

УДК 69.05

Ефимова Кристина Сергеевна, бакалавр, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург

АВТОНОМНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ ЗДАНИЙ: КОНЦЕПЦИЯ САМОУПРАВЛЯЕМЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Аннотация

В статье исследуется концепция трансформации аддитивных строительных технологий от полуавтоматизированных решений к полностью автономным самоуправляемым системам. Актуальность работы определяется необходимостью повышения производительности строительного производства, минимизации экологического воздействия отрасли и преодоления дефицита квалифицированных кадров. Цель исследования заключается в систематизации научно-технических подходов к формированию киберфизических строительных комплексов, анализе архитектурных решений, интегрирующих цифровые двойники и алгоритмы искусственного интеллекта, а также в выявлении ключевых технико-экономических и нормативных барьеров их внедрения. В работе предложена трехуровневая архитектура автономной системы, основанная на принципах замкнутого контура управления с использованием данных LiDAR и IoT. Проанализированы критерии эффективности таких комплексов и обоснована необходимость междисциплинарного подхода для преодоления технических и нормативных ограничений.

Abstract

The article investigates the concept of transforming additive construction technologies from semi-automated solutions to fully autonomous self-governing systems. The relevance of the study is determined by the need to enhance construction productivity, minimize the industry's environmental impact, and

address the shortage of skilled labor. The aim of the research is to systematize scientific and technical approaches to the formation of cyber-physical construction complexes, analyze architectural frameworks integrating digital twins and artificial intelligence algorithms, and identify key technical, economic, and regulatory barriers to their implementation. The paper proposes a three-tier architecture for an autonomous system based on closed-loop control principles utilizing LiDAR and IoT data. The efficiency criteria for such complexes are analyzed, and the necessity of an interdisciplinary approach to overcome technical and regulatory limitations is substantiated.

Ключевые слова: 3D-печать в строительстве; автономные строительные системы; искусственный интеллект; BIM; цифровые двойники; робототехника; замкнутый контур управления; устойчивое строительство; киберфизические системы.

Keywords: 3D printing in construction; autonomous construction systems; artificial intelligence; BIM; digital twins; robotics; closed-loop control; sustainable construction; cyber-physical systems.

Введение

Современные стройтехнологии сейчас набирают популярность - их ценят за цену, экологичность, скорость, эффективность, качество, безопасность и долговечность. Когда внедряются такие решения, команда работает слаженнее, производительность растёт, а проекты сдаются вовремя и без перерасхода бюджета. Строительство генерирует около 38% всех глобальных выбросов парниковых газов, и с учётом амбиций Еврокурса по климатической нейтральности к 2050 году отрасль должна поменяться.

Аддитивные технологии, такие как 3D-печать бетоном (3DCP), помогают сократить расходы на рабочих более чем на 50%, сроки стройки - до 70%, а отходы - на 60% [3]. BIM и IoT внедряются повсеместно и быстро, но исследований по мониторингу ключевых параметров в реальном времени для таких новинок всё ещё мало. А связка 3D-печати с идеями Industry 4.0 обещает автономные комплексы, которые сами экструдируют бетон, проверяют

качество, подстраиваются под погоду и оптимизируют каждый этап. Пока технология новая, и главными проблемами являются несущая способность конструкций и способность материала нормально печататься.

Обзор технологий 3D-печати в строительстве

3D-печать в строительстве прошла путь от лабораторных прототипов до реальных объектов, но адаптация технологии к полевым условиям стройплощадки выявила серьезные пробелы [3]. Главная из них, что цифровая модель в BIM и то, что получается в реальности, часто расходятся.

Большинство современных систем работают по полуавтоматическому принципу: робот-манипулятор механически следует заданной траектории, не реагируя на то, что материал лег чуть криво, температура изменилась или сопло начало засоряться. Контроль качества при этом часто сводится к визуальному осмотру уже готового участка - когда исправлять что-либо поздно. Результатом являются геометрические неточности, слабое сцепление между слоями, риски для несущей способности.

Чтобы перейти к по-настоящему автономной печати, нужен постоянный мониторинг. Здесь помогают LiDAR-сканеры и фотограмметрия: они создают плотные облака точек, которые программное обеспечение сравнивает с исходной BIM-моделью в реальном времени. Но и у этих методов есть ограничения: задержки в обработке данных, чувствительность к пыли, вибрациям, плохому освещению. А главное, что пока нет стабильной обратной связи с контроллером экструдера, чтобы сразу корректировать подачу материала.

Суть заключается в создании замкнутого контура управления, где сенсоры фиксируют отклонение, алгоритм его анализирует, а принтер мгновенно подстраивает параметры печати, но без точной 3D-модели и ИИ, работающего на базе BIM, такая автоматизация невозможна, ведь даже совершенные программные решения не обеспечивают требуемой надежности системы при непредсказуемом поведении материала. Самое главное - чтобы свежий бетон быстро «схватился» и восстановить вязкость, чтобы выдержать

вес следующего слоя, но при этом не застыть в сопле, поэтому одна из самых сложных задач при разработке смесей для автономной печати - это поиск баланса.

Концепция самоуправляемых строительных систем

Переход к полностью автономным системам требует пересмотра архитектуры робототехнических комплексов. В отличие от жёстко заданных траекторий, самоуправляемые системы работают в замкнутом контуре, где данные сенсоров в реальном времени корректируют исполнительные механизмы. Архитектура строится по принципу киберфизической системы (CPS), внедряющей вычислительные ресурсы с физическими процессами, и согласно концепции Цифрового Двойника делится на три уровня:

- 1) Физический уровень: робот-манипулятор или порталная система, насосное оборудование, модули энергообеспечения. Ключевое требование - модульность для замены инструментов без изменения платформы.
- 2) Уровень восприятия и связи: массив гетерогенных сенсоров (лидары, камеры, датчики давления, GNSS). Передача данных через протоколы IoT, интеграция с BIM создаёт динамические модели, обновляемые в реальном времени.
- 3) Когнитивный уровень: локальные контроллеры и высокопроизводительные вычислительные модули для алгоритмов ИИ. Здесь происходит интеграция BIM с данными реального мира [4].

Автономность обеспечивается принципом сенсорной фузии:

- 1) Геометрическое позиционирование: GNSS RTK обеспечивает сантиметровую точность. LiDAR формирует облака точек для построения карты местности и сравнения с BIM.
- 2) Контроль процесса: датчики давления и расхода мониторят вязкость и засоры сопла. Термопары и гигрометры отслеживают температуру и влажность, влияющие на гидратацию.
- 3) Интеграция с Mixed Reality (MR): данные MR-сканирования верифицируют соответствие элемента проектной модели.

Ядром системы выступают адаптивные алгоритмы:

- 1) Адаптивное планирование траектории: динамическая перестройка пути экструдера при отклонениях слоя.
- 2) Прогностическое моделирование: предсказание времени набора прочности по данным температуры и состава; при недостаточной жесткости система снижает скорость или делает паузу [4].
- 3) Обнаружение аномалий с помощью ИИ: машинное обучение на данных «идеальной» печати классифицирует отклонения вибрации, давления или геометрии, инициируя остановку или коррекцию.
- 4) Интеграция с цифровыми двойниками: постоянное сравнение облака точек с BIM (Scan-to-BIM) определяет статус выполнения задачи.

Критерии и методы оценки эффективности автономных строительных комплексов

Оценка выходит за рамки скорости печати и требует комплексного подхода:

- 1) Технические критерии: точность геометрии (отклонение в мм), структурная целостность (прочность на сжатие и изгиб, адгезия слоёв), надежность системы, скорость адаптации к внешним условиям [1].
- 2) Экономические критерии: производительность труда (объем на одного оператора), сокращение переделок, энергоэффективность (потребление на единицу объема).
- 3) Экологические критерии: снижение углеродного следа за счет точного дозирования и топологической оптимизации, использование локальных грунтов и отходов.

Методами оценки являются сравнительный анализ с традиционными методами (ROI), оценка жизненного цикла (LCA), A/B тестирование. При LCA критически важно корректно определить функциональную единицу, а для экологического воздействия рекомендуется метод ReCiPe Midpoint, что подробно рассматривается в современных систематических обзорах [2]. Оценка материалов проходит в два этапа. Для свежего материала важны

реологические показатели (вязкость, тиксотропия, buildability) [1], для затвердевшего - пористость, диффузия хлоридов, проницаемость. Особенно важно учитывать анизотропию 3D-печатных конструкций, и для точности прогнозных моделей применяются метрики R^2 , RMSE, MAE, MAPE.

Вызовы реализации

Внедрение сталкивается с многоуровневыми барьерами:

1) Технические: реология материалов (баланс текучести для экструзии и жёсткости для формы), работа в неструктурированной среде (устойчивость к пыли, влаге, помехам навигации), совместимость данных.

2) Экономические: высокие капитальные затраты, дефицит кросс-дисциплинарных кадров, проблемы масштабируемости лабораторных решений в логистике и управлении крупными объектами.

3) Нормативные и правовые: отсутствие унифицированных стандартов, неопределённость ответственности за ошибки алгоритма, кибербезопасность подключённых систем, регулирование ИИ (включая категоризацию рисков).

4) Социальные: влияние на занятость в регионах с дешёвой рабочей силой, риски нарушения интеллектуальной собственности при цифровом копировании проектов.

Перспективы развития и заключение

Будущее автономного строительства определяется полной интеграцией ИИ и робототехники. Ожидаемые направления: координированные группы роботов для повышения отказоустойчивости и скорости, гибридные материалы с интегрированным армированием, цифровые двойники в реальном времени для долгосрочного прогнозирования поведения конструкций. Эти решения способны ускорить возведение объектов, повысить качество и снизить воздействие на экологию [5].

Автономные строительные системы на базе 3D-печати - это следующий шаг в развитии отрасли: они решают проблемы нехватки рабочих, низкой производительности и чрезмерного загрязнения окружающей среды. Чтобы

перейти к полностью самоуправляемым комплексам нужно преодолеть вызовы в сенсорах, алгоритмах управления и свойствах материалов. Успех возможен только через междисциплинарное сотрудничество инженеров, робототехников, IT-специалистов и регуляторов, а также за счет разработки различных стандартов, образовательных программ и инвестиций в исследования.

Список литературы

1. Lafhaj Z., Dakhli Z. Performance indicators of printed construction materials: a durability-based approach // *Buildings*. 2019. Т. 9, № 4. Ст. 97.
2. Motalebi A., Khondoker M.A.H., Kabir G. A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing // *Sustainable Operations and Computers*. 2024. Т. 5. С. 41-50.
3. Nebrida J.A. Automated onsite construction: 3D printing technology // *Journal of Engineering Research and Reports*. 2022. Т. 23, № 1. С. 47-55.
4. Nebrida J.A., Oliveros O. Artificial intelligence utilized in 3D printing construction technology // *Asian Journal of Advanced Research and Reports*. 2023. Т. 17, № 4. С. 20-25.
5. Simioni F., Rangel B., Campos N., Teixeira J. 3D printing for construction: a systematic review of its sustainability // *Sustainable and Digital Building: Proceedings of the International Conference, 2022* / eds. F. Gaspar, A. Mateus. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. С. 103-112.

References

1. Lafhaj Z., Dakhli Z. Performance indicators of printed construction materials: a durability-based approach // *Buildings*. 2019. Vol. 9, № 4. Art. 97.
2. Motalebi A., Khondoker M.A.H., Kabir G. A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing // *Sustainable Operations and Computers*. 2024. Vol. 5. P. 41-50.
3. Nebrida J.A. Automated onsite construction: 3D printing technology // *Journal of Engineering Research and Reports*. 2022. Vol. 23, № 1. P. 47-55.

4. Nebrida J.A., Oliveros O. Artificial intelligence utilized in 3D printing construction technology // Asian Journal of Advanced Research and Reports. 2023. Vol. 17, № 4. P. 20-25.
5. Simioni F., Rangel B., Campos N., Teixeira J. 3D printing for construction: a systematic review of its sustainability // Sustainable and Digital Building: Proceedings of the International Conference, 2022 / eds. F. Gaspar, A. Mateus. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. P. 103-112.