

УДК 624.01

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

## Особенности структуры бетона элемента конструкции, выполненной по аддитивной технологии

О.В. Кабанцев<sup>1\*</sup>, А.В. Карлин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация  
\*akarlinmgsu@yandex.ru

**Ключевые слова:** бетон, аддитивная технология, механизм разрушения, прочность бетона, прочность контактного взаимодействия, эффективная прочность.

### История статьи

Поступила в редакцию: 09.11.2022

Доработана: 15.11.2022

Принята к публикации: 21.11.2022

### Для цитирования

Кабанцев О.В., Карлин А.В. Особенности структуры бетона элемента конструкции, выполненной по аддитивной технологии // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 55–63.

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности строения бетона в конструкции, выполненной по аддитивной технологии (3-D печать). Исследован результат формообразования конструкции при применении метода 3-D печати. По результатам экспериментальных исследований выявлены особенности формирования бетонного тела конструкции, выполняемой по аддитивной технологии. Установлены особенности структуры бетона, образующиеся в теле бетона при применении аддитивной технологии. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методики экспериментальных исследований эффективных механических характеристик бетона, а также в исследованиях по определению коэффициентов условий работы бетона в конструкциях, выполненных по аддитивной технологии.

## Features of the Concrete Structure of the Structural Element Made by Additive Technology

Oleg V. Kabantsev<sup>1</sup>, Aleksey V. Karlin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoeshosse, Moscow, 129337, Russian Federation

\*akarlinmgsu@yandex.ru

**Keywords:** concrete, additive technology, destruction mechanism, concrete strength, contact strength, effective strength

**Abstract.** The article discusses the features of the structure of concrete in a structure made using additive technology (3-D printing). The result of the formation of the structure when using the 3-D printing method is investigated. According to the results of experimental studies, the features of the formation of the concrete body of the structure performed using additive technology are revealed.

**Кабанцев Олег Васильевич**, доктор технических наук, директор дирекции научно-технических проектов, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARYSPIN-код: 2114-1185, Scopus: 15055871000, ORCID: 0000-0001-9907-8470, E-mail: ovk531@gmail.com.

**Карлин Алексей Владимирович**, инженер НОЦ «Геотехника», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; E-mail: akarlinmgsu@yandex.ru.

© Кабанцев О.В., Карлин А.В., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Article history**

Received: 09.11.2022

Revised: 15.11.2022

Accepted: 21.11.2022

**For citation**

Kabantsev O.V., Karlin A.V. Features of the Concrete Structure of the Structural Element Made by Additive Technology. *Reinforced concrete structures*. 2023;1(1):55–63.

The features of the concrete structure formed in the concrete body when using additive technology are established. The results obtained can be used in the development of methods for experimental studies of effective mechanical characteristics of concrete, as well as in studies to determine the coefficients of concrete working conditions in structures made using additive technology.

**ВВЕДЕНИЕ**

Традиционная технология изготовления железобетонных конструкций, в рамках которой предусматривается процедура уплотнения бетонной смеси, обеспечивает формирование достаточно однородного бетонного тела конструкции с минимальными объемами неплотностей. Действующими нормами предусматривается контроль однородности бетонной смеси, что является одним из инструментов, обеспечивающих возможность использования в расчетном обосновании характеристик прочности и деформативности бетона, соответствующих модели однородного деформируемого тела. Особенности работы бетона в теле конструкции учитываются современными нормами путем введения соответствующих коэффициентов условий работы. Так, например влияние метода изготовления вертикальных бетонных (железобетонных) элементов при высоте бетонирования более 1,5 м на однородность тела бетона учитывается путем введения коэффициента  $\gamma_{b3}=0,85$ . Необходимо подчеркнуть, что современная действующая система характеристик прочности и коэффициентов надежности, установленная нормами и используемая при расчете бетонных (железобетонных) конструкций сформировалась на основе большого числа экспериментальных исследований, выполненных как на стандартных образцах, так и на экспериментальных конструкциях, выполненных по традиционной технологии бетонирования. Таким образом, использование существующих в настоящее время методов нормирования механических характеристик бетонных (железобетонных) конструкций не может быть признано приемлемым и корректным для новых видов изготовления как отдельных элементов, так и несущих систем в целом.

К новым технологиям изготовления бетонных, а в отдельных случаях - железобетонных конструкций, относится аддитивное строительное производство, или строительная 3D-печать бетоном (3DCP – от англ. 3D Concrete). Эта технология представляется весьма перспективной, так как в ее основе лежит идея минимизации участия человека в производстве с существенным расширением зоны применения робототехники в целом и использования цифровых технологий, в частности. Применение аддитивных технологий при возведении зданий с широкой роботизацией строительных процессов обусловлен задачами сокращения трудозатрат квалифицированного персонала непосредственно на строительной площадке [1-4], а также реальными возможностями по реализации различных архитектурных форм и объемно-планировочных решений (Рис. 1) при использовании однородного оборудования [5-7]. Возросший интерес к аддитивным строительным технологиям подтверждается ежегодно увеличивающимся в среднем на 70% (по данным международной реферативной базы научного цитирования Scopus) числом публикаций, посвященных 3DCP. Однако подавляющее большинство таких публикаций не рассматривает проблему корректного определения механических характеристик бетона, реализующихся в конструкции, выполненной с применением аддитивных технологий.

*Oleg V. Kabantsev*, Doctor of Technical Sciences, Director of the Directorate of Scientific and Technical Projects, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), 129337, Moscow, Yaroslavlshosse, 26; eLIBRARYSPIN code: 2114-1185, Scopus: 15055871000, ORCID: 0000-0001-9907-8470, E-mail: ovk531@gmail.com.

*Aleksey V. Karlin*, engineer, REC "Geotechnics", National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), 129337, Moscow, Yaroslavlshosse, 26; E-mail: [akarlinmgsu@yandex.ru](mailto:akarlinmgsu@yandex.ru).

По существу, технологические проблемы 3DCP-метода рассматриваются научным сообществом в качестве основных, что не может быть признано обоснованным: даже при всех успешно решенных технологических вопросах остается нерешенной проблема расчета и обоснования надежности конструкций, при изготовлении которых отсутствует процедура уплотнения бетонной смеси, а также (в случае многорядной 3D-печати) неопределенности при взаимодействии рядов в составе одной конструкции что приводит к выраженной неоднородности тела бетона в конструкции.



**Рис. 1.** Примеры возможностей 3DCP-технологии в реализации архитектурных форм и объемно-планировочных решений зданий (фото из общедоступных источников)

**Figure 1.** Examples of the possibilities of 3DCP technology in the implementation of architectural forms and space-planning solutions for buildings (photo from publicly available sources)

На необходимость учета особых механических характеристик зон неоднородностей в монолитных железобетонных конструкциях (зоны рабочих швов) указывается в [8], где приведено детальное описание влияния эффекта нарушения сплошности бетона на формирование напряженно-деформированного состояния конструкции.

Вопросы вариативности механических характеристик бетона в конструкциях, выполненных с применением 3DCP-метода, рассмотрены в [9-11], но в указанных работах исследовано влияние направления прикладываемой нагрузки относительно слоев печати.

В работе [12] приводятся результаты исследования влияния применения 3DCP-метода на формирование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона. По результатам исследования установлено, что средняя прочность при осевом сжатии образцов, выбуренных из массива, выполненного по технологии 3D-печати, на 15-27% ниже, чем у образцов, выбуренных из массива, выполненного по традиционной технологии монолитного бетонирования. Приводятся также и данные по измеренным плотностям различных зон бетона массива, выполненного по технологии 3D-печати. Показано, что технология 3DCP формирует бетонное тело конструкции с существенно меньшим уплотнением при использовании наиболее распространенной технологии 3D-печати с вертикальной экструзией.

Таким образом, анализ опубликованных в открытой печати материалов показывает, что в настоящее время отсутствуют исследования особенностей строения бетонного массива конструкции, выполненной по технологии 3D-печати, результаты которых позволят сформулировать общие принципы определения действительных механических характеристик бетона, работающего в конструкции, которая выполнена по 3DCP-технологии. Знание таких действительных механических характеристик необходимо при расчетных обоснованиях несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций, выполняемых по методу предельных состояний [13], в рамках которого особенности работы материалов в конструкциях различного вида может быть учтено как прямым нормированием механических характеристик, так и методом применения частных коэффициентов надежности (коэффициентов условий работы).

## МЕТОД

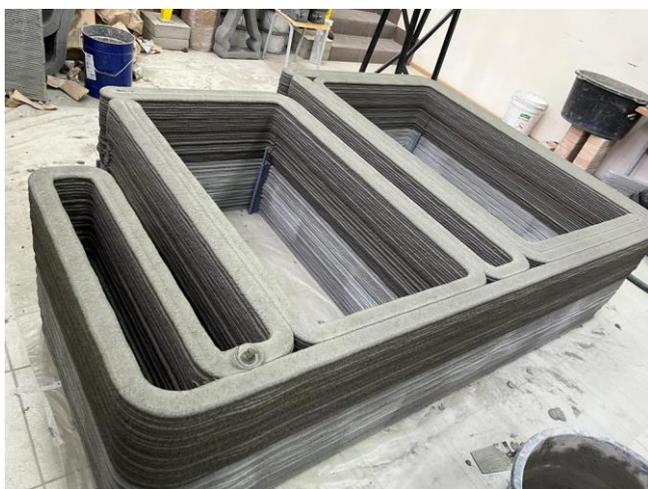
Для реализации поставленных задач предусмотрено проведение экспериментальных исследований структуры бетона конструкций, выполняемых по 3DCP-технологии.

Методикой предусматривается выполнение по технологии 3D-печати бетоном по одно, двух и трехрядных фрагментов конструкций (рис. 2-4), из которых дисковой пилой выпиливаются фрагменты для анализа структуры бетона.



**Рис. 2.** Фрагмент конструкции, выполненный по технологии 3D-печати бетоном с однорядным проходом печатающей головки

**Figure 2.** A fragment of a structure made using 3D-printing technology with concrete with a single-row pass of the print head



**Рис. 3.** Фрагмент конструкции, выполненный по технологии 3D-печати бетоном с однорядным и двухрядным проходом печатающей головки

**Figure 3.** A fragment of a structure made using 3D printing technology with concrete with a single-row and a double-row pass of the print head



**Рис. 4.** Фрагмент конструкции, выполненный по технологии 3D-печати бетоном с трехрядным проходом печатающей головки

**Figure 4.** A fragment of a structure made using 3D printing technology with concrete with a three-row pass of the print head

Для выполнения экспериментальных фрагментов по технологии 3D-печати использовалась специальная бетонная смесь, дисперсно армированная полимерными волокнами, разработанная для использования в исследованиях [12].

Изготовление образцов по технологии аддитивного строительного производства осуществлялось при помощи портального строительного 3D-принтера «АМТ» S-6045M при следующих параметрах печати: тип подачи материала для АСП – шнековый; высота печатного слоя – 1 см; ширина печатного слоя – 5 см. Скорость подачи смеси подбиралась с учетом исключения разрывов слоя и недопущения наплывов бетонной смеси по краям изготавливаемой конструкции.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрены образцы, выпиленные дисковой пилой из конструкций, сформированных при одно-, двух- и трехрядном проходе печатающей головки принтера.

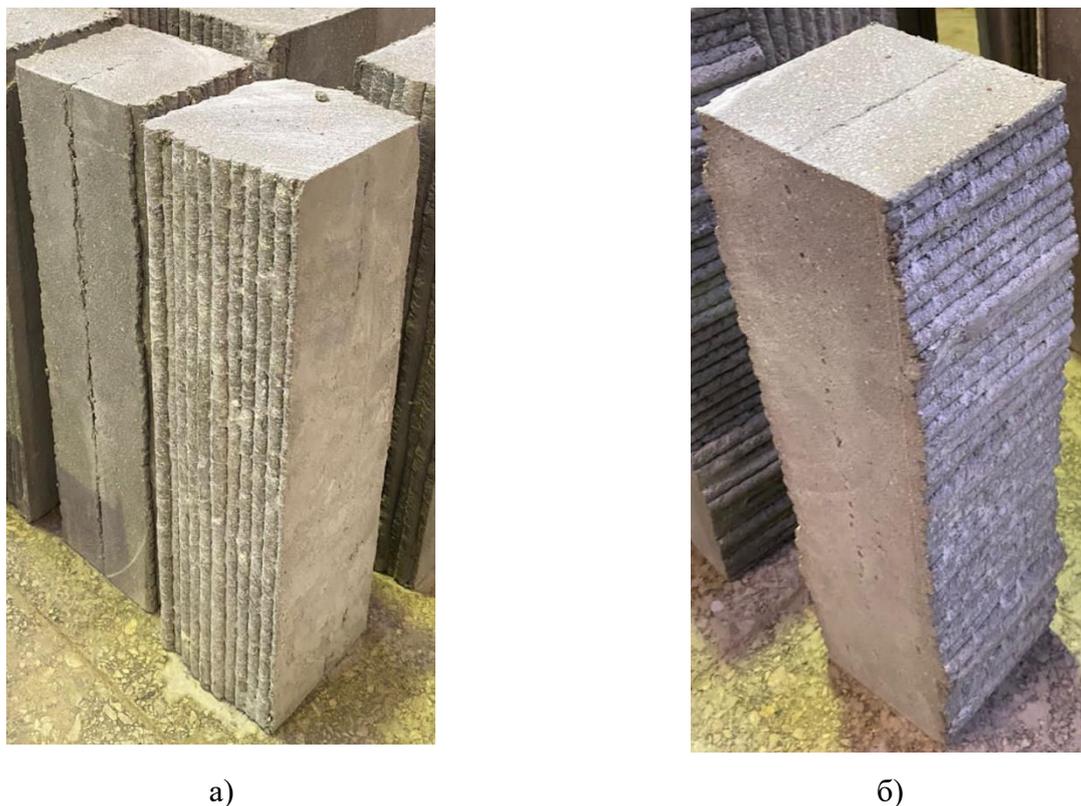
Образцы, изготовленные при однорядном проходе печатающей головки, демонстрируют достаточно высокую однородность тела бетона. Видимых зон нарушения сплошности не обнаружено. Однако наружные грани образцов имеют существенные отклонения от плоскости, так как наружные плоскости образца формируются дискретными слоями, каждый из которых имеет некоторое смещение относительно нижележащего слоя. Таким образом, методика определения площади поперечного сечения образца, а затем и конструктивного элемента, должна учитывать отклонение внешних границ слоев от номинала.

Из конструкции, изготовленной при двухрядном проходе печатающей головки, подготовлены образцы в виде призм с различным направлением слоев укладки бетона: слои, параллельные длинной стороне призмы (рис. ба), и слои, параллельные короткой стороне призмы (рис. бб).



**Рис. 5.** Образцы, изготовленные при однорядном проходе печатающей головки

**Figure 5.** Specimens made with a single-row pass of the printhead



**Рис. 6.** Образцы, изготовленные при двухрядном проходе печатающей головки: а) - слои, параллельные длинной стороне призмы, б) - слои, параллельные короткой стороне призмы  
**Figure 6.** Specimens made with a two-row pass of the print head: а) - layers parallel to the long side of the prism, б) - layers parallel to the short side of the prism

При обследовании образцов, изготовленных при двухрядном проходе печатающей головки, установлено, что в пределах ширины слоя видимые зоны нарушения сплошности бетона отсутствуют. Однако такие зоны нарушения сплошности наблюдаются по всей длине участка контакта между рядами (рис. 7). Такие зоны нарушения сплошности будут оказывать влияние на уровень несущей способности конструкций, выполненных по 3DCP-технологии. При этом степень влияния таких несплошностей может быть различна для разных схем напряженно-деформированного состояния конструкции, что требует отдельного изучения указанного явления.

Наружные плоскости образцов, сформированные при двухрядной технологии 3D-печати, также имеют значимые отклонения от номинальной наружной плоскости образца, что соответствует картине, наблюдаемой при однорядной технологии формирования конструкций.

Результаты обследования структуры бетона образцов, изготовленных при трехрядном проходе печатающей головки, совпадают, в целом, с приведенными выше результатами анализа структуры бетона, образцов, изготовленных при двухрядном проходе печатающей головки.

Необходимо отметить, что в рамках исследования установлены факты разрушения образцов по линии контакта слоев при минимальных воздействиях на образец, связанных с монтажными нагрузками (рис. 8), что свидетельствует о пониженной прочности адгезионного взаимодействия слоев. Установленный факт вступает в некоторое противоречие с результатами работы [12], в рамках которой показано, что прочность на растяжение при раскалывании у образцов, приготовленных из конструкций, выполненных по технологии 3D-печати, превышает аналогичный параметр образцов из монолитного бетона. Вероятно, такой результат мог быть получен при испытаниях бетона, расположенного в пределах слоя печати.



**Рис. 7.** Зона нарушения сплошности бетона, приуроченная к зоне контакта рядов при многорядной технологии изготовления конструкции

**Figure 7.** Concrete discontinuity zone confined to the row contact zone with multi-row construction technology



**Рис. 8.** Разрушение образца, выполненного по двухрядной технологии 3D-печати, по линии контакта слоев

**Figure 8.** Destruction of a sample made using two-row 3D printing technology along the line of contact between the layers

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований образцов, отобранных из конструкций, изготовленных по технологии 3D-печати, установлено:

1. В пределах толщины слоя наблюдается однородный бетон без видимых проявлений дефектов, неплотностей и неоднородностей.

2. Наружная плоскость конструкций, изготовленных по технологии 3D-печати, имеют существенные отклонения от номинальной плоскости, так как такие плоскости формируются дискретными слоями, каждый из которых имеет некоторое смещение относительно нижележащего слоя. Методика определения площади поперечного сечения образца, а в последствии и конструктивного элемента, должна учитывать отклонение внешних границ слоев от номинала

3. При многорядной технологии изготовления конструкции методом 3D-печати установлено, что формируются выраженные зоны нарушения сплошности конструкции, приуроченные к участкам контакта рядов, что, несомненно, будет оказывать влияние на уровень несущей способности конструкций, выполненных по 3DCP-технологии. В рамках дальнейших исследований необходимо установить параметры таких нарушений сплошности, степень их влияния на несущую способность конструкции при различных видах напряженно-деформированного состояния.

4. Установлено, что по линии контакта слоев конструкции, изготовленной по 3DCP-технологии, наблюдаются разрушения образцов, что свидетельствует о пониженной прочности адгезионного взаимодействия слоев. Это явление также требует отдельного исследования, так как снижение контактной прочности слоев может оказать негативное воздействие на уровень несущей способности конструкции, находящейся в условиях двухосного напряженного состояния.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность коллегам А.П. Пустовгару и А.О. Адамцевичу за взаимодействие и помощь в проведении исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naoum S. Factors influencing labor productivity on construction sites // *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2016. Vol. 65 (3), pp. 401–421. DOI: 10.1108/IJPPM-03-2015-0045.
2. Nasir H., Ahmed H., Haas C., Goodrum P.M. An analysis of construction productivity differences between Canada and the United States // *Construction Management and Economics*. 2013, pp. 595–607, 2013. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.848995>.
3. Reinventing Construction: a route to higher productivity. McKinsey Global Institute analysis. 2017.
4. Mischke J. Reinventing construction: a route to higher productivity. McKinney Global Institute. Construction: Let's build changes! 2017.
5. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 30. 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>.
6. Panda B., Tay Y.W.D., Paul S.C., Tan M.J. Current challenges and future potential of 3D concrete printing: aktuelle Herausforderungen und Zukunftspotenziale des 3D-Druckens bei Beton // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2018. Vol. 49 (5), pp. 666–673. DOI: 10.1002/mawe.201700279.
7. Wangler T., Roussel N., Bos F.P., Salet T.A.M., Flatt R.J. Digital concrete: a review // *Cem. Concr. Res.* 2019. 123, p. 105780, 10.1016/j.cemconres.2019.105780.
8. Колчунов В.И., Колчунов Вл.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 8. С 54-60.
9. Feng P., Meng X., Chen J., Ye L. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93, pp. 486–497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>.
10. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 119, pp. 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>.
11. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. Hardened properties of high-performance printing concrete // *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Iss. 3, pp. 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>.
12. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П. Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>
13. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., Пичугин С.Ф. Основы метода расчетных предельных состояний. М.: Издательство СКАД СОФТ, Издательство АСВ, 2019 – 240 с.

### REFERENCES

1. Naoum S. Factors influencing labor productivity on construction sites. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2016. Vol. 65(3), pp. 401–421. DOI: 10.1108/IJPPM-03-2015-0045.
2. Nasir H., Ahmed H., Haas C., Goodrum P.M. An analysis of construction productivity differences between Canada and the United States. *Construction Management and Economics*. 2013, pp. 595–607, 2013. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.848995>.
3. Reinventing Construction: a route to higher productivity. McKinsey Global Institute analysis. 2017.
4. Mischke J. Reinventing construction: a route to higher productivity. McKinney Global Institute. Construction-tion: Let's build changes! 2017.
5. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*. 2019 Vol. 30. 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>.
6. Panda B., Tay Y.W.D., Paul S.C., Tan M.J. Current challenges and future potential of 3D concrete printing: aktuelle Herausforderungen und Zukunftspotenziale des 3D-Druckens bei Beton. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2018 Vol. 49 (5), pp. 666–673. DOI: 10.1002/mawe.201700279.
7. Wangler T., Roussel N., Bos F.P., Salet T.A.M., Flatt R.J. Digital concrete: a review. *Cem. Concr. Res.* 2019. 123, p. 105780, 10.1016/j.cemconres.2019.105780.
8. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformation models of reinforced concrete under special effects. *Industrial and civil construction*. 2018. No. 8. P. 54-60.
9. Feng P., Meng X., Chen J., Ye L. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93, pp. 486–497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>.

10. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*. 2019 Vol. 119, pp. 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>.
11. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. Hardened properties of high-performance print-ing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Iss. 3, pp. 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>.
12. Adamtsevich A.O., Pustovgar A.P. Additive building production: study of the effect of anisotropy of the strength characteristics of concrete. *Stroitelnye materialy*. 2022. No. 9. P. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>
13. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V., Pichugin S.F. Fundamentals of the method of calculated limit states. М.: Publishing house SKAD SOFT, Publishing house ASV, 2019 – 240 p.