

УДК 624.01

ГАЛИЕВ Д. Н.
ГАЛИЕВА А. Б.
ГЕРАСИМОВА Е. С.
ВЛАСЕНКО В. Ю.
ЧИКИР М. В.

Исследование работы бетонных образцов, полученных при помощи аддитивных технологий



**Галиев
Денис
Нафисович**

аспирант кафедры
САПР ОС Института
строительства
и архитектуры УрФУ,
начальник производствен-
но-технического отдела
Комитета по строительству
Администрации
г. Екатеринбурга

e-mail: gdenisn@gmail.com

Статья посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния бетонных образцов, изготовленных методом послойного экструдирования бетонной смеси. На сегодняшний день аддитивное производство является инновационным решением возведения строительных конструкций и потому вопрос изучения действительной работы «напечатанных» конструкций и их расчета является весьма актуальным. В ходе проведенного исследования выполнено сравнение результатов натурных испытаний образцов с результатами компьютерного моделирования работы фрагмента несущей вертикальной строительной конструкции.

Ключевые слова: 3D-принтеры, 3D-печать, аддитивное производство, строительство, метод послойного экструдирования, бетонная смесь.

GALIEV D. N., GALIEVA A. B., GERASIMOVA E. S., VLASENKO V. Yu., CHIKIR M. V.
RESEARCH OF THE CONCRETE SPECIMENS BEHAVIOR, OBTAINED WITH ADDITIVE TECHNOLOGY

The article is devoted to the investigation of the stress-strain state of concrete samples made by the method of layering extrusion of a concrete mixture. Additive production is an innovative solution for the erection of building structures and therefore the issue of studying the actual operation of «printed» structures and their computation is very relevant. In the course of the study, a comparison between the results of laboratory tests of samples and the results of computer simulation of the work of a fragment of a bearing vertical building structure was made.

Keywords: 3D printers, 3D printing, additive production, construction, layering extrusion, concrete mix.



**Галиева
Анна
Борисовна**

старший преподаватель
кафедры САПР ОС
Института строительства
и архитектуры УрФУ

e-mail:
a.b.galieva@gmail.com



**Герасимова
Екатерина
Сергеевна**

старший преподаватель
кафедры Материаловеде-
ния в строительстве
Института новых материа-
лов и технологий УрФУ

e-mail:
es.gerasimova@yandex.ru



**Власенко
Валентина
Юрьевна**

студентка кафедры
САПР ОС Института
строительства
и архитектуры УрФУ

e-mail:
valusha-vartovsk@yandex.ru



**Чикир
Мария
Васильевна**

студентка кафедры
САПР ОС Института
строительства
и архитектуры УрФУ

e-mail: mary-catchikir2012@
yandex.ru



Иллюстрация 1. Общий вид пробы бетонной смеси: полное отсутствие крупного заполнителя. Фото Д. Н. Галиева. Апрель 2018 г.

Введение

В феврале 2017 г. на заседании президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России была утверждена дорожная карта Национальной технологической инициативы по развитию межотраслевого направления «Передовые производственные технологии» (ППТ), в число которых входят цифровое проектирование и моделирование, новые материалы, а также аддитивные технологии [1]. Последние стремительно набирают популярность не только за рубежом, но и на территории Российской Федерации. Новейшие достижения техники и технологий строительной 3D-печати позволяют возводить не только малые архитектурные формы, но и целые здания. Основные аспекты возведения домов с помощью аддитивных технологий, а также перспективы их развития в Российской Федерации подробно рассмотрены в работах [2–10]. Однако широкое применение строительной 3D-печати ограничивается отсутствием нормативной и законодательной базы.

Одним из предприятий в России, овладевшим технологиями 3D-печати в строительстве, стал Екатеринбургский Цементный завод. На данный момент предприятие имеет опыт возведения экспериментальных домов в г. Артемовский методом послойного нанесения бетонной смеси.

Целью настоящего исследования являлись оценка прочностных характеристик конструкций, напечатанных на 3D-принтере, и изучение применимости метода численного моделирования их работы под нагрузкой.

Методология проведения исследования

Для изучения напряженно-деформированного состояния конструкций Екатеринбургским Цементным заводом был предоставлен ряд образцов, изготовленных на строительном 3D-

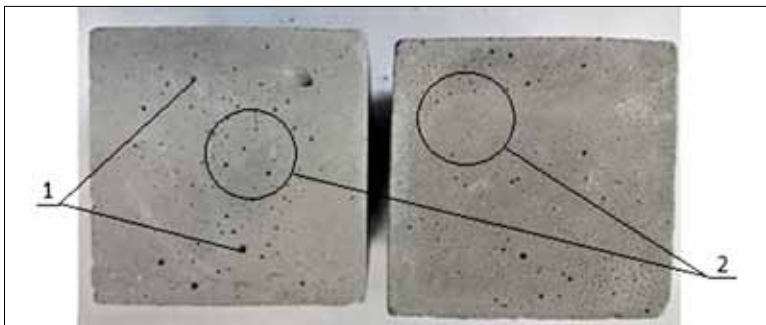


Иллюстрация 2. Макроструктура контрольных образцов: 1 — наличие пор; 2 — отсутствие крупного заполнителя. Фото Д. Н. Галиева. Апрель 2018 г.

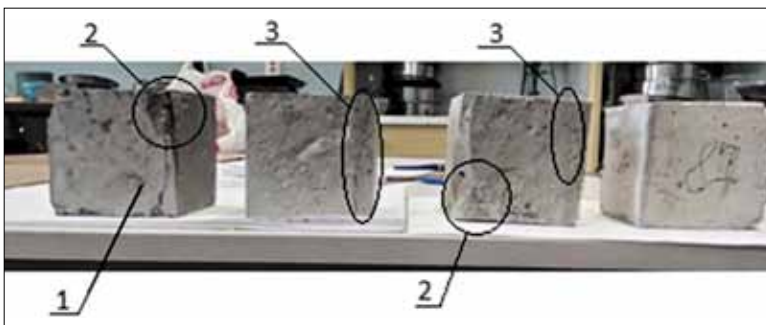


Иллюстрация 3. Внешний вид образцов-кубов после проведения лабораторных испытаний по определению прочности бетона: 1 — образец-куб; 2 — скол бетона по углам образца; 3 — неглубокие трещины. Фото Д. Н. Галиева. Апрель 2018 г.

принтере: кубы, призмы, фрагменты стен. В связи с тем, что состав рабочей смеси является коммерческой тайной предприятия, в качестве исходных данных он не был представлен для изучения. С целью определения прочностных характеристик бетона и последующего компьютерного моделирования произведены лабораторные испытания предоставленных образцов. Для изучения работы фрагментов стены также были произведены натурные исследования и определены значения разрушающей нагрузки. На следующем этапе работы в ходе компьютерного моделирования эти значения использовались в качестве прикладываемой к объекту исследования нагрузки.

Определение прочностных характеристик бетонных образцов

Для определения прочностных показателей бетона, используемого при 3D-печати на устройстве «3Dfnt Hand», предприятием «Екатеринбургский Цементный завод» были предоставлены образцы-кубы ($7 \times 7 \times 7$ см, 5 шт.) и образцы-призмы ($4 \times 4 \times 16$ см, 5 шт.). Испытания образцов проводились в лаборатории УрФУ.

Определение прочности бетонных образцов на сжатие и растяжение при изгибе проводилось по методике, регламентированной документом

[11]. Для определения предела прочности образцов при изгибе и сжатии образцов-призм применялся гидравлический пресс П-10. Испытание образцов-кубов произведено на прессе П-50 с наибольшей предельной нагрузкой — 500 кН.

Визуальный осмотр пробы бетонной смеси показал полное отсутствие крупного заполнителя, наличие мелкозернистого цемента и тонкодисперсного песка (Иллюстрация 1).

Визуальный осмотр опытных образцов показал, что структура образцов пористая, мелкозернистая (Иллюстрация 2).

Для проведения испытаний на сжатие согласно п. 6 [11] были отобраны 4 куба из 5, так как последний образец имел большие сколы бетона, отклонения от перпендикулярности граней друг относительно друга и неровности. Для испытаний на изгиб использовались все 5 призм.

Визуальный осмотр контрольных образцов после проведения испытаний на сжатие показал, что разрушенные образцы не получили существенных дефектов, приобрели лишь небольшие неглубокие трещины по поверхности и сколы бетона по углам. Образцы практически сохранили свой первоначальный вид, что говорит о высокой прочности используемой бетонной смеси (Иллюстрация 3).

Общий вид контрольных образцов-призм после проведения испытаний представлен на Иллюстрации 4.

По результатам испытаний, в соответствии с [12], расчетное сопротивление бетона, использованного при изготовлении образцов-кубов, составляет $R_b = 11,5$ МПа.

Испытание отдельных фрагментов стены

Исследуемые несущие вертикальные конструкции представляют собой стену с полостями, внутренний и наружный слой которой соединены между собой зигзагообразными ребрами жесткости (Иллюстрация 5).

Для установления зависимости результатов численного моделирования и лабораторных испытаний был отобран ряд образцов с различным количеством слоев (от 2 до 6).

Характер разрушения участка стены в два слоя:

наличие продольных трещин по торцам по всей высоте образца, небольших поперечных трещин по верхним граням, относительное сохранение целостности, значение разрушающей нагрузки составило $F = 105$ кН (Иллюстрация 6).

Характер разрушения участка стены в четыре слоя:

наличие сквозных продольных трещин, проходящих через все слои по всей высоте образца, небольших поперечных трещин по верхним граням, частичное сохранение целостности, сколы бетона на угловых участках, значение разрушающей нагрузки составило $F = 60$ кН (Иллюстрация 7).

Испытание больших фрагментов стены

Кроме того, были испытаны пяти- и шестислойные фрагменты стены с ребрами жесткости. При визуальном осмотре фрагментов стен до разрушения выявлены следующие особенности конструкций (Иллюстрация 8):

- характерный вид боковой поверхности образца свидетельствует о том, что экструдирование слоев рабочей смеси выполнено соплом при его движении в разных направлениях (один слой наносился при движении сопла слева направо, следующий — справа налево и т. д.);
- срез образцов по торцам показал, что различные участки фрагмента стены имеют разную структуру: часть образца является монолитной, без явно выраженного раз-

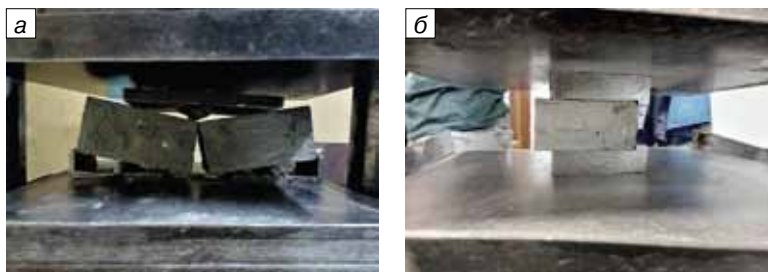


Иллюстрация 4. Разрушенный образец-призма: а — при испытании на изгиб; б — при испытании на сжатие по методике [11]. Фото Д. Н. Галиева. Апрель 2018 г.



Иллюстрация 5. Процесс возведения вертикальных несущих конструкций производителем бетонной смеси, предоставившим материалы для испытаний. Источник: сайт «3Dtoday» [Электронный ресурс]. URL: <http://3dtoday.ru> (дата обращения: 20.05.2018)

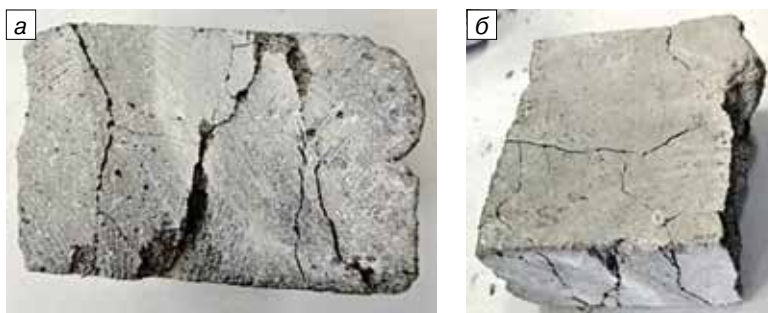


Иллюстрация 6. Разрушение контрольного образца двухслойного участка стены при испытании на сжатие: а — образование продольных трещин на торце образца; б — образование поперечных трещин на верхней грани образца. Фото Д. Н. Галиева. Апрель 2018 г.

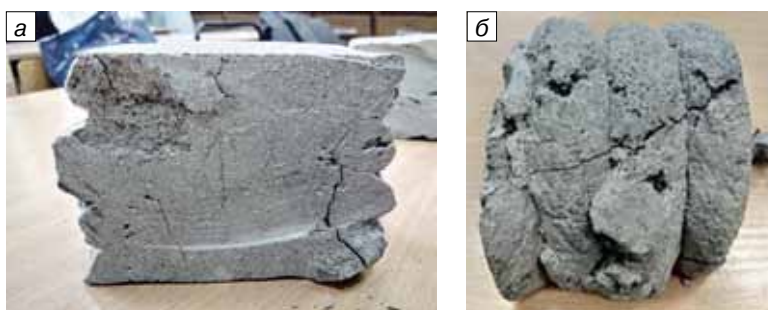


Иллюстрация 7. Разрушение контрольного образца участка стены в четыре слоя при испытании на сжатие: а — скол бетона в угловых участках образца и образование продольной трещины; б — образование продольной трещины. Фото Д. Н. Галиева. 2018 г.



Иллюстрация 8. Внешний вид больших фрагментов стены до разрушения при испытании на сжатие. Фото Д. Н. Галиева. Апрель 2018 г.



Иллюстрация 9. Характер разрушения шестислойного участка стены при испытании на сжатие. Фото Д. Н. Галиева. Апрель 2018 г.

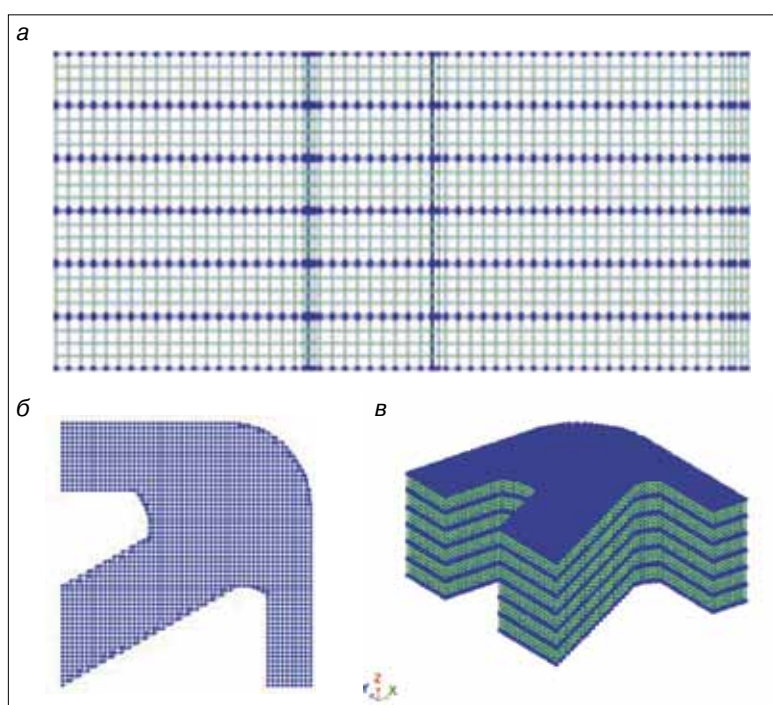


Иллюстрация 10. Расчетная модель участка стены из шести слоев бетонной смеси в ПК Лира-САПР: а — вид сбоку; б — вид сверху; в — изометрическая проекция. Автор Д. Н. Галиев. Апрель 2018 г.

деления на слои, другая часть, наоборот, имеет четкие границы слоев и отслаивание части слоев друг от друга;

- толщина слоя по длине фрагмента конструкции неравномерная;
- наличие деформированных нижних слоев конструкции свидетельствует о неравномерном застывании рабочей смеси.

Характер разрушения криволинейного участка стены из пяти слоев:

первые трещины появились на левом конце участка при нагрузке $F = 90 - 100$ кН, момент разрушения наступил при нагрузке $F = 195$ кН; имелись продольные и поперечные сквозные трещины, проходящие

через все слои, значительное разрушение участка стены с большими сколами и выкрашиванием бетона на одном из концов образца, большим количеством трещин в месте закругления. Другой конец участка остался целым и визуально выглядел как монолитная конструкция.

Характер разрушения криволинейного участка стены из шести слоев:

постепенное разрушение отдельных слоев происходило сверху вниз, ступенчато, первые трещины появились на криволинейном участке (Иллюстрация 9). Имелись также трещины на один слой, большие сколы бетона и продольные трещины на срезах образца, расслаивание конструкции

по границе слоев. Значение разрушающей нагрузки составило $F = 83$ кН.

Выводы по итогам лабораторных испытаний:

- 1 Материал конструкций, выполненных на 3D-принтере, имеет слоистую структуру и высокий уровень анизотропии.
- 2 Прочность конструкций в значительной мере зависит от количества слоев в ее составе и от их размеров.
- 3 Расслоение материала по границе слоев свидетельствует о низкой несущей способности для восприятия сдвиговых усилий в конструкции.
- 4 Прочностные характеристики образцов различных участков стены имеют значительные отличия при равных площадях оснований и количестве слоев.
- 5 Большинство трещин при разрушении ориентировано по направлению действия сжимающей силы.
- 6 Прочность целой стены значительно ниже прочности ее отдельных фрагментов. Связано это с технологическим перерывом при создании конструкции стены. Более позднее нанесение внутренних связующих элементов между внешними слоями стены существенно влияет на прочность конструкции (ненадежное схватывание бетона в месте сопряжения разных участков стены).

Моделирование фрагмента стены в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2013»

Для изучения напряженно-деформированного состояния исследуемых объектов в расчетном программном комплексе «Лира-САПР 2013» была создана расчетная модель в виде объемных элементов типа 231 (физически нелинейный параллелепипед) и 233 (физически нелинейная трехгранная призма). Каждый слой конструкции разделен на 4 ряда объемных элементов (Иллюстрация 10).

Работа слоев между собой замоделирована с помощью вспомогательных стержней, которые могут передавать только линейные усилия. Для моделирования такого взаимодействия слоев друг с другом были использованы стержневые конечные элементы конечной жесткости, один из узлов которых имеет шарнир u , другой — uz . Материал конструкции — бетон класса В20 (установлен по результатам лабораторных испытаний). При создании расчетной схемы учитывалась нелинейность материала путем задания кусочно-ли-

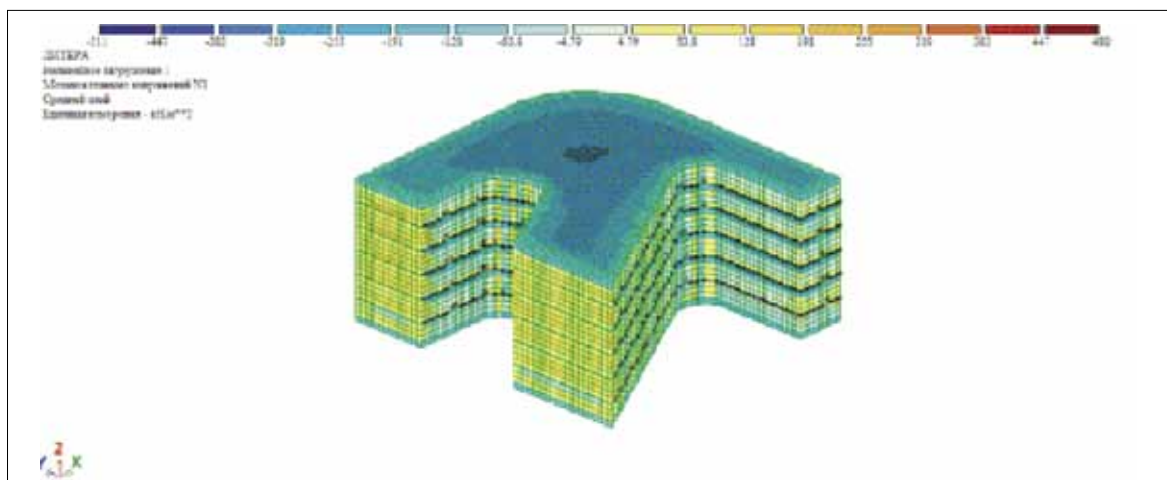


Иллюстрация 11. Изополя главных напряжений N1 по результатам расчета в ПК Ли́ра-САПР. Автор Д. Н. Галиев. Апрель 2018 г.

нейного закона деформирования бетона (на основании данных свода правил [12]).

К расчетной модели была приложена равномерно распределенная по поверхности нагрузка $1844,4 \text{ кН/м}^2$, полученная при испытании данного участка стены. Конструкция рассчитана шаговым методом с количеством шагов, равным 30.

Максимальное сжимающее напряжение по результатам расчета составило 511 кПа, максимальное растягивающее — 480 кПа (Иллюстрация 11).

Анализ результатов расчета в ПК Ли́ра-САПР

Анализируя результаты расчетов, выполненных в ПК «Ли́ра-САПР 2013», можно отметить следующее:

- 1 При приложении разрушающей нагрузки, полученной в результате натурных испытаний к расчетной модели в ПК «Ли́ра-САПР 2013», разрушения расчетной модели не происходит. Истощение несущей способности составило 53%.
- 2 Характер расположения концентрации напряжений по результатам расчета в ПК «Ли́ра-САПР 2013» в общем соответствует расположению трещин при разрушении образца по результатам натурных испытаний.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что предложенный подход к созданию конечно-элементной модели слоистой конструкции обеспечивает получение напряженно-деформированного состояния конструкции со схемой распределения внутренних усилий, близкой схеме расположения трещин в испытываемом образце при его разрушении. Однако, в связи со значительным запасом по несущей способности, физико-механические свойства материала в конечно-элементной модели должны быть уточнены.

Заключение

Проведенные испытания и моделирование работы конструкций, созданных с помощью 3D-принтера, позволили сделать следующие выводы:

- 1 Применение методики, описанной в документе [11], для определения прочностных характеристик конструкций, напечатанных на строительном 3D-принтере, дает результаты, не учитывающие ряд свойств материала и его неоднородность, что приводит к значительному расхождению результатов расчета в ПК Ли́ра-САПР с результатами испытаний.
- 2 Картина распределения главных напряжений по итогам расчета конечно-элементной модели в целом соот-

ветствует расположению трещин в образцах при разрушении, что в общем соответствует реальной работе конструкции под нагрузкой.

- 3 Для уточнения данных о физико-механических характеристиках материала конструкций, напечатанных на строительном 3D-принтере, необходимо проведение большего числа испытаний, а также разработать индивидуальный метод определения прочностных характеристик таких материалов.
- 4 Для исследования прочностных характеристик материала и уменьшения влияния неоднородности необходимо совершенствование рецептуры бетонной смеси и технологии ее нанесения.

Обобщая результаты проведенного исследования, следует отметить, что для определения прочностных характеристик материалов конструкций, напечатанных на 3D-принтере, необходимо разработать индивидуальную методику, более точно отражающую реальную работу конструкций, с созданием графиков работы материала, и учитывающую значительную неоднородность материала. За основу этой методики может быть принят метод, описанный в документе [11].

Предложенный в настоящем исследовании метод создания конечно-элементной модели в ПК «Ли́ра-САПР 2013» может быть взят за основу для проведения новых исследований в этой сфере и в целом отражает реальную работу конструкции под нагрузкой.

Список использованной литературы

- 1 Национальная технологическая инициатива (НТИ) [Электронный ресурс]. — URL: <http://fea.ru/compound/nationaltechnology-initiative> (дата обращения: 25.05.2018).
- 2 Brooks H. Research towards high speed extrusion freeforming / H. Brooks, M. E. Lupeanu, B. Piorkowski // International Journal of Rapid Manufacturing. — 2013. — Vol. 3. — № 2–3. — P. 154–171.
- 3 Perrot A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures / A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre // Materiauxet Constructions. — 2016. — Vol. 49. — P. 1213–1220.
- 4 Gosselin C. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete — a new processing route for architects and builders / C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux et al. // Materials & Design. — 2016. — Vol. 100. — P. 102–109.

- 5 Лунова Д. А. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития / Д. А. Лунова, Е. О. Коженикова, С. В. Калошина // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 8. — № 1. — С. 90–101. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.08
- 6 Далинчук В. С. Основные аспекты печати домов с помощью 3D-принтера / В. С. Далинчук, Д. А. Власенко // Инновационное развитие. — 2016. — № 2 (2). — С. 6–13.
- 7 Демиденко А. К. Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации / А. К. Демиденко, А. В. Кулибаба, М. Ф. Иванов // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2017. — № 12. — С. 71–96.
- 8 Леонова А. Н. Инновационное строительство зданий и сооружений с помощью 3D-принтера / А. Н. Леонова, Т. К. Мегедь, М. Ю. Согонова // Бюлл. науки и практики. — 2018. — Т. 4. — № 5. — С. 285–289 [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.bulletennauki.com/leopova> (дата обращения: 15.05.2018).
- 9 Рудяк К. А. Возведение зданий методом послойного экструдирования / К. А. Рудяк, Ю. О. Чернышев // Современные концепции развития науки: Сб. статей междунар. науч.-практ. конф. (20 августа 2016 г., г. Казань): в 2 ч. — Уфа: АЭТЕРНА, 2016. — Ч. 1. — С. 147–151.
- 10 Петренева О. В. Проблемы внедрения инновационных технологий и материалов в строительстве / О. В. Петренева, В. О. ПикULEVA, А. В. Юшманов // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. — 2015. — № 5. — Ч. 2. — С. 1–7 [Электронный ресурс]. — URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=5&s=274> (дата обращения: 15.05.2018).
- 11 ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам/Госстрой России. — М.: Стандартинформ, 2013. — 37 с.
- 12 СП 63.13330.2016. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. — М.: ООО «Аналитик». — 157 с.
- 6 Dalinchuk V.S. Osnovnye aspekty pechati domov s pomoshch'yu 3D-printera / V.S. Dalinchuk, D.A. Vlasenko // Innovacionnoe razvitie. — 2016. — № 2 (2). — С. 6–13.
- 7 Demidenko A.K. Perspektivy primeneniya 3D-pechati v stroitel'nom komplekse Rossijskoj Federacii / A.K. Demidenko, A.V. Kulibaba, M.F. Ivanov // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. — 2017. — № 12. — С. 71–96.
- 8 Leonova A.N. Innovacionnoe stroitel'stvo zdaniy i sooruzhenij s pomoshch'yu 3D-printera / A.N. Leonova, T.K. Meged', M.Yu. Sogonova // Byull. nauki i praktiki. — 2018. — Т. 4. — № 5. — С. 285–289 [Elektronnyj resurs]. — URL: <http://www.bulletennauki.com/leonova> (data obrashcheniya: 15.05.2018).
- 9 Rudyak K.A. Vozvedenie zdaniy metodom poslojnogo ehkstrudirovaniya / K.A. Rudyak, Yu.O. Chernyshev // Sovremennye koncepcii razvitiya nauki: Sb. statej mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (20 avgusta 2016 g., g. Kazan'): v 2 ch. — Ufa: AEHTERNA, 2016. — Ch. 1. — С. 147–151.
- 10 Petrenova O.V. Problemy vnedreniya innovacionnyh tekhnologij i materialov v stroitel'stve / O.V. Petrenova, V.O. Pikuleva, A.V. Yushmanov // Stroitel'stvo i arhitektura. Opyt i sovremennye tekhnologii. — 2015. — № 5. — CH. 2. — С. 1–7 [Elektronnyj resurs]. — URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=5&s=274> (data obrashcheniya: 15.05.2018).
- 11 GOST 10180–2012. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam/Gosstroj Rossii. — M.: Standartinform, 2013. — 37 s.
- 12 SP 63.13330.2016. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redakcija SNiP 52-01-2003. — M.: ООО «Аналитик». — 157 s.

Spisok ispol'zovannoj literatury

- 1 Nacional'naya tekhnologicheskaya iniciativa (NTI) [Elektronnyj resurs]. — URL: <http://fea.ru/compound/nationaltechnology-initiative> (data obrashcheniya: 25.05.2018).
- 2 Brooks H. Research towards high speed extrusion freeforming / H. Brooks, M.E. Lupeanu, B. Piorkowski // International Journal of Rapid Manufacturing. — 2013. — Vol. 3. — № 2–3. — P. 154–171.
- 3 Perrot A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures / A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre // Materiaux et Constructions. — 2016. — Vol. 49. — P. 1213–1220.
- 4 Gosselin C. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete — a new processing route for architects and builders / C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux et al. // Materials & Design. — 2016. — Vol. 100. — P. 102–109.
- 5 Luneva D.A. Primenenie 3D-pechati v stroitel'stve i perspektivy ee razvitiya / D.A. Luneva, E.O. Kozhevnikova, S.V. Kaloshina // Vestn. Perm. nac. issled. politekhn. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura. — 2017. — Т. 8. — № 1. — С. 90–101. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.08