качества бетонной смеси и бетона для 3D-печати в настоящее время отсутствует. Цель исследования заключалась в обосновании и разработке метода определения прочности бетона применительно к технологии 3D-печати. Для проведения исследований по оценке и выбору методики в работе использовалась строительная смесь, ранее разработанная авторами. Состав строительной смеси был подобран исходя из технологических требований оборудования для 3D-печати и обеспечения требуемых характеристик смеси. Для оценки прочности использовались различные способы формования образцов и методы исследования в сравнении с предложенными в ГОСТ 10180–2012. В статье обоснованы основные проблемы контроля качества бетона при использовании аддитивной технологии, предложены методики определения прочностных характеристик с учетом особенностей 3D-печати. Приведена сравнительная оценка их эффективности.

Ключевые слова: 3D-печать; строительная 3D-печать; аддитивные технологии; прочность бетона; методы определения прочности.

Для цитирования: Сорокина Е.А., Копаница Н.О. Анализ и оценка методов определения прочности бетона для аддитивной технологии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 87–95.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-87-95

*Е.А. SOROKINA, N.O. KOPANITSA,**Tomsk State University of Architecture and Building*

ANALYSIS OF CONCRETE STRENGTH DETERMINATION METHODS FOR ADDITIVE MANUFACTURING

The property control of concrete mix and hardened concrete is an integral part of the construction process. With the development of additive manufacturing in construction, the methods of assessing the properties of concrete mix and concrete are characterized by the formation of their structure and properties in concrete laying and curing. Currently, there is no regulatory documentation on a reliable assessment of the concrete mix and concrete quality for additive manufacturing. The purpose of this work is to propose a method for determining the concrete strength for additive manufacturing. The proposed concrete mix composition matches the technological requirements for 3D printing equipment and possesses the required properties. The concrete strength analysis and research methods are carried out in accord with the Russian State Standard. The paper describes the main problems of the concrete quality control in using additive manufacturing and proposes methods for determining the concrete strength properties for 3D printing.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; concrete strength; strength analysis.

For citation: Sorokina E.A., Kopanitsa N.O. Analiz i otsenka metodov opredeleniya prochnosti betona dlya additivnoi tekhnologii [Analysis of concrete strength determination methods for additive manufacturing]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 87–95.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-87-95

Введение

При производстве строительных работ осуществление контроля качества бетонной смеси и бетона происходит согласно регламентируемым методикам, представленным в нормативных документах. При строительстве методом 3D-печати контроль свойств имеет свои особенности, т. к. не все свойства можно определить традиционными методиками, описанными в национальных стандартах [1].

Регламентируемые нормативными документами методики оценки прочности бетона не дают достоверной информации для условий применения аддитивной технологии ввиду особенностей формирования конструкций. В технологии строительной 3D-печати смесь укладывается тонкими (2–4 см) слоями без опалубки с помощью экструдера, с заданным интервалом времени, на уже набравший начальную прочность слой бетона [2].

Для определения значений прочности тяжелых бетонов на сжатие регламентирована и традиционно применяется методика по государственным стандартам (ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»), по которой образцы изготавливают в поверенных (калиброванных) формах, соответствующих требованиям ГОСТ 22685. Укладку бетонной смеси в форму и ее уплотнение осуществляют в формах для изготовления образцов в виде куба 100×100×100 мм или 150×150×150 мм. При изготовлении образцов с минимальным размером 70×70×70 мм максимальная крупность заполнителя не должна превышать 20 мм. В случае применения технологии 3D-печати указанный метод не обеспечивает достоверности результатов испытаний, т. к. не учитывает особенности формирования стандартных образцов для испытаний методом послойной укладки с определенным интервалом времени [3–7].

Проблема отсутствия нормативной документации для определения прочностных характеристик для 3D-печати является актуальной, т. к. требования к бетону для 3D-печати имеют свои особенности. Бетон для 3D-печати должен обладать определенными реологическими характеристиками, такими как жесткость, адгезия к нижележащему слою, высокая скорость схватывания, вододерживающая способность, но при этом обеспечивать заданный проектом класс по прочности бетона.

Цель исследования заключалась в обосновании и разработке метода определения прочности бетона применительно к технологии 3D-печати. Сравнительный анализ особенностей указанных технологий показывает, что основное отличие в методах определения прочности бетона контрольных образцов заключается в принципах их формирования и подготовки для испытаний. Авторами предложены и исследованы следующие способы формирования и подготов-

ки образцов для определения прочности затвердевшей бетонной смеси применительно к аддитивной технологии.

Первый способ – образцы изготавливаются путем экструзии в формы двух последовательно уложенных друг на друга слоев бетонной смеси толщиной 3 см каждый, с интервалом времени, равным 20 мин (технологический интервал укладки слоев).

Второй способ – образцы изготавливаются путем экструзии в один слой бетонной смеси толщиной 3 см, длиной 25 см, из затвердевшей бетонной смеси выпиливаются образцы кубической формы, поверхность шлифуется. Выбор предлагаемых способов основан на известных методах, регламентированных в нормативной документации.

В основе первого способа – методика определения прочности кладочных растворов, взятых из кладки. Данная методика основана на том, что для определения прочности кладочных растворов не требуется точная геометрия образцов. Образцы раствора доводятся до кубической формы путем дополнения растворной смесью с аналогичной прочностью. То же самое можно применить и для экструдированных слоев смеси в аддитивной технологии. В соответствии с [8] испытываемые образцы готовятся из двух пластинок кладочного раствора квадратной формы, склеенных между собой и выровненных по контактными поверхностям гипсовым раствором. По аналогичной технологии были сделаны образцы, изготовленные методом послойной экструзии для проведения исследования.

Второй способ подготовки образцов основан на методе, изложенном в ГОСТ 10180–2012, для определения прочности ячеистых бетонов путем извлечения проб. Образцы из ячеистого бетона выпиливают или выбурируют по ГОСТ 28570 из контрольных неармированных блоков, изготовленных одновременно с изделиями из той же бетонной смеси, или из готовых изделий после их твердения. По аналогичной технологии были изготовлены образцы, полученные методом экструзии, после твердения образцов производился отбор проб-кубов для проведения исследований.

Материалы и способы подготовки образцов

Для проведения исследований по оценке и выбору методики использовалась строительная смесь, ранее разработанная авторами [9, 10]. Состав строительной смеси был подобран исходя из технологических требований оборудования для 3D-печати и обеспечения требуемых характеристик смеси, таких как сохранение формы после экструзии, возможность продавливания через экструдер, отсутствие прилипания к частям экструдера. Образцы готовились с использованием лабораторной установки. Размер образцов 50×50×50 мм обусловлен максимальным диаметром сопла экструдера для печати, который составляет 45 мм. Для определения класса полученного бетона необходимо принять масштабный коэффициент.

Состав применяемой смеси: портландцемент Цем I 42,5Н Топкинского завода, полифракционный песок Кудровского месторождения (размер зерен до 1,25 мм) в соотношении 1:2 с добавлением 10 % микрокремнезема и 0,3 % пластификатора С-3, водотвердое отношение составляло 0,5. Подвижность

смеси, определяемая по расплыву кольца, составляла 75 мм. Смесь сохраняла свои реологические свойства в течение 40 мин.

Форма для укладки экструдруемой строительной смеси имела размеры 50×250 мм с насечками для съемных пластин через каждые 50 мм.

Для изготовления образцов бетонную смесь выдавливали с помощью лабораторного экструдера с соплом диаметром 45 мм в предварительно очищенные и покрытые эмульсионной смазкой формы прямоугольного сечения. Через 20 мин (технологический интервал времени укладки слоев смеси при производстве конструкций) сверху укладывался следующий слой бетонной смеси. После формования слои разделялись перпендикулярно основанию металлическими пластинами на кубики размерами 50×50×50 мм. Размер ячеек обусловлен размером сопла экструдера, тем самым при экструзии смесь укладывалась в два слоя толщиной 3 см. Форма для приготовления образцов изображена на рис. 1.

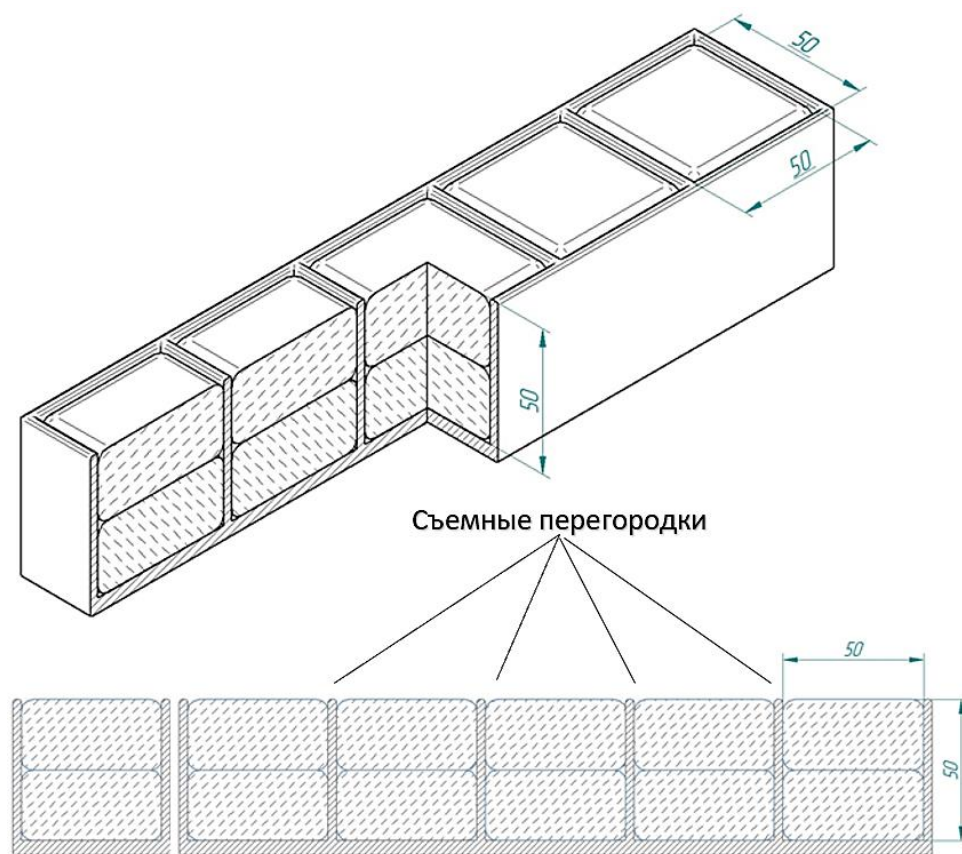


Рис. 1. Схема изготовления образцов 1-м способом

Подготовка образцов вторым способом проводилась в такой последовательности: приготовленную бетонную смесь выдавливали с помощью лабораторного экструдера с соплом диаметром 45 мм в один слой на предва-

рительно очищенную и покрытую эмульсионной смазкой металлическую форму прямоугольного сечения размером 50×250 мм, без съемных перегородок. После изготовления и набора прочности перед испытанием производилась выборка образцов путем выпиливания из экструдированного слоя. Полученные образцы шлифуются перед испытанием с целью придания им формы куба и устранения неровности поверхностей. Схема изготовления образцов показана на рис. 2.

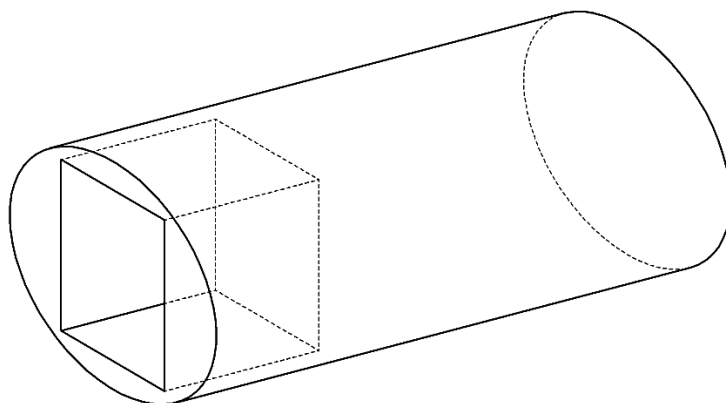


Рис. 2. Образцы, изготовленные 2-м способом

Контрольные образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 10180–2012 в формах – кубах размером 50×50×50 с последующим уплотнением, в дальнейшем испытывались параллельно слоям укладки. Образцы твердели в нормальных условиях при температуре (20 ± 2) °С с относительной влажностью окружающего воздуха не менее 90 %. Прочность при сжатии изготовленных образцов определялась в сроки 3, 7 и 28 сут. Измерение прочности в ранние сроки позволяет более точно определить марку и класс бетона. Количество образцов-кубов бетона каждого вида составляло не менее 10 шт.

Результаты исследования

При испытании образцы-кубы устанавливали на одну из боковых граней так, чтобы разрушающее усилие было параллельно слоям укладки. Для сравнения проводилась оценка прочностных характеристик путем приложения усилия перпендикулярно слоям укладки.

Результаты испытаний на прочность при сжатии образцов, подготовленных первым способом, приведены на рис. 3.

Из данных, представленных на диаграмме, видно, что при использовании метода послойного формования прочность на сжатие образцов затвердевшего бетона ниже на 30 % по сравнению с контрольным образцом, изготовленным с уплотнением. При определении прочности методом послойного формования параллельно слоям укладки строительной смеси наблюдается снижение прочности до 10 % по сравнению с образцами, испытанными перпендикулярно слоям укладки, что обусловлено межслойной адгезией. Низкие показатели прочно-

сти объясняются различием методов укладки бетона при изготовлении образцов, неоднородностью бетонных кубов при укладке слоями. Отсюда можно сделать вывод о том, что адгезия между слоями не обеспечивает прочности на сжатие, сравнимой с прочностью контрольного образца. Слои затвердевшего бетона, воспринимая нагрузку, работают самостоятельно, поэтому прочностные характеристики следует определять как для конструкции, учитывая упруго-деформационное состояние каждого элемента слоя.

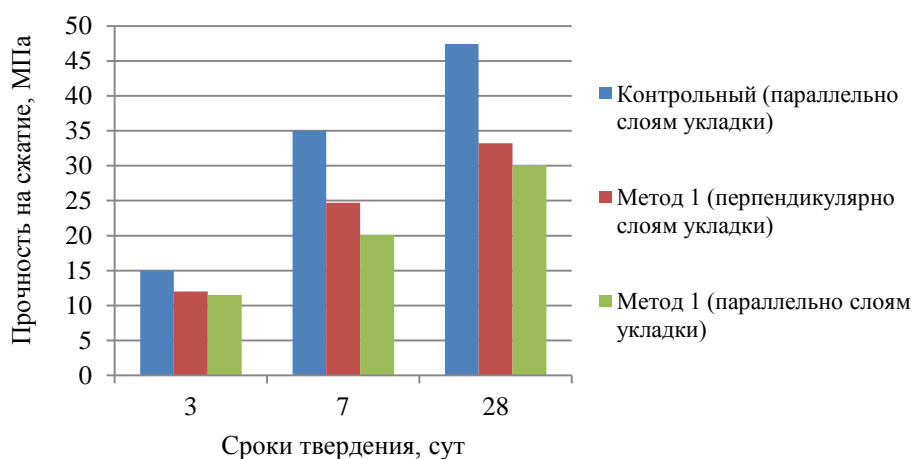


Рис. 3. Прочность на сжатие образцов, изготовленных 1-м методом

Результаты по определению прочности на сжатие образцов, подготовленных по 2-му способу, в возрасте 3, 7, 28 сут представлены на рис. 4.

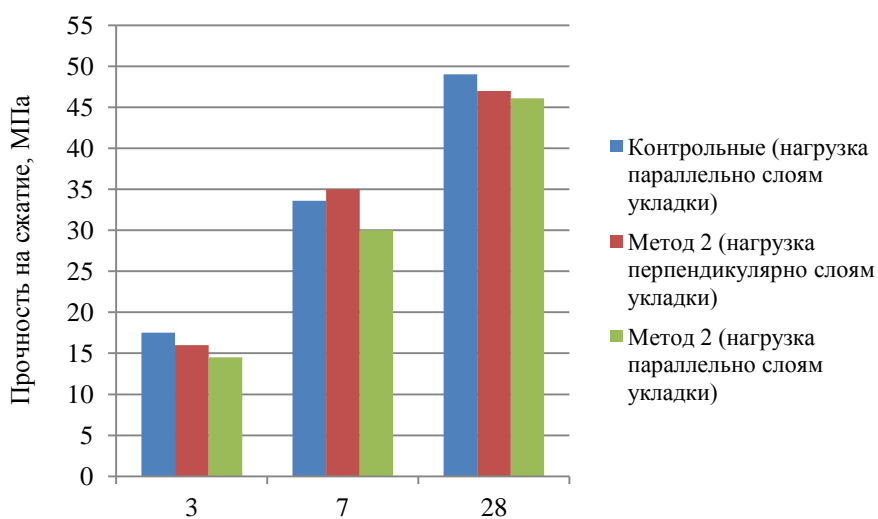


Рис. 4. Прочность на сжатие образцов, изготовленных 2-м методом

Анализ данных, представленных на рис. 4, показал, что при нагрузке параллельно слоям укладки смеси образцов на 28-е сут прочность составляет

47 МПа (что меньше контрольных образцов на 6 %). При нагрузке перпендикулярно слоям укладки образцов на 7-е сут прочность на сжатие увеличилась на 4 % в сравнении с контрольными образцами, что можно отнести к погрешности метода. Таким образом, можно сделать вывод о том, что 2-й метод близок к методу, изложенному в ГОСТ 10180–2012. Способ приложения нагрузки обусловлен тем, что поверхности образцов при приложении нагрузки перпендикулярно слоям укладки имеют заглаженную поверхность, что обеспечивает стабильные показатели прочности. По аналогии приложение нагрузки перпендикулярно слоям укладки применяется для кернов цементобетона. В Рекомендациях по контролю прочности цементобетона покрытий и оснований автомобильных дорог по образцам описан способ определения прочности при сжатии. Керны из покрытия или основания выбуривают со стороны верхней, заглаженной поверхности. Соответственно их испытывают на прочность на сжатие так, что сила прикладывается перпендикулярно слоям укладки бетонной смеси, а не параллельно, как при испытании кубов по базовой схеме испытания. Предложенный метод может быть рекомендован для применения при контроле прочности бетона для 3D-печати.

На основе полученных результатов определялся коэффициент вариации показателей прочности образцов (таблица), изготовленных различными методами. Количество образцов составляло не менее 10 шт. каждого вида. Коэффициенты вариации получены высокие ввиду того, что испытания проводились на образцах с малыми размерами 50×50×50 мм, обусловлены погрешностью метода.

**Коэффициенты вариации показателей прочности образцов,
изготовленных различными методами**

№ п/п	Способ изготовления образцов	Коэффициент вариации, %
1	Цементно-песчаные кубы, приготовленные в соответствии с ГОСТ 10180–2012	2,9–3,5
2	Образцы, изготовленные 1-м способом (нагрузка перпендикулярно слоям укладки)	10,9–11,5
3	Образцы, изготовленные 1-м способом (нагрузка параллельно слоям укладки)	12,0–12,9
4	Образцы, изготовленные 2-м способом (нагрузка перпендикулярно слоям укладки)	6,2–7,7
5	Образцы, изготовленные 2-м способом (нагрузка параллельно слоям укладки)	10,1–11,9

Из полученных данных видно, что меньший показатель коэффициента вариации в сравнении с контрольными показали образцы бетона, подготовленные вторым способом (6,2–7,7 %). Полученные результаты показывают, что данный метод наиболее приближен к методике, описанной в ГОСТ 10180–2012, и может быть адаптирован для определения прочности экструдированных образцов.

Заключение

Получены сравнительные результаты по оценке прочности при сжатии бетона двумя методами. Данные результаты показали, что метод определения прочности бетонных образцов, изготовленных по 2-му способу, можно использовать для определения прочности бетона применительно к аддитивным технологиям формирования строительных конструкций, т. к. он наиболее приближен к методике, описанной в ГОСТ 10180–2012. Это подтверждено значениями коэффициента вариации и показателями прочности бетонных образцов при сжатии, близкими к контрольным, и может быть применено в дополнение к методике, изложенной в ГОСТ 10180–2012.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сорокина Е.А. Технологические аспекты формирования составов бетонных смесей для 3D-печати // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. С. 134–136.
2. Копаница Н.О., Гулёнин В.В., Сорокина Е.А. Особенности контроля качества бетона для строительной 3D-печати // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 т. Т. 6. Строительство и архитектура / под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. С. 43–45.
3. Сорокина Е.А., Гулёнин В.В. Проблемы контроля качества смесей для строительной 3D-печати // Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов : сборник Национальной научно-технической конференции с международным участием. 2019. С. 43–46.
4. Qiang Yuana, Zemin Lia, Dajun Zhouab, Tingjie Huangc, Hai Huangac, Dengwu Jiaod, Caijun Shid. A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar // Construction and Building Materials. 2019. 116600.
5. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А., Ничинский А.Н. Физико-технические свойства фибробетонов с использованием вторичного минераловатного сырья // Строительные материалы. 2019. № 7. С. 16–20.
6. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3D-печати // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 122–134.
7. Bing Luab, Yiwei Wengab, Mingyang Lia, Ye Qiana, Kah Fai Leonga, Ming Jen Tana, Shunzhi Qianab. A systematical review of 3D printable cementitious materials // Construction and Building Materials. 2019. P. 477–490.
8. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. Москва : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1988. 57 с.
9. Gorlenko N.P., Sarkisov Y.S., Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A., Nichinskiy A.N., Gorynin G.L. Fine-grained concrete fibre-reinforced by secondary mineral wool raw material // Journal of Physics: Conference Series. 2018. P. 012059.
10. Demyanenko O., Sorokina E., Kopanitsa N., Sarkisov Y. Mortars for 3d printing // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 02013.

REFERENCES

1. Sorokina E.A. Tekhnologicheskie aspekty formirovaniya sostavov betonnykh smesei dlya 3d-pechati [Technological aspects of concrete mix formation for 3D printing]. In: Perspektivy

- razvitiya fundamental'nykh nauk. sbornik nauchnykh trudov XIV Mezhdunarodnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (*Proc. 14th Int. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Prospects of Fundamental Sciences Development'*). Tomsk: TPU. 2017. Pp. 134–136. (rus)
2. *Kopanitsa N.O., Gulenin V.V., Sorokina E.A.* Osobennosti kontrolya kachestva betona dlya stroitel'noi 3d-pechati [Concrete quality control for 3D printing in construction]. In: Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk. Sbornik nauchnykh trudov XVI Mezhdunarodnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (*Proc. 16th Int. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Prospects of Fundamental Sciences Development'*), in 7 vol. 2019. Pp. 43–45. (rus)
 3. *Sorokina E.A., Gulenin V.V.* Problemy kontrolya kachestva smesei dlya stroitel'noi 3d-pechati [Concrete quality control for 3D printing in construction]. In: Povyshenie kachestva i effektivnosti stroitel'nykh i spetsial'nykh materialov. Sbornik Natsional'noi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (*Proc. Int. Sci. Conf. 'Quality and Efficiency Improvement of Construction and Qualified Materials'*). 2019. Pp. 43–46. (rus)
 4. *Qiang Yuana, Zemin Lia, Dajun Zhouab, Tingjie Huangac, Hai Huangac, Dengwu Jiaod, Caijun Shid.* A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar. *Construction and Building Materials*. 2019. 116600.
 5. *Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A., Nichinskii A.N.* Fiziko-tekhnikeskoe svoystva fibrobetonov s ispol'zovaniem vtorichnogo mineralovatnogo syr'ya [Physical properties of fiber concrete with recycled mineral wool raw materials]. *Stroitel'nye materialy*. 2019. No. 7. Pp. 16–20. (rus)
 6. *Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A.* Vliyanie dobavki termomodifitsirovannogo torfa na tekhnologicheskie svoystva stroitel'nykh smesei dlya 3d-pechati [Performance characteristics of 3D printing construction mixes depending on thermally-modified peat additive]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 122–134. (rus)
 7. *Bing Luab, Yiwei Wengab, Mingyang Lia, Ye Qiana, Kah Fai Leonga, Ming Jen Tana, Shunzhi Qianab.* A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019. Pp. 477–490.
 8. Rekomendatsii po obsledovaniyu i otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya krupnopanel'nykh i kamennykh zdaniy [Recommendations for inspection and assessment of technical condition of large-panel and stone buildings]. Moscow, 1988. 57 p. (rus)
 9. *Gorlenko N.P., Sarkisov Y.S., Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A., Nichinskii A.N., Gorynin G.L.* Fine-grained concrete fibre-reinforced by secondary mineral wool raw material. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 012059.
 10. *Demyanenko O., Sorokina E., Kopanitsa N., Sarkisov Y.* Mortars for 3D printing. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 02013. (rus)

Сведения об авторах

Сорокина Екатерина Александровна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rtak.5@mail.ru

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kopanitsa@mail.ru

Authors Details

Ekaterina A. Sorokina, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rtak.5@mail.ru

Natal'ya O. Kopanitsa, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru