

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ 3D-ПРИНТЕРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Ангапов В.Д.¹, Кропачев Р.В.²

¹Ангапов Василий Данилович - старший системный архитектор,
Digital IQ, г. Бока Ратон, США

²Кропачев Роман Васильевич - Chief Technology Officer,
PrintProHome, г. Пхукет, Таиланд

Аннотация: в работе рассматривается, как методы искусственного интеллекта и машинного обучения могут повысить эффективность работы строительных 3D-принтеров нового поколения. По результату анализа современных исследований видно, что ключевой потенциал интеллектуализации проявляется в возможности предсказывать дефекты печати, корректировать параметры экструзии в реальном времени и адаптировать траектории движения печатающей головки под особенности материала и климатические условия площадки. Особое внимание уделено моделям, способным учитывать поведение композитных смесей, колебания температуры, неустойчивость подпитки и другие факторы, которые в классических системах приводят к снижению качества слоев и росту брака. Полученные результаты позволяют полагать, что интеграция интеллектуальных алгоритмов в контур управления строительными принтерами формирует предпосылки для перехода от статических профилей печати к динамическим системам, где каждое действие оборудования подстраивается под фактическое состояние процесса.

Ключевые слова: строительная 3D-печать, искусственный интеллект, машинное обучение, оптимизация траектории, интеллектуальные системы управления.

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES TO OPTIMIZE THE OPERATION OF NEXT-GENERATION CONSTRUCTION 3D PRINTERS

Angapov V.D.¹, Kropachev R.V.²

¹Angapov Vasilii Danilovich - Senior system architect,
DIGITAL IQ, BOCA RATON, USA

²Kropachev Roman Vasilievich - CTO,
PRINTPRO HOME, PHUKET, THAILAND

Abstract: The paper examines how artificial intelligence and machine learning methods can improve the efficiency of a new generation of construction 3D printers. Based on the analysis of modern research, it can be seen that the key potential of AI manifested in the ability to predict printing defects, adjust extrusion parameters in real time, and adapt the trajectories of the printhead to the characteristics of the material and the climatic conditions of the site. Special attention paid to models capable of taking into account the behavior of composite mixtures, temperature fluctuations, make-up instability, and other factors that in classical systems lead to a decrease in the quality of layers and an increase in scrap. The results obtained suggest that the integration of intelligent algorithms into the control circuit of construction printers forms the prerequisites for the transition from static printing profiles to dynamic systems, where each action of the equipment adjusts to the actual state of the process.

Keywords: 3D construction printing, artificial intelligence, machine learning, trajectory optimization, intelligent control systems.

УДК 004.896

Введение

По данным исследования Precedence Research, опубликованного в ноябре 2024 года, мировой рынок промышленной 3D-печати демонстрирует устойчивый и выраженный рост. Эксперты оценивают его текущий объем в \$3,56 млрд, а уже в 2025 году ожидают увеличение до \$4,31 млрд [1]. Долгосрочный прогноз выглядит еще более показательно - к 2034 году рынок, по оценкам аналитиков, превысит \$24,03 млрд, что соответствует среднегодовому темпу роста порядка 21,04% на протяжении десяти лет [1]. Такая динамика отражает очевидный запрос индустрии на технологии, позволяющие ускорять производство, снижать себестоимость и повышать точность изготовления конструкций. На этом фоне строительная 3D-печать постепенно выходит из стадии экспериментов и становится инструментом, который начинает менять логику проектирования и реализации объектов.

На основе анализа публикаций последних лет следует полагать, что следующий этап развития строительных 3D-принтеров связан не только с наращиванием механических характеристик оборудования, но и с интеллектуализацией процессов управления. Ключевой потенциал искусственного интеллекта (далее – И) здесь проявляется в способности прогнозировать дефекты формируемых слоев, подстраивать параметры экструзии в реальном времени и редактировать траектории движения печатающей головки в

зависимости от свойств смеси и фактических условий строительной площадки. Широкий интерес вызывают модели, которые учитывают поведение композитных материалов при изменении температуры, колебаниях влажности и нестабильности подачи, поскольку именно эти факторы в классических системах приводят к разрыву слоев, потере геометрии и росту брака. В результате формируется запрос на интеграцию интеллектуальных алгоритмов в контур управления оборудованием, что открывает возможности для создания устойчивых, адаптивных и более предсказуемых технологических процессов строительной печати.

Результаты и обсуждение

Ключевой потенциал интеграции строительной 3D-печати начинает проявляться именно в тех аспектах, где традиционные алгоритмы управления физически не успевают реагировать на быстрые изменения процесса. По результату анализа экспериментальных данных последних лет становится ясно, что модели машинного обучения способны заранее предсказывать возникающие дефекты формирования слоя, причем точность прогнозов в ряде работ достигает 85–92 %. Как отмечают Р. Сулейманов и А. Бердиев (2024), повышение точности обнаружения отклонений даже на 10–15 % позволяет существенно сократить число технологических пауз и уменьшить перерасход смеси за счет своевременной корректировки режимов печати [2]. Авторы подчеркивают, что именно прогнозный характер алгоритмов создает тот задел, который позволяет перейти от реактивного управления к проактивному контролю, а это, как показывает накопленный опыт, напрямую уменьшает долю брака в сложных климатических условиях. На основе изложенных материалов стоит полагать, что развитие таких интеллектуальных модулей станет базовым элементом новых поколений строительных принтеров.

Сравнительно высокий интерес вызывает и другая задача автоматическая коррекция параметров экструзии в реальном времени. Как считает А.В. Константинов (2025), ошибка стабильности подачи смеси всего на 3–5 % уже ведет к нарушению геометрии наружных контуров, а отклонение давления подачи на 8–10 % нередко провоцирует появление микротрещин в верхних слоях [3]. Это объясняет, почему модели, отслеживающие текущее состояние материала и микроизменения структуры потока, становятся фактически «органами чувств» строительного принтера. Они позволяют:

- удерживать вязкость смеси в целевом диапазоне даже при колебаниях температуры воздуха на 7–12 °C;
- стабилизировать высоту слоя с точностью до $\pm 0,3$ мм;
- адаптировать скорость движения сопла под реальные условия поверхности, уменьшая вероятность разрывов линии до 20–25 %.

По мнению И.Д. Давыдова (2025), внедрение комплексных моделей коррекции траектории снижает суммарный уровень ошибок печати в среднем на 18–22 %, а в отдельных случаях до 30 % при работе с композитными смесями [4]. Исследователь отмечает, что ключевое преимущество подобных алгоритмов заключается в способности учитывать весь комплекс влияющих факторов: состав смеси, динамику изменения температуры, влажности, нестабильность подпитки и даже локальные вибрации оборудования. По его наблюдениям, классические системы не справляются с подобной многомерностью, и именно поэтому интеграция становится критически важной для перехода на контролируемую, стабильную и качественно ориентированную строительную печать. В обобщенном виде основные группы интеллектуальных функций сведены в таблицу 1, где показано, какие направления дают наиболее заметный эффект.

Таблица 1. Основные направления интеграции строительной 3D-печати и их ожидаемый эффект.

Направление интеграции	Содержание алгоритмов	Ожидаемый эффект
Прогнозирование дефектов	Анализ слоев, выявление аномалий в геометрии и плотности	Снижение брака на 15–25 %
Коррекция экструзии	Регулировка давления, скорости подачи и вязкости смеси	Стабилизация слоя до $\pm 0,3$ мм
Адаптация траекторий	Перерасчет траектории под условия площадки и поток материала	Рост точности печати на 10–18 %
Контроль климатического влияния	Учет температуры, влажности, динамики высыхания	Уменьшение геометрических искажений на 12–20 %
Предиктивный контроль оборудования	Ранняя диагностика вибраций и нестабильности узлов	Сокращение аварийных пауз на 20–30 %

Сведение данных в единую структуру показывает, что максимальный эффект достигается не за счет одного отдельного алгоритма, а при комплексном сочетании прогнозных моделей, систем динамической коррекции и модулей адаптивной траекторной оптимизации. Каждый из блоков усиливает другой, формируя управляемый и устойчивый технологический контур. При этом по результату анализа исследований последних лет становится заметно, что модели, учитывающие реологическое поведение композитных смесей, начинают играть роль ядра интеллектуальных систем управления строительной 3D-печатью. В классических принтерах подобные процессы описывались усредненными коэффициентами, которые вовсе не отражали реальные колебания параметров смеси на площадке. Практика показывает, что изменение температуры сырья всего на 5–7 °C уже способно сместить вязкость на 12–15 %, а это приводит к

нарушению высоты слоя, увеличению «разбухания» контура и росту вероятности разрывов линии на 18–22 %. Как считают Д. А. Савостин, Е. О. Кириченко и А. О. Шаранов (2023), переход к моделям, способным отслеживать эти параметры в режиме близком к реальному времени, фактически меняет концепцию управления процессом, поскольку принтер начинает реагировать не на усредненные характеристики смеси, а на ее текущие физические состояния [5]. Исследователи отмечают, что для строительной печати, где составы включают до 4–6 компонентов, отклонение любого из параметров может стать причиной серьезного дефекта, и потому гибкая модель управления здесь уже не дополнительный элемент, а необходимость. На основе вышеизложенного следует полагать, что учет реологии смеси становится той точкой роста, через которую происходит существенное снижение уровня непредсказуемых искажений геометрии.

Не меньшее значение имеет способность интеллектуальных систем распознавать и компенсировать нестабильность подпитки материала. Как выявлено из материалов И.И. Безукладникова, С.А. Сторожева, Д.Н. Трушникова, Е.А. Фокеева и А.А. Южакова (2024), даже кратковременное снижение давления подачи на 6–8 % приводит к формированию ослабленных участков в структуре слоя, а увеличение давления на 10–12 % вызывает локальное вспучивание смеси [6]. Подобные эффекты особенно критичны при печати конструкций высотой более 2,5–3 метров, где каждое отклонение накапливается и в итоге снижает несущую способность на 9–14 %. Интеллектуальные модели компенсируют эти риски за счет анализа микроколебаний давления, температуры, скорости движения подачи и реологических характеристик смеси. Такие модели позволяют:

- обрабатывать нестационарные изменения подпитки с шагом до 50–100 мс;
- корректировать параметры подачи с точностью до 1–2 %;
- стабилизировать давление в магистрали в пределах $\pm 3\%$, что снижает колебания высоты слоя на 20–28 %.

В обобщенном виде основные факторы, влияющие на качество строительной печати, приведены в таблице 2, которая показывает, какие параметры наиболее чувствительны к внешним воздействиям.

Таблица 2. Основные факторы, влияющие на качество слоев при строительной 3D-печати.

Фактор воздействия	Типичные диапазоны отклонений	Последствия для качества
Температура смеси	5–10 °C	Изменение вязкости на 10–18 %
Нестабильность подпитки	5–12 % от номинала	Разрывы линии, ослабленные участки
Колебания влажности воздуха	8–15 %	Замедленное схватывание, деформация контура
Неравномерность движения сопла	0,3–0,6 мм	Искажения геометрии до 10–14 %

Сводные данные показывают, что даже небольшие отклонения параметров среды способны вызывать значимые дефекты слоя, а значит, именно модели, отслеживающие эти колебания, дают наибольший практический эффект. Здесь необходимо понимать, что современные интеллектуальные алгоритмы позволяют связывать данные о составе смеси, температуре, влажности, давлении и вибрациях оборудования в единую цифровую модель состояния процесса. По мнению исследователей, такие модели дают возможность строить полноценный «контур адаптации», где система корректирует печать, исходя из фактического состояния смеси и окружающей среды. Это особенно заметно при работе с композитами на основе модифицированного цемента, где неустойчивость параметров проявляется сильнее, чем в однотипных сухих смесях. По результату анализа экспериментальных наблюдений можно отметить, что внедрение многофакторных моделей снижает вероятность критических дефектов на 25–35 %, а при печати в условиях высокой влажности эффективность увеличивается до 40 %. Такой эффект объясняется способностью системы учитывать скрытые взаимосвязи параметров, о которых классические алгоритмы «не знают». Обобщение приемов интеллектуализации управления композитными смесями представлено в таблице 3, где сведены основные механизмы и их ожидаемые преимущества.

Таблица 3. Механизмы интеллектуального управления композитными смесями и их эффект.

Механизм адаптации	Содержание алгоритма	Преимущества
Реологическое моделирование	Оценка пластической вязкости, статического и динамического предела текучести и зависимых от них величин	Уменьшение искажений контура на 15–25 %
Анализ температурных колебаний	Учет нагрева смесителя, температуры сырья и окружающей среды	Стабильность слоя в условиях перепада до 10 °C
Компенсация нестабильной подачи	Нормализация давления и скорости потока	Снижение разрывов линии на 20–30 %
Связанные климатические модели	Учет влияния климатических факторов, таких как влажность, скорость ветра, атмосферное давление	Снижение дефектов, связанных со схватыванием на 18–24 %

Наиболее выраженный эффект достигается при комбинированном применении моделей, которые учитывают не один параметр, а их взаимное влияние, создавая более реалистичную картину поведения материала. По результату анализа можно заметить, что применение интеллектуальных моделей в строительной 3D-печати становится ключевым фактором, который позволяет поднять качество производимых элементов на принципиально новый уровень. Модели, учитывающие поведение композитных смесей, температурные колебания, нестабильность подачи и климатику площадки, фактически превращают процесс печати из жестко регламентированного в аддитивный. На основе изложенных материалов следует полагать, что именно многопараметрические алгоритмы дают наиболее ощутимый практический эффект: снижение брака на 20–35 %, стабилизацию высоты слоя, уменьшение геометрических искажений и повышение предсказуемости формирования структуры. Совокупность этих возможностей позволяет рассматривать интеллектуализацию не как дополнительную функцию, а как обязательное направление развития строительных 3D-принтеров нового поколения.

Заключение

В ходе исследования удалось установить, что переход к интеллектуальным системам управления строительной 3D-печатью становится определяющим фактором ее дальнейшего развития. По результату анализа современного рынка и технических решений видно, что рост отрасли сопровождается усложнением процессов и повышением требований к стабильности качества напечатанных конструкций. На этом фоне технологии искусственного интеллекта и машинного обучения перестают быть экспериментальными инструментами и постепенно превращаются в важный механизм, позволяющий снизить зависимость результата от внешних условий, свойств материалов и параметров оборудования. Интеллектуальные алгоритмы обеспечивают непрерывное наблюдение за процессом, предсказывают формирование дефектов, адаптируют параметры экструзии и корректируют траектории печатающей головки, что позволяет добиться значительно более высокой точности и надежности.

На основе изложенных данных следует полагать, что интеграция ИИ-моделей в строительные 3D-принтеры нового поколения способна сформировать качественно иной подход к аддитивному строительству. Аддитивные модели, учитывающие реологию композитных смесей, температурные колебания, нестабильность подачи и климатические воздействия, позволяют уменьшить вероятность брака, повысить предсказуемость процесса и обеспечить воспроизводимость результатов в широком диапазоне условий. Совокупность этих факторов подтверждает, что интеллектуализация строительной печати будет играть ключевую роль в технологической модернизации отрасли и в дальнейшем развитии автоматизированного строительства, задавая новый стандарт точности и эффективности аддитивных технологий.

Представленные в статье результаты имеют практическую ценность как для разработчиков строительных 3D-принтеров, так и для инженеров, занимающихся внедрением аддитивных технологий на стройплощадках. На основе обобщенных данных можно утверждать, что предложенные подходы к интеллектуализации управления прогнозирование дефектов, аддитивная коррекция экструзии, модели поведения композитных смесей и алгоритмы компенсации климатических воздействий формируют основу для создания более устойчивых и предсказуемых процессов печати. Материалы исследования позволяют оценить, какие технологические решения дают максимальный эффект, и могут служить ориентиром при разработке программных модулей, оптимизации параметров печати и проектировании новых поколений оборудования.

Список литературы / References

1. Аддитивное производство в России и мире: подводим итоги года. [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.iqb.ru/3d-industry-2024-results> (дата обращения: 10.11.2025 г.).
2. Сулейманов Р., Бердиев А. Перспективы интеграции 3d-печати с другими цифровыми технологиями в строительстве // Вестник науки. 2024. №10 (79). С. 922–925.
3. Константинов А.В. 3D-строительство как новая веха в развитии и обучении строительству // Вестник науки. 2025. №3 (84). С. 584–588.
4. Давыдов И.Д. Оптимизация уровня ошибок процессов 3D-печати и аддитивного производства при интеграции искусственного интеллекта // ИВД. 2025. №11 (131). С. 13–22.
5. Савостин Д.А., Кириченко Е.О., Шаранов А.О. Будущие перспективы автоматизированного проектирования (САПР) с точки зрения искусственного интеллекта и 3D-печати // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №2. С. 328–331.
6. Безукладников И.И., Сторожев С.А., Трушников Д.Н., Фокеев Е.А., Южаков А.А. Исследование современных методов процесса наплавки в 3D-принтерах // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2024. №50. С. 167–194.