



Технологичное управление оборудованием для 3D-аддитивной печати строительных нанокompозитов

О.В. Иванова , Р.М. Халиков* , А.С. Салов, М.Х. Низамутдинов, В.В. Зиннатуллин

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

*Контакты: e-mail: rauf_khalikov@mail.ru

РЕЗЮМЕ: Введение. Разработка инновационных подходов цифрового управления оборудованием, обеспечивающих получение 3D-строительных конструкций с высокими эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками, остается актуальной задачей. Эксплуатация и обслуживание технологического оборудования в процессе 3D-печати строительных объектов не всегда соответствует современным требованиям управления техническими системами. **Методы и материалы.** 3D-печать основана на методе экструзии: послойного формования строительной конструкции добавлением и достаточно быстрым последующим отверждением нанокompозиционного стройматериала. Формуемая оптимизированная нанокompозиция должна иметь требуемую реологию, что обеспечивают гребнеобразные поликарбоксилатные эфиры с наностерическим отталкиванием на расстоянии ≈ 11 нм. Для организации стабильной технологии 3D-печати необходимо также подобрать соответствующие оптимальные заполнители (наполнители), которые обеспечивают необходимые физико-механические и эксплуатационные показатели затвердевшему нанокompозиту. **Результаты.** Эффективность трехмерной печати предусматривает скоординированное функционирование строительного 3D-принтера. В связи с этим необходимо иметь бетононасосное оборудование, которое способно перекачивать по гибким трубопроводам исходную нанокompозицию с определенной скоростью. Учет влияния факторов величин давления и объема позволяет увеличить мощность бетононасосного электродвигателя на 14–17%, а также синхронно понижает уровень вибраций. **Обсуждение.** Цифровые 3D-технологии раскрывают уникальные возможности инновационного производства трехмерных строительных объектов и инженерных конструкций. Технологичное управление качеством 3D-печати зависит от правильной юстировки механизмов принтера, а уменьшение бракованных изделий можно добиться за счет корректировки параметров формования строительных нанокompозитов. Структурообразовательное отверждение портландцементных нанокompозитов основано на образовании фрактальных структур кластеров гидросиликатов кальция размерами 47–51 нм, формирующих наноагрегаты (125–132 нм), которые за счет адгезионных взаимодействий постепенно цементируют наполнители. Востребованные разработки соответствующего оборудования только усиливают преимущества 3D-аддитивных технологий: практическая безотходность; невысокое энергопотребление 3D-принтеров; сокращение времени от проектирования до завершения работ в 8–11 раз. **Заключение.** Технологичное управление бетононасосным оборудованием для 3D-аддитивной печати строительных нанокompозитов сокращает энергетические затраты на 26–29%, а также одновременно понижает уровень вибраций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аддитивные нанотехнологии, 3D-принтер, цифровое строительство, бетононасосы, 3D-печать нанокompозиций, управление качеством.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иванова О.В., Халиков Р.М., Салов А.С., Низамутдинов М.Х., Зиннатуллин В.В. Технологичное управление оборудованием для 3D-аддитивной печати строительных нанокompозитов // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 2. – С. 117–123. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-2-117-123.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные работы по созданию прорывных трендов в стройиндустрии и высокотехнологичного оборудования для 3D-аддитивных техно-

логий [1–3] в качестве инструментов быстрого прототипирования продолжают продолжаться во многих странах. Эксплуатация и обслуживание технологического и транспортного оборудования в ходе 3D-печати строительной инфраструктуры не полностью соот-

ветствуют современным требованиям, отсутствует национальный стандарт для аддитивного производства. Поэтому разработка инновационных подходов управления оборудованием, надежно обеспечивающих получение трехмерных строительных конструкций с повышенными технико-экономическими характеристиками, остается актуальной задачей.

В последние годы появились инновационные подходы, например, трехмерные технологии «печати» отдельных конструкций, зданий в строительной индустрии с использованием фиброволокон, которые позволяют обходиться без традиционной опалубки. 3D-аддитивные технологии являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений автономного «цифрового» производства, [4] и качественное управление техническими системами дает возможность конструировать разнообразные архитектурные формы сооружений.

Цель данной статьи — исследование применения технологичного и транспортного оборудования для 3D-принтерной печати инфраструктурных зданий в строительной индустрии.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

3D-аддитивная печать основана на методе экструзии: послойного формования строительной конструкции последовательным добавлением и последующим отверждением нанокomпозиционного стройматериала. Для обеспечения соответствующего объема перекачки формируемая оптимизированная однородная цементная (реже модифицированная гипсовая) нанокomпозиция с минеральными наполнителями (заполнителями) должна иметь требуемую реологию, оптимальный предел пластичности составляет 1,0–2,5 кПа. Портландцементные нановязующие позволяют более избирательно управлять динамикой вариаций прочностных и реологических характеристик, изменениями стойкости в процессе эксплуатации строительных конструкций. Для управления реологическим поведением строительных нанокomпозиций в процессе 3D-печати эффективные технологические характеристики суперпластификаторов проявляют гребнеобразные поликарбоксилатные эфиры с наностерическим отталкиванием на расстоянии ≈ 11 нм [5].

Печатающая головка 3D-принтера представляет с собой сопло, из которого выдавливается (экструдировается) сырая нанокomпозиция. Траектория сопла определяется цифровой CAD-программой: после завершения полного нанесения одного слоя рабочая платформа сдвигается вниз или поднимается вверх на толщину одного слоя, и «печатаются» другие слои. При данной технологии особую роль отводится скорости «печати», которая должна быть

оптимальной, т.е. позволять ранее «напечатанным» слоям нанокomпозиционного материала набирать первоначальную прочность, чтобы обеспечить соответствующую адгезию между отдельными слоями.

Строительная 3D-печать включает этапы приготовления вязкопластичной нанокomпозиционной смеси, транспортирования из смесителя по гибким трубопроводам в экструдер, экструдирование соплом 3D-принтера, твердение напечатанных слоев наноматериала. Другой существенной особенностью метода аддитивной технологии является программирование скоростных характеристик для подачи и укладки исходной нанокomпозиции с учетом геометрических размеров (5–20 см) печатающего сопла (рис. 1).

Следует отметить, что для обеспечения устойчивой технологии послойной 3D-печати наносырьевая композиция должна быть с высоким пределом текучести. Эффективное управление реологией нанокomпозиций в ходе 3D-печати возможно при совместном использовании нанодисперсных модификаторов вязкости, механоактивации и аналогичных способов [6, 7]. Динамичное структурообразование в многофазных (мультикомпонентных) нанокomпозициях 3D-печати происходит за счет взаимодействия коллоидных вяжущих, наносuspензии микронаполнителей и др. Метод фрактального анализа структурообразовательных процессов нанокomпозитов позволяет четко отслеживать кинетику твердения: в результате поликонденсации при шероховатом сли-

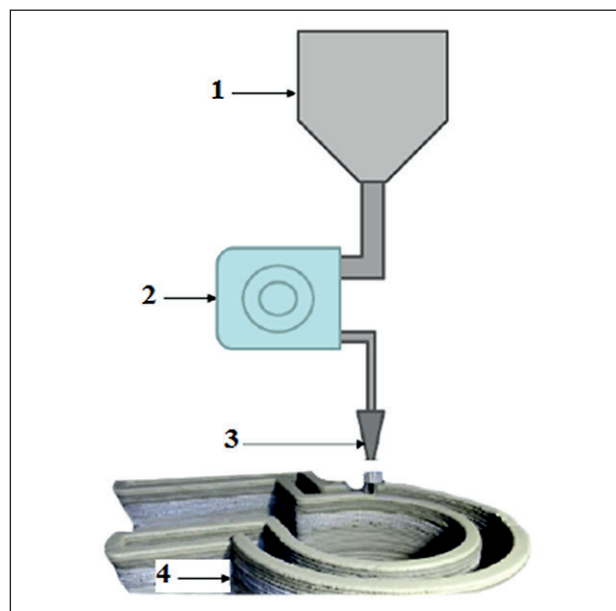


Рис. 1. Традиционная схема послойной экструзии нанокomпозиции в 3D-аддитивной технологии: 1 — резервуар сырья; 2 — бетононасос; 3 — сопло 3D-принтера; 4 — строительная конструкция

паниии коллоидных микрочастиц образуются мультифрактальные агрегаты нановязжущих.

Нановязжущая композиция в технологии 3D-печати должна «укладываться» ровными слоями и в то же время не растекаться, т.е. быть достаточно жесткой. Одновременно к нановязжущим предъявляется технологический вызов понижения времени схватывания: не «забивать» сопло 3D-принтера, а также «успеть» формировать адгезию с предыдущим слоем. Высота слоя 2–3 см подбирается экспериментально: при укладке нового слоя предыдущие слои должны иметь достаточную прочность — 1,5–2 МПа при сжатии в отвержденном состоянии. Тиксотропные агенты (например, бентонит) влияют на технологичность строительной 3D-печати через модификацию кинетики твердения.

Предложена технология [8], когда в процессе экструзии исходной наноконпозиции шпатели (установленные на подающем сопле) выравнивают поверхность 3D-печати. Следует отметить, что в этом случае подбирается тиксотропная наноконпозиция 3D-аддитивных технологий: при физико-механическом воздействии резко уменьшается вязкость, которая восстанавливается достаточно быстро через несколько минут.

Управление и регулирование оптимальных характеристик наноконпозиций для 3D-печати осуществляется также введением разнонаправленно действующих химических нанодобавок. Например, в статье [9] для 3D-печати выбрали композицию: цемент, песок (крупность 2 мм), микрокремнезем и 1% поликарбоксилатный суперпластификатор. Замедление (регуляция) твердения выполняли нанодобавками 0,5% лимонной и нитротриметилфосфоновой кислот, а в качестве катализатора схватывания использовали соли алюминия в кислой среде [10]. Кроме того, сырьевую наноконпозицию армировали полипропиленовым волокном длиной 12 мм для уменьшения деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эффективность трехмерной печати предусматривает согласованное функционирование строительного 3D-принтера и перекачки исходных сырьевых наноконпонентов. В связи с этим необходимо иметь насосное (шнековое, поршневое, центробежное) оборудование, способное перекачивать и подавать исходную наноконпозицию с определенной скоростью выгрузки и геометрической точностью, что обеспечивается роботизирован-

ной системой для автоматического перемещения сопла (инжектора, форсунки) печатающей головки 3D-принтера.

Важнейшее требование к бетононасосному оборудованию в процессе 3D-печати — способность перекачивать по гибким трубам наноконпозиционный строительный раствор по горизонтали и (или) вертикали на десятки метров. В соответствии с требованиями технологического режима в 3D-аддитивных технологиях основной функцией электропривода является обеспечение устойчивой работы бетононасоса [11–14]. При выборе мощности электродвигателей для бетонных насосов в процессе 3D-печати, работающих с переменной нагрузкой: максимальное давление — P_{max} на выходе насоса, перекачивающего наноконпозицию и объемом нанобетонной смеси — V (рис. 2), мощность электроприводов завышается с учетом самых тяжелых пусков.

Следует отметить, что максимальные значения давления P_{max} и объема перекачиваемой наноконпозиции V одновременно не могут быть достигнуты. Полезная мощность электропривода при номинальном режиме функционирования бетононасоса варьирует от 320 до 470 кВт. Учет влияния лимитирующих факторов позволяет увеличить мощность бетононасосного электродвигателя на 14–17%, сокращает энергетические затраты на 26–29%, а также синхронно понижает уровень вибраций. При использовании асинхронного электродвигателя между ним и бетононасосом необходима установка механической передачи, что снижает надежность работы электропривода, увеличивает его массу и усиливает вибрации; проблема решается использованием электродвигателей, которые имеют низкую угловую скорость вала: волновые электроприводы и двигатели с катящимся ротором.

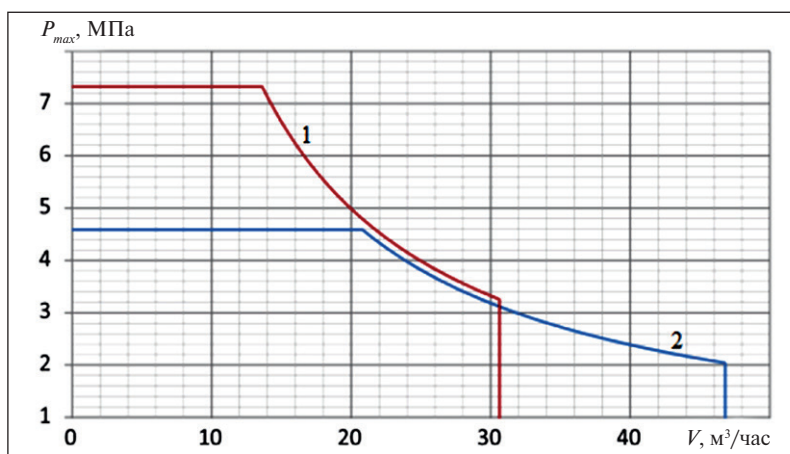


Рис. 2. Управляемая динамика эффективности бетонного насоса 3D-принтера в режиме: 1 — высокого давления; 2 — максимального перекачиваемого объема

В производственных условиях сотрудниками Уфимского государственного нефтяного технического университета с использованием опытно-промышленного 3D-принтера AMT S1160 был построен одноэтажный малогабаритный павильон. Автоматизированные устройства порталных 3D-принтеров, которые действуют в угловых координатах и приводятся в движение электроприводами, являются наиболее экономичными за счет управления надежности при строительстве малоэтажных зданий и строительных конструкций (рис. 3).

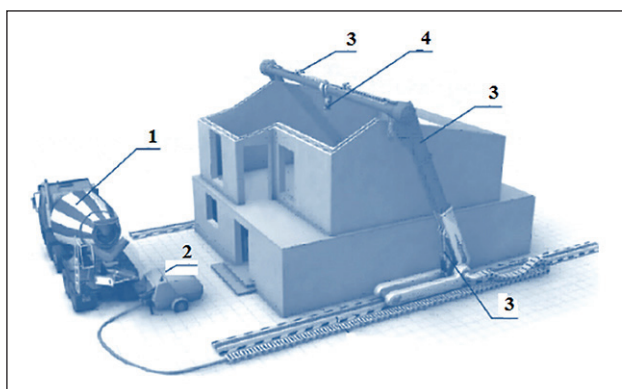


Рис. 3. Портальный 3D-принтер для «печати» малоэтажных зданий: 1 — автобетоносмеситель с нанокomпозиционным сырьем; 2 — электронасос; 3 — механизмы передвижения; 4 — сопло экструдера

Технологическое управление бетононасосом 3D-печати осуществляется автоматически электронным оборудованием; дополнительно все функции могут легко обслуживаться вручную, что при выходе из строя блока управления или датчиков позволяет бетононасосу продолжать работу. Следует отметить, что запуск бетононасоса осуществляется пусковой смесью или цементным «молочком»: подвижной смесью цемента с водой. Автономная система промывки водой в 3D-аддитивных технологиях позволяет оперативно очистить трубки (гибкие шланги), барабанный миксер автобетоносмесителей от прилипших остатков строительного нанораствора. Поэтому для надежного управления качественного функционирования технологического оборудования в процессе 3D-печати необходима соответствующая водоподготовка (при низких температурах — чистая теплая вода) [15, 16].

ОБСУЖДЕНИЕ

Цифровые 3D-аддитивные технологии раскрывают уникальные возможности производства трехмерных стройобъектов и инженерных конструкций, которые востребованы в XXI столетии. Технические

недостатки аддитивных технологий: неровности вертикальной поверхности, появление микротрещин из-за неравномерной усадки — постепенно минимизируются. Востребованные разработки соответствующего оборудования только усиливают преимущества 3D-аддитивных технологий: практическая безотходность; невысокое энергопотребление и бесшумность 3D-принтеров; сокращение времени от проектирования до завершения работ в 8–11 раз. Качество 3D-печати зависит от правильной юстировки механизмов принтера, а уменьшение бракованных изделий (строительных объектов) можно добиться за счет корректировки параметров формования. Благодаря интеллектуальным алгоритмам оптимизированной CAD-программы удастся сократить число тестовых проходов 3D-принтера.

Время отверждения нанобетонных композиций в процессе 3D-печати может составлять несколько часов, поэтому для увеличения скорости приходится просушивать напечатанные слои. Одним из перспективных трендов минимизации этого недостатка является добавление в бетонные нанокomпозиции техногенных отходов [17], например, повторного использования стройматериалов [18]. За счет удешевления 3D-аддитивных технологий в рамках концепции жизненного цикла в будущем возможно ускорение проектирования, возведения трехмерных зданий и реконструкция.

Следует также отметить, что функционирование большинства 3D-принтеров осуществляется в безопасном формовании строительных конструкций. Введение в состав нанокomпозиций в ходе 3D-аддитивной печати 2–3% отходов производства силиката натрия позволяет ускорить схватывание, одновременно увеличить прочностные характеристики. В процессе 3D-печати конструкций с высоким коэффициентом армирования (стальными фибрами; базальтовыми, стеклянными, углеродными волокнами) технологически важны удобоукладываемость строительных нанокomпозиций.

При разработке 3D-аддитивных технологий необходим комплексный подход по исследованию строительных наноматериалов в условиях эксплуатации, особенно с учетом изменений в среде обитания человека в конкретных условиях. Новые вызовы возрастающих экологических нагрузок требуют поиска путей решения оптимизации взаимодействия «человек ↔ наноматериал ↔ среда обитания». Поэтому разработка фундаментальных основ создания, получения, эксплуатации, разрушения и вторичного использования нового поколения «зеленых» нанокomпозитов является важнейшей междисциплинарной задачей.

Разработка безотказного и надежного управления и обеспечения работоспособности строительного

3D-принтера может осуществляться за счет ненагруженного резервирования [19]. Электронный блок управления позиционирования сопла экструдера, камеры мониторинга за процессом 3D-печати [20] позволяют контролировать стадии конструирования строительных объектов. Одной из перспективных технологий получения нанодисперсий из вторичного бетона является кавитационная технология измельчения [21, 22]: при вращении ротора в рабочей камере насоса возникают высокочастотные акустические колебания в сопровождении кавитационных и гидродинамических явлений, при действии которых происходят измельчение наночастиц стройматериала.

Датчики, которые позволяют синхронно отслеживать структурообразовательные процессы нанокompозитов, дают возможность оптимального твердения «напечатанных» слоев 3D-аддитивной печати строительных конструкций. Структурообразовательное отверждение портландцементных нанокompозитов основано на образовании фрактальных структур кластеров гидросиликатов кальция размерами 47–51 нм, формирующих наноагрегаты (125–132 нм) [23] с шероховатой поверхностью нановязущих, которые за счет адгезионных взаимодействий постепенно цементируют наполнители (заполнители). Технологичное управление бетононасосным оборудованием [24] для 3D-аддитивной печати строительных нанокompозитов позволяет обеспечить высокую сопротивляемость к механическим воздействиям на бортовые ограждения [25].

Оптимальное управление качеством [26] всего технологического процесса 3D-печати строительных объектов на базе нанокompозитов предполагает учет показателей качества стройматериалов, зданий и сооружений, инженерного оборудования и др. Показатели качества нанокompозиционного сырья, содержащиеся в стандартах: долговечность, восстанавливаемость, транспортабельность, а также показатели конструкций, зданий и сооружений и их элементов, инженерного оборудования, оснастки и инструмента: бездефектность, надежность, безопасность – не охватывают полностью проблему управления качеством. Этот пробел можно восполнить внедрением на строительных предприятиях 3D-печати стандарта системы менеджмента качества ГОСТ Р ИСО 9001-2015, который предполагает создание обратной связи с потребителями.

Конструирование процессной структуры менеджмента качеством [27] согласно требованиям стандарта ИСО 9001 отражает необходимость формирования системы ответственности 3D-аддитивной печати. Механизм мониторинга, а также корректирующие и предупреждающие мероприятия соответствия производства трехмерных сооружений и качества продукции установленным внешним и внутренним

требованиям реализуют оценки достижения целей в области управления технологическим оборудованием.

Эксплуатация и обслуживание технологического оборудования в ходе 3D-печати строительной инфраструктуры требует соответствующей организации сертификации и лицензирования транспортных систем [28]. В настоящее время технологичное управление оборудованием 3D-аддитивной печати строительных нанокompозитов возможно на стадии использования автобетоносмесителей для доставки бетонной наносмеси.

Качество бетонирования в процессе 3D-печати строительных нанокompозитов зависит во многом от экономически выгодной транспортировки готовой нанобетонной смеси, приготовленной на заводе. Использование автобетоносмесителя позволяет увеличить производительность 3D-аддитивной технологии, оптимизировать затраты на приготовление и доставку бетона [29, 30]. Автобетоносмесители могут использоваться также для доставки дозированных компонентов бетонной наносмеси, приготовления ее в пути следования или по прибытии на строительный объект 3D-аддитивной печати.

Автобетоносмеситель представляет собой вращающийся барабан, установленный на раме автомобильного шасси, а внутри барабана имеются две спиральные лопасти, при вращении которых компоненты нанобетонной смеси поддерживаются в тиксотропном состоянии. Характерной особенностью автобетоносмесителя с миксерами является постоянный угол наклона от 10 до 15 градусов емкости для замеса цементно-песочного нанораствора. Закрытый вращающийся барабан сохраняет однородность бетонной наносмеси 3D-аддитивной печати и защищает от воздействия внешних негативных факторов, и тем самым поддерживаются необходимые эксплуатационные характеристики нанокompозиции при транспортировке.

В настоящее время в процессе 3D-печати используются автобетоносмесители с гидроприводами, которые значительно легче по сравнению с механической трансмиссией, а также имеют возможность бесступенчатого регулирования частоты вращения барабана в диапазоне 0–20 оборотов в минуту. Гидронасос гидропривода приводится в действие дизельным двигателем автобетоносмесителя или отдельным двигателем, а устройство управления [31] позволяет устанавливать скорость вращения дизельного двигателя в зависимости от оборотов вращения смесительного барабана. Автобетоносмесители с миксером от российских производителей представлены моделями, которые оснащены индивидуальной силовой установкой, функционирующим в автономном режиме барабаном объемом до 12 м³.

Обоснованно рассчитанная стоимость доставки бетонных наносмесей в ходе 3D-аддитивной печати дает возможность оперативно выбирать автобетоносмесители подходящего типоразмера в зависимости от дальности транспортировки наноконпозиций, объема емкости барабана, технических характеристик и условий работы (колебания температуры от -20 до $+40^{\circ}\text{C}$). Лучшим вариантом для транспортировки нанобетонной смеси на расстояния от 4 до 6 км являются автобетоносмесители объемом 6–8 м^3 .

На рынке автобетоносмесителей Российской Федерации около 70% составляет доля «Туймазинского завода автобетоновозов» (Республика Башкортостан). Например, завод производит автобетоносмесители TZA/KAMAZ (емкостью 5–12 м^3), которые предназначены для транспортировки в места укладки или бетоноподающие устройства (автобетононасосы и стационарные бетононасосы). Автобетононасос-смеситель TZA эффективно сочетает транспор-

ку к месту укладки на строительном объекте и подачу бетонной смеси (до 50 $\text{м}^3/\text{ч}$) на требуемую высоту 28,4 м, что позволяет сохранить оптимальную однородность бетонной наноконпозиции 3D-аддитивной печати при перевозке и перекачке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Технологичное управление оборудованием для 3D-аддитивной печати строительных наноконпозиций сокращает энергетические затраты на 26–29%, а также одновременно понижает уровень вибраций. Преимуществами аддитивных технологий 3D-печати в строительстве зданий и сооружений являются цифровая роботизация строительного процесса, сокращение времени от проектирования до завершения работ в 8–11 раз и др. Оптимальным вариантом транспортировки нанобетонной смеси на расстояния от 4 до 6 км для 3D-аддитивной печати строительных наноконпозиций являются автобетоносмесители объемом 6–8 м^3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Славчева Г.С., Артамонова О.В. Управление реологическим поведением смесей для строительной 3D-печати: экспериментальная оценка возможностей арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве. — 2019. — Том 11, № 3. — С. 325–334. — DOI: [10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334).
2. Колесников А.Г. Модернизация конструкции экструдера строительного 3D-принтера и подбор составов для него // Урбанистика. — 2019. — № 2. — С. 64–70. — DOI: [10.7256/2310-8673.2019.2.29597](https://doi.org/10.7256/2310-8673.2019.2.29597).
3. Славчева Г.С., Акулова И.И., Вернигора И.В. Концепция и эффективность применения 3D-печати для дизайна городской среды // Жилищное строительство. — 2020. — № 3. — С. 49–55. — DOI: [10.31659/0044-4472-2020-3-49-55](https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-3-49-55).
4. Сергеева О.Ю. Аддитивные технологии и 3D-моделирование // Нанотехнологии в строительстве. — 2018. — Том 10, № 4. — С. 142–158. — DOI: [10.15828/2075-8545-2018-10-4-142-158](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-142-158).
5. Халиков Р.М., Иванова О.В., Короткова Л.Н. и др. Супрамолекулярный механизм влияния поликарбоксилатных суперпластификаторов на управляемое твердение строительных наноконпозиций // Нанотехнологии в строительстве. — 2020. — Том 12, № 5. — С. 250–255. — DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255).
6. Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Наномодифицирование цементных композитов на технологической стадии жизненного цикла // Нанотехнологии в строительстве. — 2020. — Том 12, № 3. — С. 130–139. — DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-3-130-139](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-3-130-139).
7. Иванов Л.А., Сюй Л.Д., Бокова Е.С. и др. Изобретения, основанные на использовании нанотехнологий, позволяют получить принципиально новые технические результаты. Часть V // Нанотехнологии в строительстве. — 2020. — Том 12, № 6. — С. 331–338. — DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-6-331-338](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-331-338).
8. Perkins I., Skitmore M. Three-dimensional printing in construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*. 2015;15(1):1–9.
9. Le T.T., Austin S.A., Lim S. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012;45(8):1221–1232.
10. Asprone D., Auricchio F., Menna C. et al. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*. 2018;165:218–231. Available from: doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018).
11. Комаринский М.В., Червова Н.А. Транспорт бетонной смеси при строительстве уникальных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2015. — № 1 (28). — С. 6–31.
12. Иванова О.В., Короткова Л.Н., Халиков Р.М. Оптимизированное управление функционированием электротехнического оборудования в 3D печати // Сб. статей 6-й Всерос. конф. «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». — Курск: ЮЗГУ, 2021. — С. 88–91.
13. Егорова Н.В., Иванова Н.К., Комков В.Г. Конструкции бетонных насосов // Ученые записки ТОГУ. — 2018. — Том 9, № 2. — С. 1052–1057.
14. Иванова О.В., Короткова Л.Н., Фаттахов М.М. и др. Надежное управление качеством функционирования электротехнического оборудования в 3D аддитивных технологиях // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2020. — Том 16, № 3. — С. 43–49.

15. Важаев К.В., Иванова О.В., Халиков Р.М. и др. Управление качеством функционирования технологической линии водоснабжения с использованием современных датчиков // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 13 (65). – С. 127–132.
16. Иванова О.В., Халиков Р.М., Короткова Л.Н. Результативное управление электротехническим оборудованием технологической схемы производства качественной воды // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Том 14, № 2. – С. 21–27.
17. Халиков Р.М., Иванова О.В. Технологические схемы решения экологических проблем регионального производства материалов // Nauka-Rastudent.ru. – 2014. – № 3 (03). – С. 10.
18. Пустовгар А.П., Адамцевич А.О., Волков А.А. Технология и организация аддитивного строительства // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 9. – С. 12–20.
19. Павлов А.П., Дворянkin А.О. Обеспечение надежности и работоспособности 3D-принтеров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2020. – № 8. – С. 20–25. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-8-20-25.
20. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Том 8, № 1. – С. 90–101.
21. Гусев Б.В. Бетоны с наполнителями различной дисперсности и их наномодификация // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 4. – С. 384–393. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-4-384-393.
22. Гусев Б.В., Кудрявцева В.Д., Потапова В.А. Бетоны с нанодобавкой из обожженного вторичного бетона // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 5. – С. 245–249. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-245-249.
23. Синицин Д.А., Халиков Р.М., Булатов Б.Г. и др. Технологичные подходы направленного структурообразования нанокомпозиций строительного назначения с повышенной коррозионной устойчивостью // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 2. – С. 153–164. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-2-153-164.
24. Пудовкин А.Н., Синицин Д.А., Салов А.С. и др. Технологические процессы производства бетонной смеси. Оборудование, механизация, автоматизация. – Уфа: УГНТУ, 2019. – 198 с.
25. Стрижнев И.В., Фролов Ю.А., Кинев С.А. и др. Бортовое ограждение // Патент RU 102944 U1. Оpubл. 20.03.2011.
26. Иванова О.В. Словарь основных терминов управления качеством. – Уфа: Изд-во БашГУ, 2014. – 68 с.
27. Савельева Н.А., Чернышев А.Н. Оценка строительной продукции в системе менеджмента качества // Аудит и финансовый анализ. – 2008. – № 3. – С. 312–318.
28. Иванова О.В. Сертификация и лицензирование в сфере транспортных систем. – Уфа: УГНТУ, 2019. – 44 с.
29. Bedov A., Salov A., Gabitov A. CAD methods of structural solutions for reinforced concrete frame. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018;365:052032.
30. Семин А.С., Вахрушев С.И. Техничко-экономическое сравнение вариантов автобетоносмесителей различных типоразмеров // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2018. – Т. 2. – С. 445–454.
31. Фрей В., Руф Б. Устройство управления автобетоносмесителем // Патент RU 2467872 C2. Оpubл. 27.11.2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванова Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», архитектурно-строительный институт, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8366-2004>, e-mail: olgachemist@mail.ru

Халиков Рауф Музагитович, кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства», архитектурно-строительный институт, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7584-5516>, e-mail: rauf_khalikov@mail.ru

Салов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства», архитектурно-строительный институт, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, e-mail: salov@list.ru

Низамутдинов Малик Халилович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», архитектурно-строительный институт, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, e-mail: nizmal@mail.ru

Зиннатуллин Вячеслав Валерьевич, старший преподаватель кафедры «Управление и сервис в технических системах», архитектурно-строительный институт, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, e-mail: slawa915@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 09.03.2021.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 28.03.2021.

Статья принята к публикации: 31.03.2021.