

Радайкин Олег Валерьевич

*доктор технических наук, профессор, Казанский Государственный
Энергетический Университет, г. Казань*

Шавалеев Данис Ильфакович

*аспирант, Казанский Государственный Энергетический Университет, г.
Казань*

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ В КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕН, ВОЗВОДИМЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

Аннотация. Аддитивные технологии в строительстве, в частности 3D-печать бетоном, открывают новые перспективы в области автоматизации, снижения затрат и реализации сложных архитектурных форм. Однако широкое внедрение данной технологии сдерживается необходимостью обеспечения надежности и долговечности конструкций, особенно железобетонных стен. Ключевым инструментом для прогнозирования поведения таких конструкций является компьютерное моделирование. В данной статье систематизированы основные проблемы, возникающие на различных этапах численного моделирования несущей способности и деформативности стен, напечатанных методом 3D-печати. Рассмотрены проблемы, связанные с анизотропией материала, моделированием межслойной адгезии, учетом армирования и выбором подходящих конститутивных моделей. Анализ проводится на основе современных российских и зарубежных исследований.

Ключевые слова: 3D-печать бетоном, аддитивное строительство, компьютерное моделирование, метод конечных элементов (МКЭ), железобетон, анизотропия, межслойная адгезия, дискретное армирование.

Abstract. Additive technologies in construction, in particular 3D printing with concrete, open up new perspectives in the field of automation, cost reduction and implementation of complex architectural forms. However, the widespread adoption of

this technology is hampered by the need to ensure the reliability and durability of structures, especially reinforced concrete walls. Computer modeling is a key tool for predicting the behavior of such structures. This article systematizes the main problems that arise at various stages of numerical modeling of the bearing capacity and deformability of 3D-printed walls. The problems related to the anisotropy of the material, modeling of interlayer adhesion, taking into account reinforcement and the choice of suitable constitutive models are considered. The analysis is based on modern Russian and foreign research.

Keywords: 3D printing with concrete, additive construction, computer modeling, finite element method (FEM), reinforced concrete, anisotropy, interlayer adhesion, discrete reinforcement.

Технология аддитивного строительства постепенно переходит из разряда экспериментальных в категорию практически применимых. Одним из наиболее перспективных направлений является послойная экструзия бетонной смеси для возведения несущих стеновых конструкций [1]. Однако гетерогенная природа напечатанного бетона, обусловленная технологическим процессом, вносит значительные сложности в прогнозирование механического поведения конструкций. Традиционные методы расчета железобетона, заложенные в нормативных документах (например, СП 63.13330.2018), не учитывают специфику аддитивного производства, что делает компьютерное моделирование незаменимым инструментом для анализа и проектирования. Несмотря на активное развитие вычислительных методов, существует ряд нерешенных проблем, препятствующих созданию высокоточных и надежных моделей.

1. Проблема учета анизотропии механических свойств

Основная особенность напечатанного бетона — ярко выраженная анизотропия прочностных и деформационных характеристик. Механические свойства материала в направлении, параллельном слоям (X-Y), могут существенно отличаться от свойств в перпендикулярном направлении (Z) из-за наличия пор, границ раздела между слоями и технологических швов [2].

- **Вычислительная сложность:** Моделирование конструкции как ортотропного тела требует определения большого количества параметров (модули упругости, коэффициенты Пуассона, пределы прочности при различных видах напряженного состояния для каждого главного направления), получение которых требует обширного комплекса экспериментов.

- **Отсутствие универсальных моделей:** Большинство современных конститутивных моделей для бетона в ПК (например, PLAXIS, ANSYS, LS-DYNA) изначально разрабатывались для изотропных материалов. Их адаптация для учета анизотропии часто требует нестандартных пользовательских решений (написания дополнительных подпрограмм), что повышает порог вхождения и сложность анализа [3].

2. Моделирование межслойного взаимодействия и адгезии

Прочность связи между последовательно уложенными слоями является критическим параметром, определяющим как прочность конструкции на сдвиг и отрыв, так и ее долговечность (в частности, устойчивость к проникновению влаги).

- **Выбор модели контакта:** В МКЭ межслойную границу часто моделируют с помощью когезионных контактных элементов (Cohesive Zone Model, CZM) или элементов с нулевой толщиной [4]. Однако точное определение параметров этих моделей (жесткость, прочность на сдвиг и отрыв, энергия разрушения) крайне затруднено, так как они зависят от множества технологических факторов: времени между укладкой слоев, реологии смеси, температуры и влажности окружающей среды [5].

- **Валидация моделей:** существует разрыв между лабораторными испытаниями малых образцов на межслойное скалывание и адекватным переносом этих данных на масштаб полноразмерной конструкции. Китайские исследователи отмечают, что прочность на межслойный сдвиг может снижаться на 20-50% по сравнению с прочностью монолитного материала, и этот разброс сложно предсказать численно.

3. Интеграция армирования в расчетную модель

В отличие от традиционного монолитного строительства, где арматура представляет собой непрерывный каркас, армирование в 3D-печати часто является дискретным (стержни, закладываемые вручную в межслойное пространство) или непрерывным, но накладываемым отдельно (сетки, наплавка арматуры роботами).

- **Моделирование дискретного армирования:** Размещение отдельных стержней или сегментов арматуры между слоями создает крайне неоднородную структуру. Моделирование каждого стержня в масштабе всей стены приводит к огромному количеству элементов и контактов, что делает расчеты чрезвычайно ресурсоемкими.

- **Учет неидеального сцепления:** Сцепление между бетоном и арматурой в напечатанных конструкциях отличается от такового в монолитных из-за наличия межслойных границ и возможных пустот. Стандартные модели связи, используемые в МКЭ, требуют модификации, что подтверждается российскими исследованиями [6].

4. Моделирование процесса печати и возникновения технологических напряжений

Компьютерное моделирование не должно ограничиваться анализом готовой конструкции. Важной проблемой является симуляция самого процесса печати, который сопровождается:

- Быстрым изменением реологических свойств смеси (от вязко-жидкого состояния до твердого тела).
- Накоплением остаточных напряжений из-за усадки бетона, гравитационных нагрузок на нижние слои и температурных деформаций.
- Риском потери устойчивости еще не затвердевших слоев [7].

Данная задача требует использования реологических моделей и методов пошагового анализа в геометрически нелинейной постановке, что представляет собой вычислительную задачу высочайшей сложности.

Таким образом, компьютерное моделирование железобетонных стен, возводимых методом 3D-печати, сталкивается с комплексом взаимосвязанных

проблем, корнящихся в специфике аддитивного производства. Основные проблемы включают в себя:

1. Необходимость учета анизотропии материала и разработки адекватных ортотропных конститутивных моделей.
2. Сложность описания и параметризации межслойного контакта.
3. Трудности интеграции дискретных систем армирования в вычислительные модели без неоправданного усложнения расчетных схем.
4. Необходимость развития методов симуляции самого процесса печати для прогнозирования технологических напряжений и деформаций.

Для преодоления этих проблем требуется тесное междисциплинарное сотрудничество между материаловедцами, технологами и специалистами по вычислительной механике. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание специализированного программного обеспечения или модулей к существующим ПК, валидированных на основе всестороннего экспериментального материала, полученного в различных странах, активно развивающих данное направление, включая Россию, Китай и страны Запада.

Литература

[1] Buswell, R.A., Leal de Silva, W.R., Jones, S.Z., Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37-49.

[2] Адамцевич А.О., Пустовгар А.П. (2022). Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона. *Строительные материалы*, 9, 18-24.

[3] Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M. (2019). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, 119, 132-140.

[4] Miri, Z.S., Baaj, H., Polak, M.A. (2025). Exploring Interfaces in 3D-Printed Concrete Through Cohesive Zone Modelling. *Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2024*, 12. CSCE 2024.

[5] С. В. Ключев, Е. В. Фомина, Н. А. Щекина, Е. С. Шорстова, Э. С. Сибгатуллин, Ф. М. Ахметов (2024). Исследование изделий, полученных методом 3D-печати // Инженерный вестник Дона. №6 (114).

[6] Momeni K, Vatin NI, Hematibahar M and Gebre TH (2025). *Differences between 3D printed concrete and 3D printing reinforced concrete technologies: a review*. Front. Built Environ, 10.

[7] Suiker, A.S.J. (2018). Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*, 137, 145-170.