

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-70-85

<sup>1,\*</sup>Агафонов Я.Е., <sup>1,2</sup>Чернышева Н.В.<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: agafonovj1996@yandex.ru

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВОЗВОДИМЫХ СПОСОБОМ 3D-ПЕЧАТИ

**Аннотация.** Представлен комплексный анализ современных методов проектирования и расчета несущих конструкций, изготавливаемых методом 3D-печати бетона, поскольку на данный момент отсутствуют универсальные нормативные методики. Систематизированы ключевые проблемы проектирования, связанные с выраженной анизотропией материала, неоднородностью свойств по высоте элемента и связью между печатными слоями, поскольку особенности возведения конструкций способны создать неоднородность по прочности на сжатие между низом и верхом стены до 108 %. Рассмотрены экспериментальные данные по работе балок при изгибе, стен при осевой и сейсмической нагрузке, эффективности различных схем армирования, а также современные подходы к численному моделированию, учитывающему специфику возведения конструкций методом 3D-печати. Также рассмотрены эксплуатационные факторы, влияющие на конструктивные решения стен.

Установлено, что при расчете напечатанной конструкции допустимо использовать переработанные формулы для каменных конструкций, однако точность сильно снижается при введении армирования. Только вертикальное армирование стены позволяет увеличить несущую способность до 26 %. Описаны примеры успешно примененных конечно-элементных моделей, учитывающих все особенности конструкций. Их использование позволило получить расхождение в значениях прочности конструкции не более 4 % по сравнению с экспериментальными.

**Ключевые слова:** проектирование, стеновые конструкции, методы расчета, 3D-печать, аддитивные технологии.

**Введение.** План Министерства строительства по развитию строительной отрасли предусматривает введение к 2030 году 1 млрд м<sup>2</sup> жилья (Распоряжение Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 3268р «Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.»). При этом одной из проблем, с которыми сталкивается строительная отрасль России, является дефицит квалифицированной рабочей силы, для решения которой необходимо поиск способов снижения трудозатрат. Одним из перспективных направлений по снижению трудозатрат в строительстве выступает автоматизация строительных процессов, ключевым методом которой для возведения конструкций становится технология трёхмерной печати.

Строительство методом 3D-печати обеспечивает следующие преимущества: сокращение сроков и стоимости строительства зданий и сооружений, оперативность изменений в проекте на этапе производства, сокращение потерь и практически отсутствие отходов производства, уменьшения объемов складских запасов, создание разнообразных архитектурных решений и др. Сейчас таким способом производят разные части зданий: цельные стены в один слой, готовые плиты, отдельные блоки и сборные системы [1–4].

Несмотря на существование успешного опыта возведения зданий и сооружений с помощью аддитивных технологий, не имеется достаточного количества теоретически и практически обоснованных подходов для формирования нормативно-методической базы [5, 6].

В существующих стандартах (ГОСТ Р 57 558–2017, ГОСТ Р 57 586–2017, ГОСТ Р 57 587–2017) в описании требований к технологии производства работ с помощью аддитивных технологий в промышленности не содержится рекомендаций по проектированию конструкций, а ответственность возлагается полностью на проектировщика. Даже действующий ПНСТ 495-2020 «Строительные работы и типовые технологические процессы. Аддитивные технологии. Применение трехмерной печати (3D-печать) в строительстве. Общие требования» (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 11.11.2020 N 111-пнст) устанавливает лишь требование соответствия 3D-печатаемых конструкций стандартам по проектированию традиционных конструктивных решений. Отсутствие унифицированных рекомендаций по проектированию и расчёту конструкций, возводимых с помощью аддитивных технологий, ограничивает их широкое внедрение в массовое строительство. Таким образом, из анализа многолетних научных исследований российских и зарубежных ученых

было выявлено, что внедрению разработок, касающихся аддитивных технологий, препятствует отсутствие стандартов, нормативной документации, допущенных строительных материалов и технологий, по всей совокупности показателей, отвечающих требованиям печати.

Современный этап развития строительной 3D-печати характеризуется параллельными процессами: с одной стороны – увеличением количества реализованных проектов и расширением технических возможностей, а с другой – углубленной научной проработкой фундаментальных вопросов механики материалов, расчетных методов и оптимального проектирования конструкций [7]. Создание универсальных стандартов проектирования и нормативной базы станет решающим шагом для превращения этой технологии из опытной в серийную.

Исходя из огромных требуемых объемов строительства, а также с учетом отечественного и зарубежного опыта и разработок можно сформулировать **цель работы**: провести системный обзор современных методов расчета и проектирования стеновых конструкций, изготовленных методом 3D печати, а также методов их численного моделирования для формирования рекомендаций по проектированию 3D-печатных конструкций.

**Для достижения цели авторами были поставлены следующие задачи:**

- оценка влияния технологических факторов и характеристик конструкции на прочность конструкции и способ расчета;
- изучить характер работы армированных и неармированных 3D-печатных конструкций;
- проанализировать способы численного моделирования поведения 3D-печатных конструкций;
- разработать предложения по выбору конструктивных решений и способов создания численной модели для расчета.

**Материалы и методы** основаны на сборе, систематизации и сравнительном анализе научной литературы, нормативных документов, научных и практических работ в базах Elsevier, Springer, КиберЛенинка, Elibrary, посвященных экспериментальным исследованиям и численному моделированию поведения 3D-печатных конструкций для обеспечения надежности и оптимизации проектирования аддитивных строительных объектов.

#### **Отечественный опыт**

В работах авторов [5, 6, 8] освещены варианты использования широкой номенклатуры материалов для 3D-печати и способы совершенствования технологии производства различных

видов строительных конструкций. Для «технологии послойного синтеза» чаще всего используют формовочные бетонные смеси на основе цемента.

Особый интерес представляют эффективные композиты нового поколения на основе многокомпонентных систем с микро-, ультра- и нанодисперсными наполнителями в сочетании их с другими добавками. Предлагается [9] быстротвердеющий реакционно-порошковый бетон, армированный стальной или полимерной микрофиброй, особенностью которого является отсутствие крупного заполнителя без потери в соотношении вяжущая/твердая составляющие, и высокие эксплуатационные характеристики (бетон класса В60 и более).

Предлагаются формовочные смеси из мелкозернистого и песчаного видов бетонов, модифицированные органическими добавками (гиперпластификаторами, ускорителями твердения, минеральным волокном) [10, 11]. В качестве арматуры может быть применена инновационная технология тканых объемно-сетчатых каркасов [12].

Перспективным для возведения 3D-печатных конструкций является применение быстротвердеющих гипсовых композиционных материалов с низким содержанием клинкера [5, 7, 13–15], которые по физико-механическим свойствам и стойкости подобны бетонам на портландцементе, но обладают значительными преимуществами в возможности регулировать в широких пределах сроки схватывания и скорость твердения бетона, достигающего распалубочную прочность без термообработки. Такие качества исключительно важны в технологии послойного синтеза.

В своих работах авторы, в основном, изучают методы повышения физико-механических характеристик бетонных смесей и затвердевших бетонов [16] путём проектирования их состава (подбора оптимальных соотношений компонентов и состава вяжущего, заполнителя и пластификатора), выбора и изучения методов армирования фиброволокнами, которые рассматриваются только с точки зрения возможности производства. А методы расчета конструкций, учитывающие особенности данной технологии, не входят в область исследования. В работах [5, 6] предложено конструктивное решение многослойной стены из разработанного материала, но расчет подобной конструкции предлагается для дальнейшего развития.

В настоящее время в России технология строительной 3D-печати развивается активно, реализовано несколько заметных проектов. Компания АМТ (в прошлом «Спецавиа») построила

10 зданий для коттеджного поселка в 2022-м году [17]. Возведенный отель «WonderDom» в тульском экопарке «Ясно Поле» стал первым 3D-печатным зданием сферической формы [18]. Он был построен в 2024 году спроектированное архитектором Тотаном Кузембаевым. Но в обоих случаях строительство велось по индивидуальному проекту и данных по расчету возводимых конструкций не имеется. С помощью 3D-печати из бетона возводилась несъемная опалубка, а заливаемый внутрь бетон отвечал за прочностные свойства конструкции.

### **Зарубежный опыт.**

#### **Используемые конструктивные решения**

В мире технология 3D-печати бетона уже перешла из разряда экспериментальных в практически применимый метод строительства. За последнее десятилетие было построено более 300 зданий с использованием данной технологии. Основной продукцией на текущем этапе являются стены жилых домов, возводимые как на месте, так и в заводских условиях с использованием порталных систем или роботизированных манипуляторов [2]. Однако современные исследования демонстрируют, что номенклатура конструктивных элементов стремительно расширяется за пределы стеновых ограждений, охватывая колонны, балки и плиты перекрытий [19].

Проблемой для широкого внедрения является переход от создания отдельных элементов к проектированию полнокомплектных зданий, отвечающих требованиям прочности, долговечности и сейсмостойкости. Как отмечается в ряде источников [5, 6, 20], отсутствие унифицированных нормативных методов расчета и нормативной базы остается основным сдерживающим фактором для массового строительства.

Для решения этой проблемы за рубежом активно разрабатываются расчетные методики и экспериментально исследуется поведение напечатанных конструкций. Так, исследования механического поведения стен из 3D-печатаемого бетонного массива (3DPCM) позволили установить зависимость их прочности от геометрии сечения (например, количества наклонных ребер) и предложить методы расчета на сжатие, сдвиг и их комбинированное воздействие [21].

Исследователи из Техасского университета [22] занимались проблемой обеспечения сейсмической стойкости 3D-печатаемых конструкций. Ими были испытаны стены с внутренним железобетонным каркасом и армированием между слоями печати, расчетные формулы для которых были валидированы методом конечных элементов.

Опубликованы работы по созданию полноценных балочных элементов в Южноафриканском университете Стелленбос [23]. Были изготовлены 3D-печатные армированные балки и для них на основе стандартов Eurocode выведены уравнения для прогнозирования изгибной прочности. Но, по итогам эксперимента, были выявлены достаточно большие расхождения с модифицированными уравнениями Еврокода, которые составили от 6 % до 45,4 % по предельному состоянию, вызванному потерей связи между печатанными слоями (рис. 1).

Таким образом, на основании проведенного обзора методов изготовления стеновых конструкций путем 3D-печати (экструзией, набрызгом и инъектированием) можно сделать вывод, что стандартные методы расчета не применимы, поэтому необходимо продолжить работу над поиском подходящих методов расчета. По мнению авторов работы [24] – будущее за гибридными подходами, сочетающими аддитивное производство с традиционными методами, например, печать несъемной опалубки с последующим армированием и бетонированием. Этот подход позволяет преодолеть текущие ограничения по армированию и использовать преимущества обеих технологий.

Экономическая целесообразность также становится предметом детального изучения. В ходе исследования [24] было установлено, что метод 3D-печати имеет ряд преимуществ как по стоимости, так и по срокам возведения. И печать с помощью роботизированной руки часто оказывается экономически эффективнее, чем заводское изготовление.

Для перехода от единичных проектов к серийной практике необходима стандартизация всего цикла работ. Для этого учеными из крупных университетов Китая, Бельгии и Швейцарии [25] был предложен метод организации строительного процесса, регламентирующий расчет и проектирование, оптимизацию методов строительства, настройку параметров печати, печать опытных образцов, пусконаладку перед печатью, а также печать на площадке с контролем процесса. Применение такого системного подхода на примере двухэтажного здания позволило минимизировать отклонения при печати, не превышающие 10 мм на 6 метров высоты [25]. Этот опыт особенно важен для России, где, как отмечено в исследовательской работе [20], актуальной задачей является разработка методических рекомендаций и стандартов для проектирования.

Такая задача требует обширных аналитических данных, включая оптимизацию составов бетонных смесей и теплотехнические расчеты для различных климатических зон. При расчете и

проектировании конструкций, изготовленных методом аддитивных технологий, классические подходы проектирования монолитного бетона требуют учета особенностей, определяющих несущую способность напечатанных элементов. Они могут отличаться ярко выраженными анизотропией свойств бетона и его неоднородностью,

связанными с технологией изготовления. Главную сложность составляет корректный учет особенностей межслойных зон (контактных поверхностей), которые являются зонами ослабления и определяют характер разрушения конструкций.

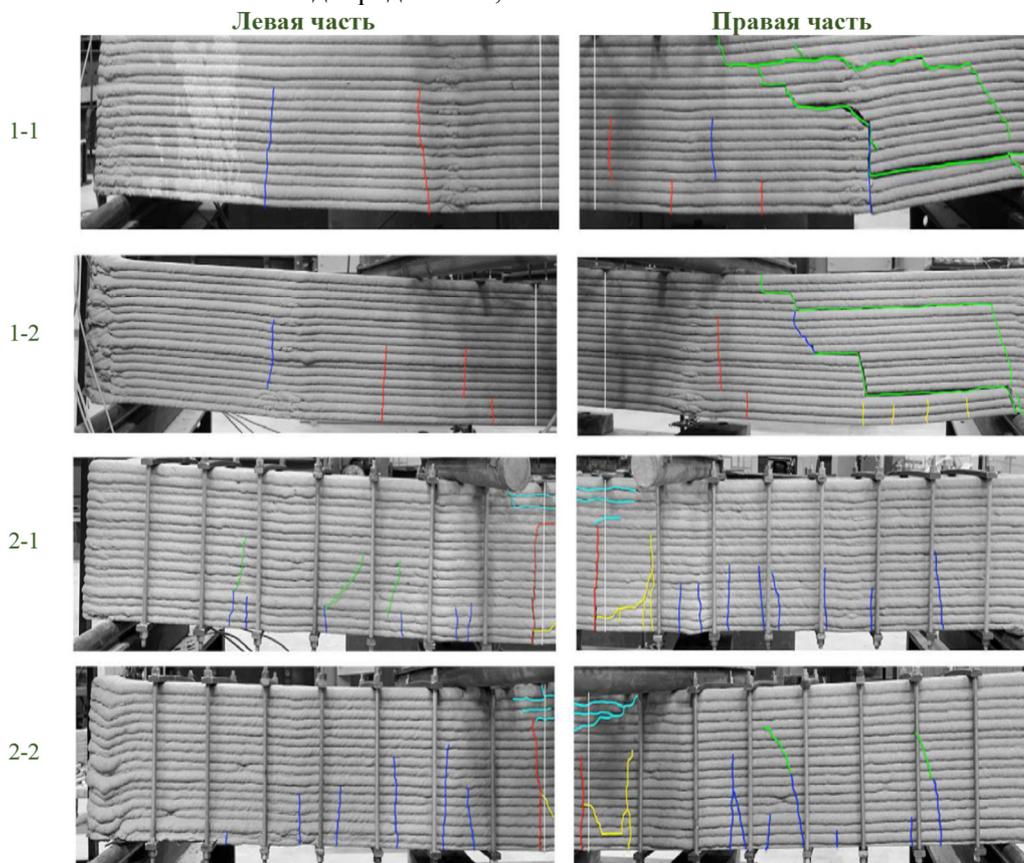


Рис. 1. Характер трещин на балках 1 и 2 после испытаний на 4-точечный изгиб [23]

### Анизотропия и механические свойства материала.

Фундаментальной основой для любого расчета являются достоверные характеристики материала. Экспериментальные исследования однозначно подтверждают, что 3D-печатный бетон является ортотропным материалом, а полный комплекс его свойств формируется на каждом из этапов технологического процесса. Критическую роль играет реология свежей бетонной смеси, в частности, ее структурная вязкость и тиксотропное поведение. Эти параметры обеспечивают формуемость при экструзии и мгновенное восстановление структурной прочности после укладки, предотвращая пластическую деформацию нижних слоев под весом последующих. Несоответствие реологических свойств приводит к геометрическим искажениям, создающим концентраторы напряжений. После укладки ключевым фактором становится кинетика набора ранней прочности, определяющая качество межслойной адгезии. Скорость гидратации должна

быть синхронизирована с темпом печати для формирования единого материала без образования рабочего шва, который в затвердевшем состоянии вызовет только усиление ортотропии.

Результаты исследований, проведенных в Харбинском институте [26], показывают, что прочность на сжатие в направлении, перпендикулярном печатным слоям (40,8 МПа), может быть на 17 % ниже, чем в направлении, перпендикулярном направлению печати (49,3 МПа). Испытания образцов из затвердевших бетонных смесей проводились согласно требованиям стандарта, но менялась грань, к которой прикладывалось сжимающее усилие. И было выявлено, что анизотропия механических свойств напрямую влияет на поведение масштабных конструкций. Более того, эти свойства не являются постоянными даже в пределах одного элемента.

Эксперименты со стенами разной высоты (до 2,36 м), проведенные международной командой ученых из Анкары, Стамбула, Тайваня и

Манчестера [27], выявили значительную вариацию механических и теплофизических свойств по высоте. Образцы были взяты из различных мест стены, с лицевых сторон и с торцов, из верхней и нижней частей, после чего керны были испытаны для определения их физико-механических свойств. В результате было выяснено, что нижние участки, уплотненные под собственным весом, имеют меньшую пористость и демонстрируют увеличение прочности на сжатие до 108 % и модуля упругости до 53 %, по сравнению с верхними. Это явление, обусловленное тиксотропным поведением бетонной смеси и временными интервалами между укладкой слоев, необходимо учитывать в расчетных моделях, поскольку оно напрямую влияет на распределение напряжений и общую устойчивость стены. Эта анизотропия свойств, наряду с неоднородностью плотности по высоте стены из-за гравитационного уплотнения, требует от проектировщика применения специальных расчетных моделей, явно учитывающих ослабленные плоскости и векторную природу прочностных характеристик или введения коэффициентов, учитывающих неоднородность конструкции.

#### Особенности поведения стен под осевой нагрузкой.

Экспериментальные исследования несущей способности стен при осевом сжатии формируют эмпирическую базу для верификации расчетных методов. Наблюдаемый характер разрушения является хрупким, с образованием вертикальных

трещин, развивающихся снизу-вверх, и последующим внезапным обрушением [26]. При этом эффективность использования прочности материала в стене без армирования и проемов может достигать 28,5 % от кубиковой прочности бетона, что примерно на 7 % выше аналогичного показателя для традиционной кладки [28]. Это указывает на потенциальные преимущества аддитивной технологии. Однако, наличие проемов резко меняет картину. Из-за возникновения изгибных напряжений в стене над проёмом прочность конструкции снижается на 21 % [28]. Важным конструктивным параметром является также соотношение высоты к толщине стены, которое оказывает нелинейное влияние на несущую способность, сначала увеличивая, а затем уменьшая ее [26].

В отличие от классических методов строительства, 3D-печать позволяет возводить любую форму стен. Группой ученых из Бангкока [29] были проведены испытания стены сложного сечения. При анализе формы разрушения такой стеновой конструкции (рис. 2) было получено расхождение в 36 % между расчетным значением прочности стены по площади поперечного сечения и результатом, полученным полномасштабным экспериментом. Такое расхождение, по мнению ученых, возможно в результате потери устойчивости элемента конструкции. Поэтому для точного расчета прочности конструкции необходимо учитывать потерю устойчивости её элементов.

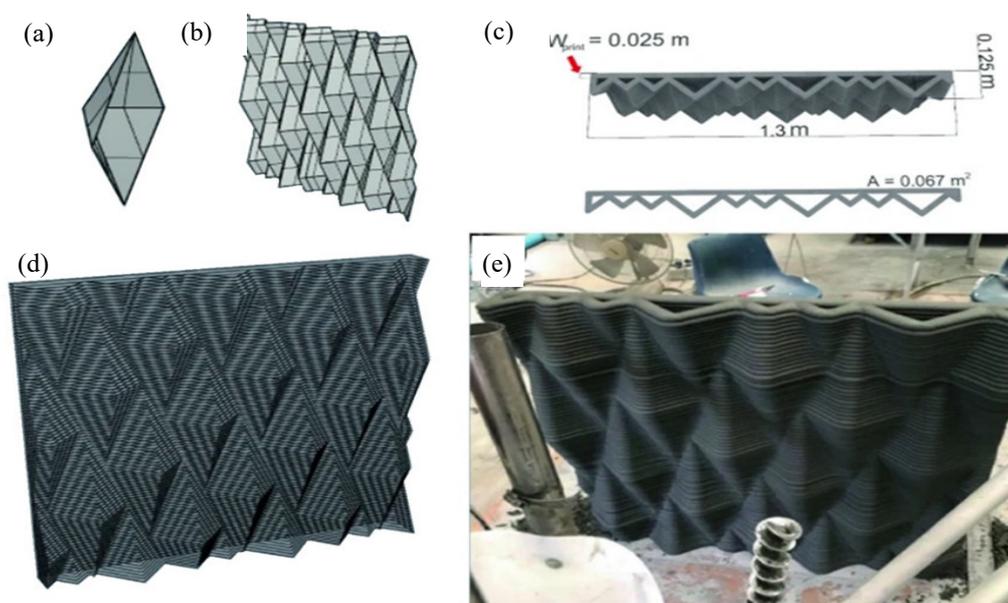


Рис. 2. Элемент внешней поверхности стены; (b) внешняя поверхность стены; (c) изготовление внутренней и внешней поверхностей; (d) послойная модель стены; и (e) напечатанная 3D-панель. [29]

#### Работа конструкций с армированием.

Вопрос армирования остается одним из наиболее критичных для использования технологии 3D-печати в сейсмически опасных районах и

в многоэтажном строительстве. Исследования показывают, что даже минимальное вертикальное армирование, соответствующее нормам для

каменной кладки, кардинально меняет поведение стен.

Авторами [28] использована арматура 10М и 15М без указания стандарта, но указаны площадь поперечного сечения, 100 мм<sup>2</sup> и 200 мм<sup>2</sup> соответственно, а также прочность, 450 МПа и 465 МПа соответственно. При испытании различных видов стен с арматурой классов 10М и 15М установлено увеличение несущей способности на

14 % и 26 %, соответственно, по сравнению с неармированными образцами, а также значительный рост предельной деформации и продолжение роста пластических деформаций после достижения максимальной нагрузки (рис. 3). Это приводит к смене режима разрушения - с хрупкого на более вязкое, с локализованными повреждениями, что принципиально важно для безопасности.

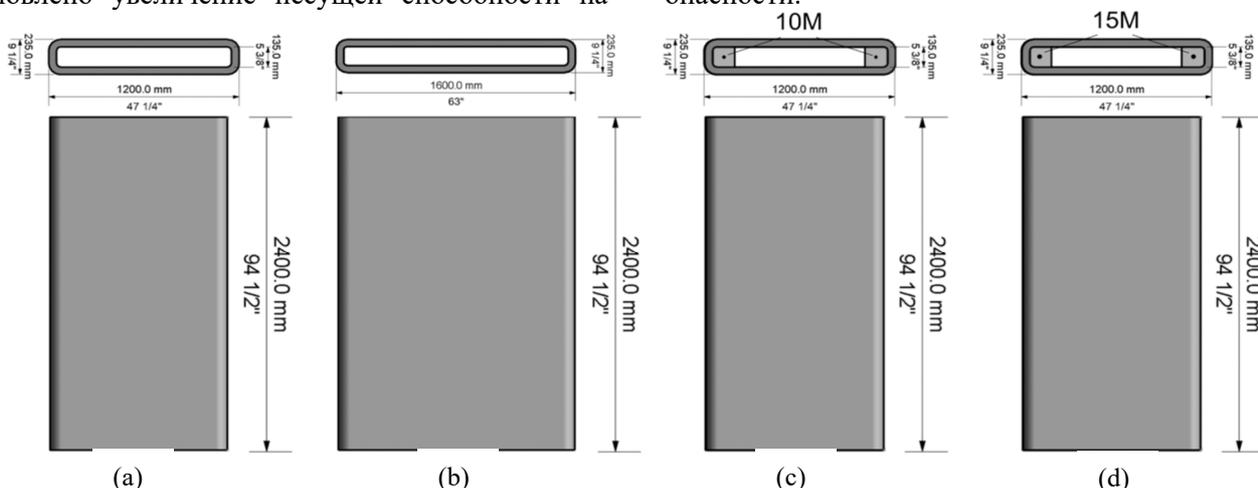


Рис. 3. Конфигурация стен, напечатанных на 3D-принтере, без оконных проемов [28]

В работе [30] установлена эффективность комбинированного армирования микроволокнами и стержневой арматурой, закладываемой в процессе печати, которое обеспечивает высокую несущую способность. Однако горизонтальное армирование может иметь негативный эффект, создавая плоскость ослабления вдоль слоя и снижая несущую способность на сжатие до 25 % [26], что необходимо учитывать при проектировании.

Отдельным способом армирования является создание 3D-печатных стен, играющих роль несущих ограждающих конструкций и, в то же время, несъемной опалубки для железобетонного

каркаса, методика проектирования такого здания предложена в исследовании С. Шарма и др. в работе [31], выполненной в Техасском университете A&M. В своей статье исследователи сформулировали принципы проектирования такой конструктивной схемы: размещение колонн железобетонного каркаса внутри 3D-печатной стены в местах пересечения стен (рис. 4, 5), усиление проемов монолитными элементами (рис. 6), а также расчет шага армирующих сеток. Состоятельность данной методики с использованием указанных принципов, подтверждена расчетами на примере двух спроектированных зданий.

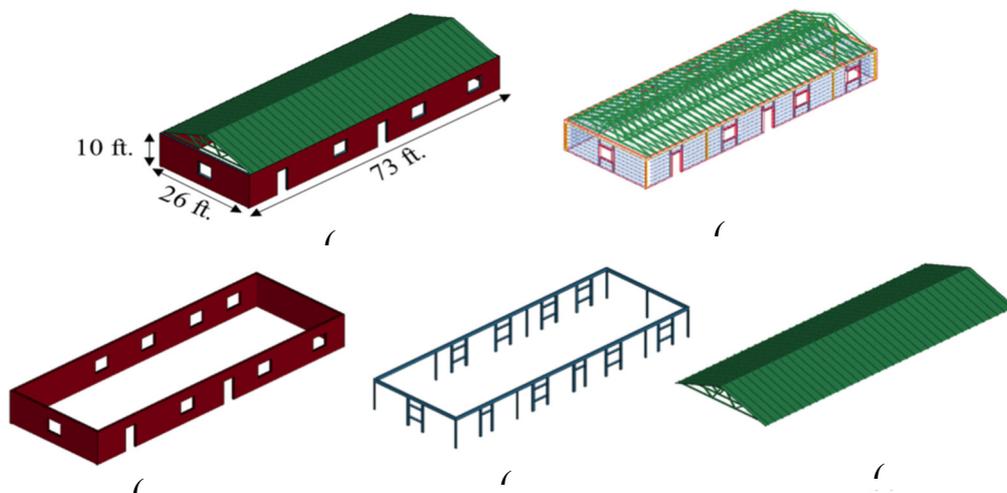


Рис.4. Схематическое изображение расчетной модели здания 1: (а) вся конструкция (б) армирование и легкие деревянные ферма (с) 3-D напечатанные компоненты (д) железобетонные компоненты (е) крыша [31]

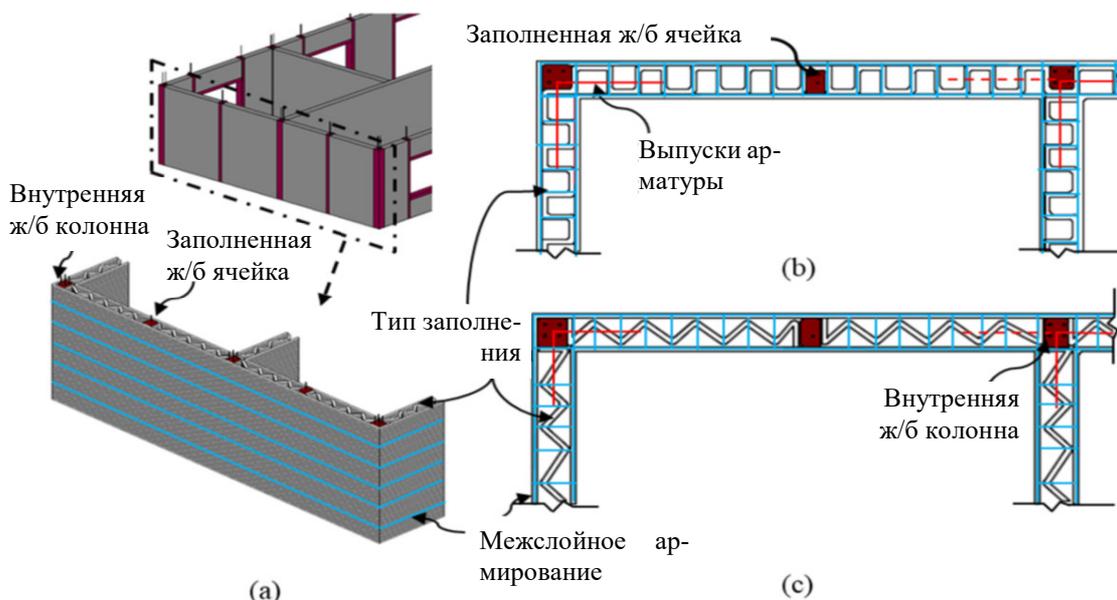


Рис.5. Типовая 3D-печатаемая стена в предлагаемом 3D-напечатанном здании: (а) схематическое изображение; поперечный разрез с (b) прямоугольной внутренней структурой и (c) треугольной внутренней структурой [31]

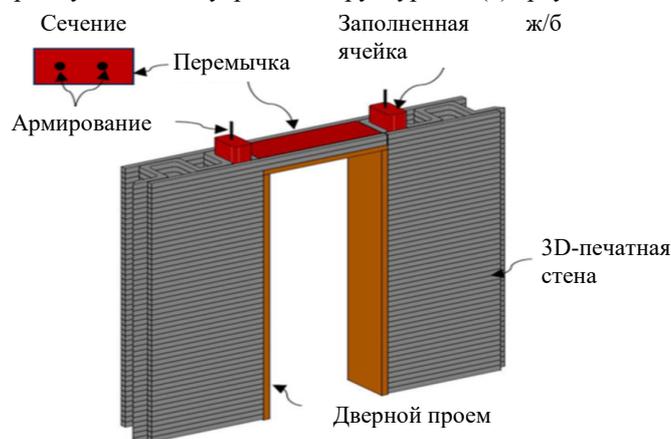


Рис. 6. Железобетонные ячейки, заполненные раствором, и перемычка, «закрывающая» дверной проем [31]

Принятые проектные решения обуславливают подход к расчету конструкций, поэтому далее рассматриваются исследования по поиску предельных состояний конструкций, методы аналитического расчета и методы учета особенностей таких конструкций при расчете методом конечных элементов.

#### Расчетные модели и методы численного анализа.

Для подтверждения выбранных конструктивных решений необходимы методы численного расчета. В случае с 3-D печатными конструкциями отмечается недостаточная разработанность нормативно-методической базы и отсутствие унифицированных рекомендаций. Так, в [26] показано, что для предварительной оценки разрушающей нагрузки стен под осевым сжатием может быть использована формула, разработанная на основе стандарта GB50010–2010 по проектированию бетонных конструкций, показавшая хорошую согласованность с экспериментами.

В то же время по результатам расчетов и испытаний исследователи из университета в канадском Виндзоре сделали вывод [28], что стандарт CSA S304–14 для каменных конструкций не обеспечивает требуемую точность при расчете неармированных напечатанных стен, что указывает на необходимость разработки специализированных нормативов.

Применимость стандартов для каменных конструкций оценивалась и американскими исследователями [31], предложившими формулы для расчета напряжений в 3D-печатной стене и валидировали методику на расчетной конечно-элементной модели. Был проведен анализ пригодности традиционных методик расчета для получения значений усилий и перемещений в 3D-печатных ограждающих стенах, работающих совместно с железобетонным каркасом. На основе стандарта для каменных конструкций TMS 402.602-22, разработаны формулы, позволяющие рассчитать прочность 3-D печатаемых конструкций. По итогам конечно-элементного анализа

расхождение результатов составило всего лишь около 4 %. Однако испытания были проведены для несущих стен, где основную нагрузку на себя брал железобетонный каркас, поэтому что, на взгляд авторов, предопределило положительный результат.

Наиболее перспективным инструментом является метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий явно учесть анизотропию свойств и связь между печатанными слоями. Ученым [32] удалось создать численную модель, учитывающую снижение прочности в области контакта печатных слоев. При определении предела упругости, максимальной и критической нагрузок точность составила 7,9 %, 1,1 % и 3,9 % соответственно.

Подобными исследованиями для стен разной конфигурации успешно занимались ученые и эксперты в Бангкокском университете Таммасат [33] установившие, что помимо учета связи между напечатанными слоями, важна внутренняя структура конструкции для стен сложных сечений. Применение МКЭ позволило ученым [34]

сформировать точную модель конструкции и выявить зоны концентрации растягивающих напряжений. Полученные значения согласуются с экспериментальными и могут достигать 12 % прочности бетона на сжатие, что приводит к трещинообразованию и разрушению конструкции.

Группой ученых из Голландии [30] при моделировании стен и балок были применены подходы, аналогичные моделям для каменных конструкций: подходы двух- и трехмерного моделирования кладки в расчетном комплексе. Натурные эксперименты показали, что результаты, полученные с помощью моделей, оказались с невысокой погрешностью, расхождение составило от 2 % до 14 %. Для гибридных конструкций, где напечатанная оболочка служит несъемной опалубкой, ключевым является прочность контактной зоны между напечатанной опалубкой и залитым внутрь бетоном на сдвиг и отрыв.

Исследователями Ли Вонг и др. в [35] установлено, что прочность зависит от высоты печатных слоев, промежутка времени между печатью опалубки и укладкой бетона среднего слоя (рис. 7).

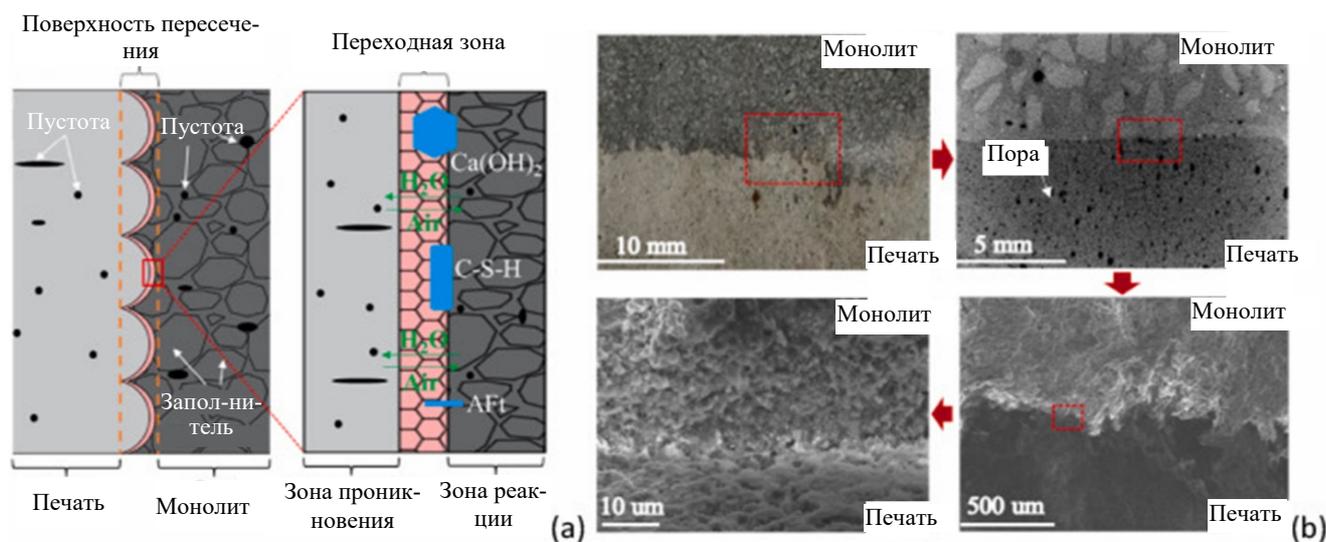


Рис. 7. Зона контакта в переходном слое между 3D-печатаемой бетонной опалубкой, и монолитным бетоном [35]

Промежуток времени между печатью опалубки и укладкой бетона влияет на прочность на сдвиг и отрыв из-за образования водяной плёнки на ранних стадиях твердения. Высота слоя влияет на прочность на сдвиг, в то время как прочность на отрыв больше зависит от структуры материала.

Авторами из китайского университета Хебей было выполнено проектирование здания из 3D-печатных изделий [36]. Элементы несъемной монолитной опалубки изготавливались методом

3D-печати и монтировались на площадке. Внутри соединенных элементов заливался бетон каркаса здания. Далее, с помощью расчетной модели, определялись наиболее напряженные участки конструкции (рис. 8). Для зон с наибольшими напряжениями проведен численный анализ полойным моделированием и моделированием единым телом, последний способ показал большие значения напряжений, данное расхождение следует учитывать при проектировании.

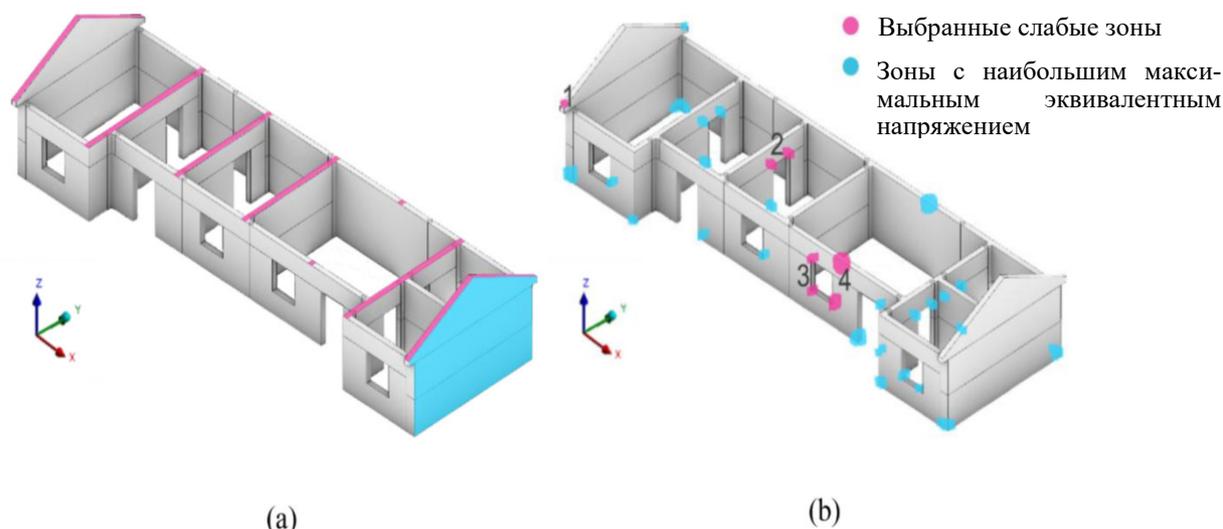


Рис. 8. Схема расчетной модели (а) Места приложения нагрузки: розовая область представляет собой места приложения вертикальной нагрузки от крыши, а голубая область – места приложения горизонтальной ветровой нагрузки. (б) Слабые места конструкций: слева направо [36]

Несмотря на значительный прогресс в исследованиях, в существующих инженерных моделях зданий, как правило, не учитываются специфические факторы аддитивного производства, например, реальная прочность сцепления между слоями, зависящая от временного интервала между укладкой слоёв, и усадочные напряжения, возникающие в процессе послойного нанесения и зависящие от скорости печати и реологических свойств смеси [37]. Требуют дальнейшего изучения различные схемы армирования, различная геометрия стен, типы бетонных смесей и внутренняя структура стен, особенно стен с проемами [28]. Для гибридных конструкций с напечатанной опалубкой актуальны исследования по совместной работе опалубки и заполнения, а также по методам армирования для обеспечения прочности и устойчивости элемента при эксплуатационных нагрузках [35].

Таким образом, современное состояние расчета и проектирования напечатанных стеновых конструкций характеризуется активным переходом от эмпирических исследований к разработке комплексных численных моделей, явно учитывающих анизотропию свойств материала и дефектность межслойных зон. Успешное проектирование требует синергии между усовершенствованием технологических параметров печати, оптимизацией состава бетонной смеси [16], разработкой эффективных стратегий армирования и созданием специализированных, верифицированных экспериментально, методик расчета.

#### Теплофизические свойства конструкции.

Выбор конкретной конструкции и технологии возведения 3D-печатной стены определяется не только требованиями прочности, но и комплексом факторов, влияющих на жизненный

цикл здания: экологическим воздействием, теплозащитными свойствами и эксплуатационной надежностью в различных условиях. Эти аспекты тесно взаимосвязаны и требуют интегрированного подхода на стадии проектирования.

В 3D-печатаемой конструкции на сопротивление теплопередаче влияют сразу несколько факторов: пористость материала, пустоты в теле конструкции и геометрия поверхности. Для оптимизации свойств 3D-печатных стен здания с учетом этих факторов [38] предложено несколько методов:

- упрощение геометрии конструкции;
- использование теплоизоляции вместо полостей внутри конструкции;
- при оборудовании внутренних полостей не увеличение их размера, а ввод параллельных плоскостей для уменьшения конвективной теплопередачи;
- использование легких заполнителей и материалов с низкой плотностью;
- использование фибры для повышения прочности конструкции.

Как показали экспериментальные исследования авторов в [27], теплопроводность материала неоднородна даже в пределах одного элемента: из-за уплотнения под собственным весом верхние слои конструкции имеют более высокую пористость и теплопроводность нижней части стены может быть до 26 % выше, чем верхней. Это означает, что упрощенный расчет по средним значениям теплопроводности может давать существенную погрешность.

Для повышения сопротивления теплопередаче предлагаются различные способы. Авторы [39] проработали несколько вариантов структуры стен для разных климатических зон и уста-

новили, что основным методом понижения теплопроводности классической 3D-печатной стены является установка внутренних связей в несколько рядов (рис. 9), что позволяет уменьшить теплопроводность до  $0,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$ .

Авторы работы [40], исследуя различные соотношения теплоизоляционного материала и воздушной прослойки внутри 3D-напечатанных стен, предлагают использовать комбинированную изоляцию. Для проектных расчетов предложено универсальное уравнение оценки теплопроводности стены в зависимости от доли заполнения изоляционным материалом, что позволяет

целенаправленно достигать требуемых нормативных значений и снижать энергопотребление здания. Подобное конструктивное решение 3D-напечатанных стен исследовалось и авторами [41]. Ими были проведены испытания по определению теплопроводности и огнестойкости стен различных видов поперечного сечения, позволившие сделать вывод: чем меньше перемычек между внешней и внутренней частями стены и чем крупнее полости в конструкции, тем ниже теплопроводность и тем меньше повреждения от огневого воздействия на конструкцию.

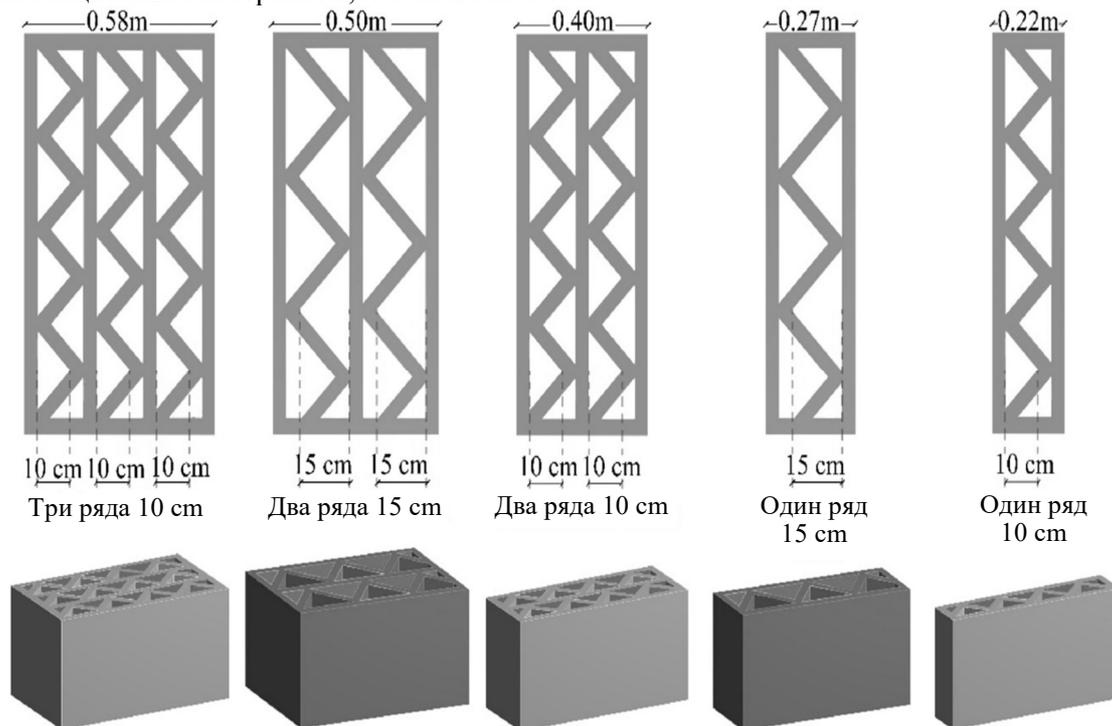


Рис. 9. Размеры и толщина различных видов поперечного сечения испытанных стен. [39]

Конвективному переносу тепла в крупных пустотах конструкции препятствует разделение крупных воздушных полостей на мелкие, что позволяет удовлетворить требованиям стандарта BS 476 по прочности при воздействии огня в течение 3 часов, и доказано при огневых испытаниях полномасштабной конструкции.

Таким образом, проектирование внутренней геометрии стены представляет собой баланс между требованиями прочности (где связи необходимы) и огнестойкости (где они могут как помогать, так и вредить в зависимости от конфигурации).

**Выводы.** Технологии 3D-печати привлекают различных исследователей для создания несущих конструкций. Основными типами конструкций, для которых разрабатываются подходы проектирования, а также производятся прочностные расчеты и испытания, являются:

- несущие полые стены с внутренними связями и без;
- несущие армированные стены, с полным или частичным заполнением;
- совмещенный каркас из 3D-печатных ограждающих стен, выполняющих функцию несъемной опалубки для несущего железобетона;
- совмещенный каркас из 3D-печатных изделий, заполняемых несущим железобетонным каркасом.

Что касается методов расчета и проектирования, то исследователи проводят параллели с каменными конструкциями, однако экспериментальные исследования говорят о расхождениях для несущих конструкций, а также для конструкций нестандартной формы. По этой причине для проектирования таких конструкций проектировщику следует учитывать анизотропию свойств

материала, в том числе в зависимости от направления печати. Также необходимо принимать во внимание местную потерю устойчивости элементов конструкции и связь между печатными слоями, которую можно повысить за счет оптимизации процесса печати. Также потеря несущей способности возможна при потере связи между напечатанным внешним опалубочным слоем конструкции и заполняющим материалом.

При анализе методов армирования можно сделать вывод, что наиболее рациональным является армирование стержнями в забетонированные секции, поскольку укладка сеток между слоями хотя и должна согласно расчету, повышать прочность стены, по факту создаёт дополнительную опасную плоскость разрушения, а также не позволяет осуществить полностью автоматизированное бетонирование, в то время как установка вертикального армирования возможно при укладке бетона в напечатанный контур, как в опалубку.

Свобода выбора геометрии стены позволяет экспериментировать с внутренней структурой и с формой поверхности. Во внутренней структуре перемычки могут обеспечить жесткость конструкции и снизить теплотехнические характеристики. Работа с внешней геометрией конструкции способна повысить трещиностойкость конструкции при подборе оптимальной формы поверхности, однако это не оказывает значительного влияния на предел прочности.

Нехватка стандартов и методик является сдерживающим фактором развития технологий. Поэтому актуальной задачей является разработка методических указаний и способов аналитического расчета для систематизации процесса проектирования. Такая задача требует обширных аналитических данных, включая оптимизацию составов бетонных смесей и подбор оптимальных решений для различных климатических зон. Полученный результат будет способствовать широкомасштабному внедрению аддитивных технологий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiao J., Ji G., Zhang Y., Ma G., Mechtcherine V, Pan J., Wang L., Ding T., Duan Z., Du S. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122. Pp. 104–115. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115
2. García-Alvarado R., Moroni-Orellana G., Banda-Pérez P. Architectural evaluation of 3D-printed buildings // *Buildings*. 2021. Vol. 11(6). Pp. 254. DOI: .10.3390/buildings11060254
3. Liu D., Zhang Z., Zhang X., Chen Z. 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 405. Pp. 133364. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133364
4. Takva Ç., Top S.M., Gökgöz B.İ., Gebel Ş., İlerisoy Z.Y., İlcan H., Şahmaran M. Applicability of 3D concrete printing technology in building construction with different architectural design decisions in housing // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 98. 111257. DOI: 10.1016/j.job.2024.111257
5. Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шерemet А.А. Разработка комплексного решения для 3D-печати стеновых конструкций // *Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова*. 2022. № 10. С. 8–19. DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19
6. Мухаметрахимов Р.Х., Рахимов Р.З., Бурьянов А.Ф., Зиганшина Л.В. Исследование прочности сцепления слоев в технологии 3D-печати бетоном // *Строительные материалы*. 2025. № 7. С. 32–37. DOI:10.31659/0585-430X-2025-837-7-32-37
7. Царенко А.А., Шапурова Н.А. Возможность использования строительной 3D-печати бетоном при возведении зданий и сооружений в России // *Экономика строительства*. 2024. № 4. С. 389–392.
8. Мухаметрахимов Р.Х. Научные и технологические основы управления структурой и свойствами бетонов, формуемых методом аддитивного строительного производства (3D-печати): дисс. ... д-ра технич. наук. 2024. 464 с.
9. Толстой А. Д. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Ковалева И.А. Порошковые бетоны с применением техногенного сырья // *Вестник МГСУ*. 2015. № 11. С. 101–109.
10. Василик П.Г., Бурьянов А.Ф. Гипсовые технологии XXI века – что же будет дальше? // В сборнике: «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий» VIII международная научно-практическая конференция. г. Майкоп. 2016. С. 30–36.
11. Пат. RU2838667C1, Российская Федерация, МПК E04B 1/16. Способ возведения строительной конструкции для малоэтажных зданий и строительная конструкция для малоэтажных зданий / К.Ю. Лосев; заявитель и патентообладатель Лосев Константин Юрьевич; заявл. 04.10.2024; опубл. 22.04.2025, Бюл. № 13. 23 с.
12. Столяров О.Н., Донцова А.Е., Козинец Г.Л. 3D-печать текстиль-бетонных конструкций // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5. № 4. С. 21–34. DOI:10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34

13. Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Дребезгова М.Ю. Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья: монография // Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 321 с.
14. Кротов О.М., Птухина И.С. Оценка эффективности применения 3D-печати для стеновых конструкций // Экономика строительства. 2023. № 5. С. 73–79.
15. Акулова И.И., Славчева Г.С., Макарова Т.В. Техничко-экономическая оценка эффективности применения 3D-печати в жилищном строительстве // Жилищное строительство. 2019. № 12. С. 52–56. DOI:10.31659/0044-4472-2019-12-52-56
16. Бидов Т.Х., Зиновкин А.С., Жолтиков А.Р., Макаев Н.В. Системный анализ повышения прочности конструкций, возводимых при помощи 3D-принтеров // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 2. С. 162–166 DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-162-163
17. В России печатают целые посёлки [Электронный ресурс] <https://specavia.pro/articls/v-rossii-pechatayut-czelye-posyolki/> (дата обращения 19.01.2026)
18. ВандерДом – напечатаны на 3D-принтере [Электронный ресурс] <https://www.yasnopole.ru/prozhivanie/vanderdom/> (дата обращения 19.01.2026)
19. Placzek G., Schwerdtner P. Concrete Additive Manufacturing in Construction: Integration Based on Component-Related Fabrication Strategies // Buildings. 2023. Vol. 13. 1769. DOI: 10.3390/buildings13071769
20. Курьшев Е. Н. Исследование строительства экспериментальных домов, в том числе по технологии 3D принтера: магистерская диссертация. Абакан: СФУ, 2022.
21. Liu H., Wang Y., Zhu C., Wu Y., Liu C., He C., Yao Y., Wang Y., Bai G. Design of 3D printed concrete masonry for wall structures: Mechanical behavior and strength calculation methods under various loads // Engineering Structures. 2025. Vol. 325. 119374. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119374
22. Aghajani D.M., Chen H., Sideris P. Analysis and design of 3D printed reinforced concrete walls under in-plane quasi-static loading // Engineering Structures. 2024. Vol. 303. 117535. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117535
23. Ter Haar B., Kruger J., van Zijl G. Off-site 3D printed concrete beam design and fabrication // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 89. 109117. DOI: 10.1016/j.job.2024.109117
24. Flor-Unda O., Toapanta C., Fuentes M., Rivera M. Additive manufacturing Technologies: Advances for the construction industry // Heliyon. 2025. Vol. 11. Vol. 12. Pe43568. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e43568
25. Zuo Z., Zhang Y., Li J., Huang Y., Zhang L. Systematic workflow for digital design and on-site 3D printing of large concrete structures: A case study of a full-size two-story building // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 104. 112370. DOI: 10.1016/j.job.2025.112370
26. Han X., Yan J., Liu M., Huo L., Li J. Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression // Automation in Construction. 2022. Vol. 133. 103993. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136574
27. Bayrak A.T., Shaban N., Choubi S.S., Tuncer E., Yang S.H., Yılmaz H.D., Alkilani A.Z., Dal H., Unluer C., Dino İ.G., Örtemiz E., Sarıtaş A., Akgül C.M. Spatial variation of physical, mechanical, and thermophysical properties of 3D printed concrete across a full-scale wall // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 431. 136574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136574
28. Khanverdi M., Das S. Performance of full-scale 3D-printed concrete walls: Effects of vertical reinforcements and window opening // Engineering Structures. 2025. Vol. 337. 120510. DOI: 10.1016/j.job.2025.112200
29. Jiramarootapong P., Prasittisopin L., Snguanyat C., Tanapornraweekit G., Tangtermsirikul S. Load Carrying Capacity and Failure Mode of 3D Printing Mortar Wall Panel Under Axial Compression Loading // Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Vol. 28. Pp. 646–657. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7\_65
30. van den Heever M., Bester F., Kruger J., van Zijl G. Numerical modelling strategies for reinforced 3D concrete printed elements // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 50. 102569. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102569
31. Sharma S., Tahlawi E.M., Delavar A., Sideris P. Structural design methodology for low-rise 3D printed concrete (3DPC) buildings subjected to non-seismic loading: Description, application and validation // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 105. 112200. DOI: 10.1016/j.job.2025.112200
32. Liu C., Liang Z., Liu H., Wu Y., Zhang Y., Bai G. Seismic performance of 3D printed reinforced concrete walls: Experimental study and numerical simulation // Engineering Structures. 2025. Vol. 333. Pp. 120176. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120176
33. Tanapornraweekit G., Jiramarootapong P., Paudel S., Tangtermsirikul S., Snguanyat C. Experimental and numerical investigation of 3D-printed mortar walls under uniform axial compression // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 360. 129552. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129552

34. Daungwilailuk T., Pheinsusom P., Pansuk W. Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 275. 122039. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122039

35. Wang L., Yang Y., Yao L., Ma G. Interfacial bonding properties of 3D printed permanent formwork with the post-casted concrete // Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 128. Pp. 104457. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104457

36. Wang H., Shi Y., Sun X., Lin X., Ye Y. Design, multi-scale structural analysis, and construction of modular prefabricated 3D-printed concrete residence // Automation in Construction. 2026. Vol. 182. 106705. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106705

37. Руднев И.В., Соболев М.М., Молчанов И.В. Особенности конструктивных решений стен с применением аддитивных технологий // Материалы Всероссийской научно-методической конференции Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры.

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет». 2018. Pp. 360–363.

38. Li Z., Xing W., Sun J., Feng X. Multiscale structural characteristics and Heat–Moisture properties of 3D printed building Walls: A review // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 365. Pp. 130102. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130102

39. Alkhalidi A., Hatuqay D. Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 30. Pp. 101286. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101286

40. Ravula R., Gatheeshgar P. On the thermal-energy performance of 3D printed concrete wall panels designed with varying insulation ratios // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 77. Pp. 107374. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107374

41. Suphunsang K., Prasittisopin L., Pethrung S., Pansuk W. Fire performance evaluation of 3D-Printed concrete walls: A combined full-scale and numerical modeling approach // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 104. Pp. 112296. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.112296

Информация об авторах:

**Агафонов Ярослав Евгеньевич**, аспирант высшей школы промышленного, гражданского и дорожного строительства, E-mail: agafonovj1996@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 литера Б.

**Чернышева Наталья Васильевна**, доктор технических наук, профессор высшей школы промышленного, гражданского и дорожного строительства, E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 литера Б. Профессор кафедры материаловедения, изделий и конструкций. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.01.2026 г.

© Агафонов Я.Е., Чернышева Н.В., 2026

<sup>1,\*</sup>Agafonov I.E., <sup>1,2</sup>Chernysheva N.V.

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

\*E-mail: agafonovj1996@yandex.ru

## ANALYSIS OF DESIGN METHODS FOR 3-D PRINTED WALL STRUCTURES

**Abstract.** This paper presents a comprehensive analysis of modern design and calculation methods for load-bearing structures manufactured using 3D concrete printing, as universal regulatory methodologies are currently lacking. It studies key design challenges related to pronounced material anisotropy, heterogeneity of properties along the element's height, and the bond between printed layers, as the specific construction conditions can create non-uniformity in compressive strength between the bottom and top of a wall of up to 108 %. Experimental data on the performance of beams under bending, walls under axial and seismic loads, the effectiveness of various reinforcement schemes, and modern approaches to numerical modeling that take into account the specifics of 3D printing are considered. Performance factors influencing wall design are also considered. It is established that when calculating printed structures, it is permissible to use revised formulas for masonry structures. However, accuracy is significantly reduced when reinforcement is introduced. Vertical reinforcement alone can increase the load-bearing capacity by up to 26 %. Examples of successfully applied finite element models, taking into account all structural features, are described. Their use allowed for a deviation in structural strength values of no more than 4 % compared to experimental ones.

**Keywords:** design, wall structures, structural analysis, 3D-printing, additive technologies.

## REFERENCES

1. Xiao J., Ji G., Zhang Y., Ma G., Mechtcherine V, Pan J., Wang L., Ding T., Duan Z., Du S. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122. Pp. 104–115. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115
2. García-Alvarado R., Moroni-Orellana G., Banda-Pérez P. Architectural evaluation of 3D-printed buildings. *Buildings*. 2021. Vol. 11 (6). 254. DOI:10.3390/buildings11060254
3. Liu D., Zhang Z., Zhang X., Chen Z. 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 405. 133364. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133364
4. Takva Ç., Top S.M., Gökgöz B. İ., Gebel Ş., İlerisoy Z.Y., İlcan H., Şahmaran M. Applicability of 3D concrete printing technology in building construction with different architectural design decisions in housing. *Journal of Building Engineering* 2024. Vol. 98. 111257. DOI: 10.1016/j.job.2024.111257
5. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Sheremet A.A. Development of a comprehensive solution for 3d printing of wall structures [Razrabotka kompleksnogo resheniya dlia 3D-pechati stenovykh konstruksij]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 10. Pp. 8–19. DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19 (rus)
6. Mukhametrakhimov R.Kh., Rakhimov R.Z., Buryanov A.F., Ziganshina L.V. Investigation of interlayer bond strength in concrete 3D printing technology [Issledovanie prochnosti stsepleniia sloev v tekhnologii 3D-pechati betonom]. *Construction materials*. 2025. No. 7. Pp. 32–37. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-837-7-32-37 (rus)
7. Tsarenko A.A., Shapurova N.A. Feasibility of using construction 3D printing with concrete in the construction of buildings and structures in Russia [Vozmozhnost ispolzovaniya stroitelnoj 3D-pechati betonom pri vozvedenii zdaniy i sooruzhenij v Rossii]. *Ekonomika stroitelstva*. 2024. No. 4. Pp. 389–392. (rus)
8. Mukhametrakhimov R.Kh. Scientific and Technological Foundations of Controlling the Structure and Properties of Concretes Formed by Additive Construction Production (3D Printing) [Nauchnye i tekhnologicheskie osnovy upravleniya struktur i svoystvami betonov, formuemykh metodom additivnogo stroitel'nogo proizvodstva (3D-pechati)]: Doctor of Engineering Sciences Thesis. 2024. 464 p. (rus)
9. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Kovaleva I.A. Powder concretes with technogenic materials [Poroshkovye betony s primeneniem tekhnogenno go syria]. *Scientific and technical journal. Moscow: Vestnik MGSU*. 2015. No. 11. Pp. 101–109. (rus)
10. Vasilik P.G. Buryanov A.F. Gypsum technologies of the 21st century – what will happen next? [Gipsovye tekhnologii KHKH1 veka – chto zhe budet dalshe?]. In the collection: “Increasing the efficiency of production and application of gypsum materials and products” VIII international scientific and practical conference. Maikop. 2016. pp. 30-36 (rus)
11. Losev K.Yu. Method for erecting a building structure for low-rise buildings and a building structure for low-rise buildings. Patent RU no. 2838667C1, 2025. (rus)
12. Stolyarov O.N., Dontsova A.E., Kozinets G.L. 3D-Printed Textile-Reinforced Concrete [3D-pechat tekstil-betonnykh konstruksij]. *Smart Composite in Construction*. No. 5(4). Pp. 21–34. DOI:10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34 (rus)
13. Chernysheva, N.V., Lesovik V.S., Drebezgova M.Yu. Waterproof gypsum composite materials using technogenic raw materials [Vodostojkie gipsovye kompozitsionnye materialy s primeneniem tekhnogenno go syr'ya]. Monograph. Belgorod, 2015. 321 p. (rus)
14. Krotov O.M., Ptukhina I.S. Evaluation of the efficiency of 3D printing for wall structures [Otsenka effektivnosti primeneniya 3d-pechati dlya stenovykh konstruksij]. *Ekonomika stroitelstva*. 2023. No. 5. Pp. 73–79. (rus)
15. Akulova I.I., Slavcheva G.S., Makarova T.V. Technical and Economic Estimate of Efficiency of Using 3D printing in Housing Construction [Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka effektivnosti primeneniia 3D-pechati v zhilishchnom stroitelstve]. *Zhilishchnoe stroitelstvo*. 2019. No. 12. Pp. 52–56. DOI:10.31659/0044-4472-2019-12-52-56 (rus)
16. Bidov T.Kh., Zinovkin A.S., Zholtikov A.R., Makaev N.V. System analysis of ways to increase the strength of building structures constructed using 3D printers [Sistemnyi analiz povysheniia prochnosti konstruksii, vozvodimyykh pri pomoshchi 3D-printerov]. *Izvestiya Tula State University. Engineering Sciences*. 2024. No. 2. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-162-163. (rus)
17. In Russia, entire villages are printed [electronic resource] <https://specavia.pro/articles/v-rossii-pechatayut-czelye-posyolki/> accessed 19.01.2026 (rus)
18. VanderDom – printed on a 3D printer [electronic resource] <https://www.yasnopole.ru/prozhivanie/vanderdom/> accessed 19.01.2026. (rus)
19. Placzek G., Schwerdtner P. Concrete Additive Manufacturing in Construction: Integration

Based on Component-Related Fabrication Strategies. *Buildings*. 2023. Vol. 13, Page 1769. 1769. DOI: 10.3390/buildings13071769

20. Kuryshev E.N. Research of experimental house construction, including using 3D printing technology [Исследование строительства экспериментальных домов, в том числе по технологии 3D принтера]: Master's thesis: Abakan: KhTI – branch of SFU, 2022. (rus)

21. Liu H., Wang Y., Zhu C., Wu Y., Liu C., He C., Yao Y., Wang Y., Bai G. Design of 3D printed concrete masonry for wall structures: Mechanical behavior and strength calculation methods under various loads. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 325. 119374. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119374

22. Delavar A.M., Chen H., Sideris P. Analysis and design of 3D printed reinforced concrete walls under in-plane quasi-static loading. *Engineering Structures* 2024. Vol. 303. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117535

23. Ter Haar B., Kruger J., van Zijl G. Off-site 3D printed concrete beam design and fabrication. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 89. P109117. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109117

24. Flor-Unda O., Toapanta C., Fuentes M., Rivera M. Additive manufacturing Technologies: Advances for the construction industry. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, No. 12. Pp. e43568. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e43568

25. Zuo Z., Zhang Y., Li J., Huang Y., Zhang L. Systematic workflow for digital design and on-site 3D printing of large concrete structures: A case study of a full-size two-story building. *Journal of Building Engineering*, 2025. Vol. 104. Pp. 112370. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112370

26. Han X., Yan J., Liu M., Huo L., Li J. Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 133. 103993. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136574

27. Bayrak A.T., Shaban N., Choubi S.S., Tuncer E., Yang S.H., Yılmaz H.D., Alkilani A.Z., Dal H., Unluer C., Dino İ.G., Örtemiz E., Sarıtaş A., Akgül C.M. Spatial variation of physical, mechanical, and thermophysical properties of 3D printed concrete across a full-scale wall. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 431. 136574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136574

28. Khanverdi M., Das S. Performance of full-scale 3D-printed concrete walls: Effects of vertical reinforcements and window opening. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 337. 120510. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112200

29. Jiramarootapong P., Prasittisopin L., Snguanyat C., Tanapornraweekit G., Tangtermsirikul S. Load Carrying Capacity and Failure Mode of

3D Printing Mortar Wall Panel Under Axial Compression Loading. 2020. Pp. 646–657. DOI:10.1007/978-3-030-49916-7\_65

30. van den Heever M., Bester F., Kruger J., van Zijl G. Numerical modelling strategies for reinforced 3D concrete printed elements. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 50. 102569. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102569

31. Sharma S., Tahlawi E.M., Delavar A., Sideris P. Structural design methodology for low-rise 3D printed concrete (3DPC) buildings subjected to non-seismic loading: Description, application and validation. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 105. Pp. 112200. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112200

32. Liu C., Liang Z., Liu H., Wu Y., Zhang Y., Bai G. Seismic performance of 3D printed reinforced concrete walls: Experimental study and numerical simulation. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 333. 120176. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120176

33. Tanapornraweekit G., Jiramarootapong P., Paudel S., Tangtermsirikul S., Snguanyat C. Experimental and numerical investigation of 3D-printed mortar walls under uniform axial compression. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 360. 129552. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129552

34. Daungwilailuk T., Pheinsusom P., Pansuk W. Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 275. 122039. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122039

35. Wang L., Yang Y., Yao L., Ma G. Interfacial bonding properties of 3D printed permanent formwork with the post-casted concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 128. Pp. 104457. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104457

36. Wang H., Shi Y., Sun X., Lin X., Ye Y. Design, multi-scale structural analysis, and construction of modular prefabricated 3D-printed concrete residence. *Automation in Construction*. 2026. Vol. 182. Pp. 106705. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106705

37. Rudnev I.V., Sobolev M.M., Molchanov I.V. Features of wall design solutions using additive technologies. The university complex as a regional center of education, science, and culture [Osobnosti konstruktivnykh reshenij sten s primeneniem additivnykh tekhnologij]. *Universitetskij kompleks kak regional'nyj tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury. materialy Vserossijskoj nauchno-metodicheskoy konferentsii. FGBOU VO «Orenburgskij gosudarstvennyj universitet»*, 2018. Pp. 360–363. (rus)

38. Li Z., Xing W., Sun J., Feng X. Multiscale structural characteristics and Heat–Moisture proper-

ties of 3D printed building Walls: A review. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 365. Pp. 130102. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130102

39. Alkhalidi A., Hatuqay D. Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study. Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 30. 101286. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101286

40. Ravula R., Gatheeshgar P. On the thermal-energy performance of 3D printed concrete wall panels designed with varying insulation ratios. Journal

of Building Engineering. 2023. Vol. 77. 107374. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107374

41. Suphunsang K., Prasittisopin L., Pethrung S., Pansuk W. Fire performance evaluation of 3D-Printed concrete walls: A combined full-scale and numerical modeling approach. Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 104. 112296. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112296

*Information about the authors*

**Agafonov, Yaroslav E.** Postgraduate student. E-mail: agafonovj1996@yandex.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnikeskaya St., 29/B.

**Chernysheva, Natalya V.** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction E-mail: chernysheva56@rambler.ru VO Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251 St. Petersburg, internal. territory of the city, Akademicheskoe municipal district, Politekhnikeskaya St., 29, building B. Professor of the Department of Materials Science, Products, and Structures. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russia.

---

*Received 20.01.2026*

**Для цитирования:**

Агафонов Я.Е., Чернышева Н.В. Анализ методов проектирования стеновых конструкций, возводимых способом 3D-печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 3. С. 00–00. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-70-85

**For citation:**

Agafonov I.E., Chernysheva N.V. Analysis of design methods for 3-D printed wall structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 3. Pp. 70–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-70-85