Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ С НЕСУЩИМ КАРКАСОМ ИЗ ПУЛТРУЗИОННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ПРОФИЛЕЙ И 3D-ПЕЧАТНЫМИ СТЕНАМИ С ПОЛИСТИРОЛБЕТОННЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Акбаров Дильшод Баходирович
автор исследования;
Акрамов Хуснитдин Ахрарович
научный руководитель
Расчетно-теоретическое исследование и программа верификации
https://doi.org/10.5281/zenodo.21770086

Статус рукописи. Статья подготовлена как научно обоснованный расчетно-теоретический проект. Числовой пример служит для проверки реализуемости концепции и не является рабочей документацией. Перед публикацией и проектным применением следует заменить демонстрационные исходные данные характеристиками конкретных профилей, материалов, узлов, площадки строительства и результатами испытаний.

Аннотация

Рассмотрена конструктивно-технологическая система малоэтажного здания, в которой функции несущего остова и ограждения принципиально разделены: вертикальные и горизонтальные воздействия воспринимает пространственный каркас из пултрузионных стеклопластиковых профилей, а наружные и внутренние ненесущие стены выполняются методом экструзионной 3D-печати в виде тонкостенной минеральной оболочки с последующим заполнением полости теплоизоляционным полистиролбетоном. Цель исследования — сформировать проверяемую архитектуру системы, определить критические расчетные и технологические ограничения и выполнить предварительную количественную оценку ее работоспособности. Методика включает функциональную декомпозицию, параметрическое описание демонстрационного двухэтажного объекта размером 10,8 × 7,2 м, проверочные расчеты элементов каркаса по упругой модели, теплотехнический расчет многослойной стены, оценку поверхностной массы, анализ совместности деформаций и матрицу рисков. Для иллюстративной колонны замкнутого сечения 200 × 200 × 12 мм при продольном модуле 25 ГПа и расчетной осевой силе 170 кН получены среднее напряжение 18,8 МПа и критическая сила глобальной потери устойчивости 1,46 МН; отношение N/Ncr составляет 0,116. Для балки 300 × 150 × 12 мм пролетом 3,6 м при равномерной нагрузке 12,6 кН/м расчетный прогиб равен 9,4 мм, или приблизительно L/381. Для стены общей толщиной 250 мм, включающей две печатные оболочки по 30 мм и слой полистиролбетона 190 мм с расчетной теплопроводностью 0,10 Вт/(м·К), получены сопротивление теплопередаче 2,15 м²·К/Вт, коэффициент теплопередачи 0,466 Вт/(м²·К) и поверхностная масса около 180,5 кг/м² без отделки. Показано, что жизнеспособность системы определяется не только прочностью профилей, но прежде всего локальной устойчивостью тонкостенных элементов, работой болтовых соединений, длительной ползучестью, огнестойкостью, межслойной прочностью печатной оболочки и способностью узлов стены допускать межэтажные перемещения каркаса. Научная новизна состоит в системной увязке независимого композитного каркаса, печатной оболочки-несъемной формы, легкого заполнителя и деформационно-развязанных креплений. Предложены последовательность возведения, контрольные точки качества и программа экспериментальной верификации.

Ключевые слова: аддитивное строительство; 3D-печать бетоном; пултрузионный стеклопластик; GFRP; композитный каркас; полистиролбетон; ненесущая стена; деформационная совместность; малоэтажное строительство; сейсмостойкость.

1. Введение

Аддитивное строительство переводит изготовление ограждающих и формообразующих элементов из дискретной кладки и опалубочных операций в управляемый цифровой процесс послойного нанесения материала. Международная терминология процессов закреплена в ISO/ASTM 52900, а специальные принципы квалификации аддитивно изготовленных строительных элементов — в ISO/ASTM 52939 [1, 2]. Состояние исследований показывает, что экструзионная печать позволяет уменьшать объем индивидуальной опалубки, реализовывать сложную геометрию и объединять в цифровом контуре проектирование, производство и контроль [3–7]. Одновременно печатный материал нельзя автоматически считать эквивалентом монолитного бетона: на свойства влияют реология, временной интервал между слоями, ориентация отбора образцов, геометрия нити, условия твердения и качество межслойного контакта [8–14].

Пултрузионные стеклопластиковые профили обладают низкой плотностью, коррозионной стойкостью и высокой удельной прочностью, что делает их привлекательными для индустриальных малоэтажных систем. Однако их продольный модуль упругости заметно ниже, чем у стали, тонкостенные сечения чувствительны к локальной и дисторсионной потере устойчивости, а несущая способность рам часто определяется не материалом стержня, а деформативностью и разрушением соединений [16–22]. Появление ASCE/SEI 74-23 и CEN/TS 19101:2022 свидетельствует о переходе пултрузионных конструкций от разрозненных рекомендаций к системному расчетному регулированию, но применение этих документов в конкретной юрисдикции требует увязки с национальными нормами и сертификацией продукции [16, 17].

Полистиролбетон способен выполнять функцию легкого теплоизоляционного заполнителя. Его плотность, прочность и теплопроводность управляются объемной долей гранул вспененного полистирола, свойствами цементной матрицы, сцеплением на границе раздела и применением волокон или минеральных добавок [23–27]. Для предлагаемой системы он рассматривается не как основной несущий материал, а как заполнитель полости между печатными оболочками, уменьшающий массу стены и формирующий требуемое сопротивление теплопередаче.

Ключевая научно-практическая проблема возникает на стыке трех технологий. Если 3D-печатную стену жестко включить в работу каркаса без достаточной базы испытаний, неопределенность межслойной прочности, усадки и узлового контакта переносится на безопасность здания. Если, наоборот, полностью исключить связь, ограждение не получает надежного закрепления от ветрового и сейсмического действия из плоскости. Поэтому необходима архитектура, в которой пути передачи нагрузок заранее разделены, а связи обеспечивают требуемую устойчивость стены, не превращая ее в неконтролируемую диагональ жесткости.



Рисунок 1 — Логика расчетно-теоретического исследования и последующей экспериментальной проверки

2. Состояние вопроса и исследовательский разрыв

2.1. 3D-печать цементных композиций

Современная литература описывает технологию через взаимосвязанные показатели «пригодность к перекачиванию — экструдируемость — сохраняемость формы — открытое время — межслойное сцепление». Дорожная карта Buswell и соавторов [4], обзор Mechtcherine и соавторов [5] и классификационная рамка производственных процессов [7] показывают, что геометрическая точность и механические свойства формируются не только рецептурой, но и всей цепочкой: смешивание, транспортирование, экструзия, траектория, выдержка и постобработка. Исследования Le и соавторов [8, 9], Wolfs и соавторов [10, 11] подтверждают необходимость раздельной оценки свойств вдоль и поперек слоев. Межлабораторное исследование RILEM 2025 г. дополнительно акцентирует проблему сопоставимости методик испытаний и репрезентативности образцов [14].

Для здания это означает, что расчетные характеристики нельзя переносить с литых кубов или цилиндров на печатную оболочку без коэффициентов и испытаний, отражающих фактическую ориентацию слоев, наличие швов и технологические паузы. В предлагаемой системе данный риск снижается функционально: печатная минеральная оболочка формирует ограждение, геометрию и защиту заполнителя, но не назначается основным элементом глобальной несущей системы.

2.2. Пултрузионные профили и рамные соединения

Для пултрузионных профилей характерна выраженная ортотропия: наибольшая жесткость обеспечивается непрерывными волокнами вдоль оси профиля, тогда как поперечные и сдвиговые свойства существенно ниже. Это влияет на изгиб, поперечный сдвиг, смятие под болтами и устойчивость стенок. Обзор Mottram и Turvey [20] и исследования болтовых соединений [21, 22] показывают, что проектирование должно учитывать тип разрушения, расстояния от отверстий до кромок, шайбы, момент затяжки, групповую работу болтов и ползучесть. Простая замена стального профиля геометрически похожим стеклопластиковым без пересчета деформаций и соединений методически неверна.

В разрабатываемой системе каркас рассматривается как пространственный комплект: колонны, балки, связи, диски перекрытий, базовые узлы и фундаменты. Для восприятия горизонтальных воздействий предусматриваются специально назначенные связевые ячейки или

иная расчетно подтвержденная система, а печатные стены не используются как случайные распорки. Такой подход упрощает идентификацию расчетной схемы и позволяет независимо заменять ограждающий модуль.

2.3. Полистиролбетон как функциональный заполнитель

Исследования легких бетонов с гранулами вспененного полистирола демонстрируют закономерный компромисс: снижение плотности и теплопроводности сопровождается снижением прочности и модуля упругости [23–27]. Поэтому рациональная область применения в рассматриваемой системе — теплоизоляционный, заполняющий и стабилизирующий слой, а не передача основных этажных усилий. Плотность и теплопроводность должны подтверждаться для конкретной смеси в сухом и эксплуатационно-влажном состоянии. Необходимы также проверка равномерности заполнения узкой полости, отсутствие расслоения и контроль давления свежей смеси на еще не набравшую прочность печатную оболочку.

2.4. Исследовательский разрыв

В большинстве работ технологии рассматриваются раздельно: печатный цементный материал — как самостоятельный конструкционный или ограждающий продукт, пултрузионный профиль — как элемент рам и настилов, а полистиролбетон — как легкий бетон. Недостаточно разработан уровень системной интеграции: разделение путей передачи нагрузок, монтажные допуски, совместность температурных и сейсмических перемещений, очередность печати вокруг готового каркаса, ремонтопригодность инженерных сетей и сквозная программа контроля качества. Настоящая работа направлена именно на этот уровень.

Таблица 1 — Исследовательские ограничения и принятые системные решения

Проблема	Риск для здания	Принятое решение
Анизотропия и вариабельность печатного материала	Неопределенность несущей способности стены	Печатная стена назначается ненесущей; глобальные нагрузки воспринимает независимый каркас
Низкий модуль и локальная устойчивость GFRP	Повышенные прогибы и чувствительность тонкостенных профилей	Расчет по деформациям и устойчивости; связевая система; испытание узлов
Хрупкие/деформативные соединения	Концентрации смятия и разрушение у отверстий	Стальные или композитные фасонки, крупные шайбы, контролируемая затяжка, проверка групп болтов
Усадка и температурные перемещения стены	Трещины и непредусмотренное включение стены в работу рамы	Зазоры и скользящие анкеры; опирание собственного веса на каждом этаже
Давление свежего заполнителя	Потеря геометрии печатной оболочки	Поэтапное заполнение после достижения контрольной прочности оболочки
Сейсмическое воздействие	Повреждение тяжелого ограждения и выпадение из плоскости	Снижение массы стены; анкеровка из плоскости; расчет относительных этажных перемещений

3. Цель, задачи и элементы научной новизны

Цель исследования — разработать расчетно проверяемую конструктивно-технологическую систему малоэтажного здания, объединяющую несущий каркас из пултрузионных стеклопластиковых профилей и ненесущие 3D-печатные стены с полистиролбетонным заполнением, и определить условия, при которых совместная работа подсистем остается прогнозируемой.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- сформировать функциональную схему здания и однозначные пути передачи вертикальных, горизонтальных и локальных нагрузок;
- задать параметрическую модель демонстрационного объекта и выполнить предварительные проверки колонны и балки по упругой модели;
- оценить теплотехнические показатели и поверхностную массу многослойной стены;
- сформулировать требования к деформационно-развязному узлу крепления стены к каркасу;
- разработать последовательность строительства, контрольные операции и матрицу критических рисков;
- определить программу экспериментальной и численной верификации перед проектным применением.

Элементы научной новизны заключаются: 1) в функциональном разделении несущей и ограждающей подсистем при сохранении контролируемой связи из плоскости; 2) в использовании 3D-печатной оболочки одновременно как архитектурного слоя, постоянной формы и защиты легкого заполнителя; 3) в формализации деформационной совместности через требуемый монтажный зазор и податливость анкеров; 4) в объединении структурного, теплотехнического и технологического критериев в единую проверочную матрицу.

4. Материалы и методы

4.1. Общая методика

Исследование выполнено в шесть этапов: анализ нормативной и научной базы; функциональная декомпозиция; формирование параметрической модели; проверочные расчеты; анализ конструктивно-технологических рисков; разработка программы верификации (рисунок 1). Расчеты имеют уровень предварительного обоснования концепции. Они позволяют выявить управляющие параметры и сравнить варианты, но не заменяют полный расчет по предельным состояниям, расчет соединений, огнестойкости и сейсмический анализ конкретного объекта.

4.2. Демонстрационный объект и границы модели

В качестве расчетного примера принят двухэтажный дом прямоугольного плана с регулярной сеткой колонн. Регулярность выбрана намеренно: она облегчает типизацию профилей, узлов, траекторий печати и инженерных модулей. Горизонтальная жесткость обеспечивается вертикальными связями в выделенных ячейках и дисками перекрытий; ненесущие стены не включаются в глобальную расчетную схему. Значения нагрузок и характеристик материалов в таблицах 2–3 являются демонстрационными и должны заменяться данными проекта.

Таблица 2 — Геометрические параметры демонстрационного здания

Параметр	Принятое значение	Назначение в модели
Размеры в плане	10,8 × 7,2 м	Три пролета по 3,6 м вдоль и два пролета поперек
Количество этажей	2	Общая высота каркаса 6,0 м

Параметр	Принятое значение	Назначение в модели
Высота этажа	3,0 м	Длина расчетного участка колонны
Шаг колонн	3,6 × 3,6 м	Унификация балок и модулей стены
Схема горизонтальной жесткости	Связевые ячейки + диски перекрытий	Печатные стены не участвуют в глобальном сопротивлении
Общая толщина стены	250 мм	30 мм оболочка + 190 мм заполнение + 30 мм оболочка
Опирание стены	Поэтажное	Ограничение накопления собственного веса и усадочных деформаций

Таблица 3 — Демонстрационные свойства и статус исходных данных

Подсистема/параметр	Значение	Статус и требуемое подтверждение
Продольный модуль GFRP, EL	25 ГПа	Иллюстративно; заменить паспортными значениями и расчетными коэффициентами
Плотность GFRP	1900 кг/м³	Типовой порядок; подтвердить сертификатом партии
Колонна	Замкнутый профиль 200 × 200 × 12 мм	Геометрический пример; проверить локальную устойчивость и узлы
Балка	Замкнутый профиль 300 × 150 × 12 мм	Геометрический пример; проверить сдвиг, длительный прогиб и соединения
Печатная оболочка	ρ = 1900 кг/м³; λ = 0,80 Вт/(м·К)	Для теплотехнической оценки; прочность определяется испытанием печатных образцов
Полистиролбетон	ρ = 350 кг/м³; λ = 0,10 Вт/(м·К)	Для сухого расчетного состояния; проверить влажность, прочность и однородность
Равномерная нагрузка на балку	12,6 кН/м	3,5 кПа на грузовую полосу 3,6 м; не является нормативным сочетанием
Осевая сила в колонне	170 кН	Скрининговое значение; заменить результатом глобального расчета

4.3. Расчетные зависимости

Для первичной проверки глобальной потери устойчивости центрально-сжатого элемента использована формула Эйлера. Она применима только как верхнеуровневая оценка и не

учитывает локальную потерю устойчивости стенок, несовершенства, ортотропию, ползучесть, снижение свойств при температуре и особенности закрепления:

$$Ncr = \pi^2 \cdot EL \cdot I / (K \cdot L)^2 \quad (1)$$

где EL — продольный модуль упругости; I — минимальный момент инерции; L — расчетная длина; K — коэффициент расчетной длины. Среднее нормальное напряжение определялось как

$$\sigma = N / A \quad (2)$$

Для однопролетной шарнирно опертой балки при равномерно распределенной нагрузке использованы выражения

$$Mmax = qL^2 / 8 \quad (3)$$

$$\delta max = 5qL^4 / (384 \cdot EL \cdot I) \quad (4)$$

Теплотехническая оценка выполнена по послойной схеме, согласующейся с принципами ISO 6946 [28]:

$$R = Rsi + \Sigma(di / \lambda i) + Rse \quad (5)$$

$$U = 1 / R \quad (6)$$

Поверхностная масса ограждения определялась суммированием произведений плотности и толщины слоев:

$$mA = \Sigma(\rho i \cdot di) \quad (7)$$

Минимальный конструктивный запас перемещения в узле стены формализован соотношением

$$greq \geq \Delta frame + \Delta temp + \Delta shr + \Delta tol - \delta conn \quad (8)$$

где Δframe — расчетное относительное перемещение каркаса в зоне стены; Δtemp — температурная составляющая; Δshr — усадка и влажностная деформация ограждения; Δtol — монтажный допуск; δconn — допускаемое перемещение скользящего соединения. Для сейсмической проверки контролируется относительный этажный перекос

$$\theta = \Delta story / hstory \quad (9)$$

5. Предлагаемая конструктивно-технологическая система

5.1. Несущий каркас и пути передачи нагрузок

Основной несущий остов включает пултрузионные колонны, балки, вертикальные связи, элементы дисков перекрытий, опорные башмаки и узловые детали. Постоянные и временные нагрузки от перекрытий и кровли передаются через балки на колонны и далее через базовые узлы в фундамент. Горизонтальные нагрузки от ветра и землетрясения собираются дисками перекрытий и направляются в специально назначенные связевые ячейки. Ненесущая стена воспринимает собственный вес и локальное давление из плоскости, но не должна случайно принимать этажные сдвигающие усилия.

Принципиальная схема: независимый композитный каркас и ненесущие печатные стены

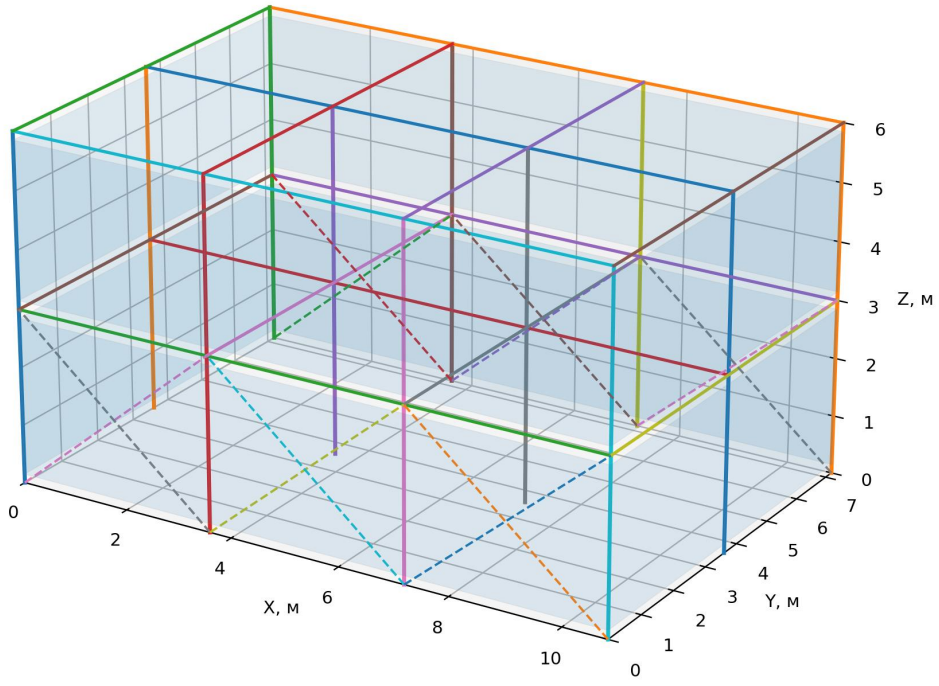

Рисунок 2 — Принципиальная пространственная схема независимого композитного каркаса и ненесущих печатных стен

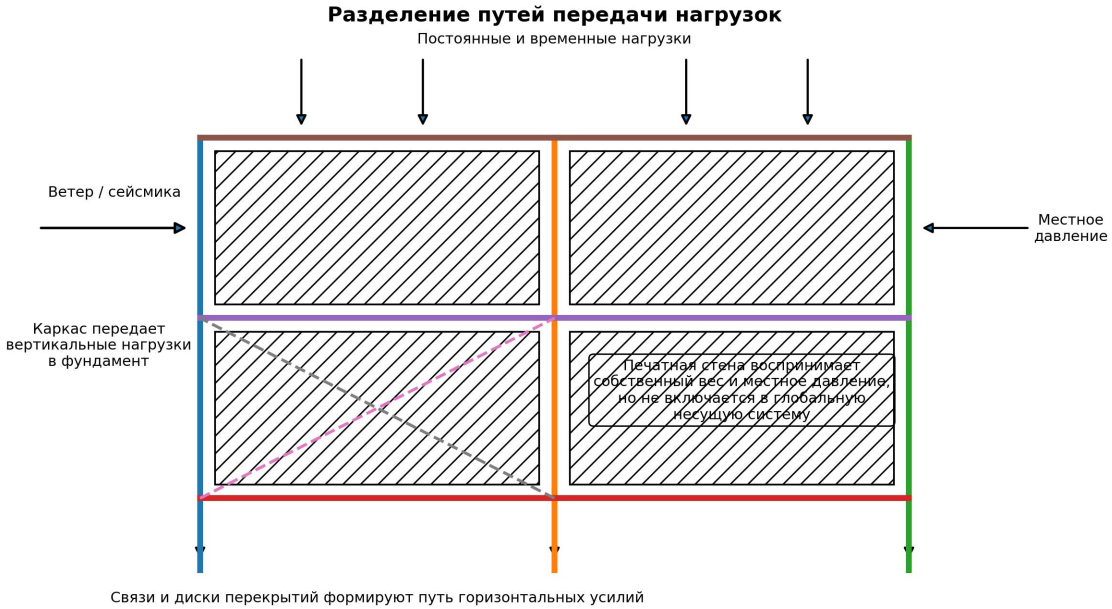

Рисунок 3 — Разделение путей передачи вертикальных, горизонтальных и локальных нагрузок

Таблица 4 — Функции основных компонентов системы

Компонент	Основная функция	Не допускается без отдельного обоснования
Колонны и балки GFRP	Передача вертикальных нагрузок, формирование рам	Замена профиля по геометрическому сходству без проверки жесткости
Связи/жесткие ядра	Восприятие горизонтальных воздействий	Расчет с учетом случайной работы ненесущих стен
Диски перекрытий	Сбор и распределение горизонтальных сил	Принятие абсолютно жесткого диска без проверки соединений
3D-печатная оболочка	Ограждение, геометрия, защита и постоянная форма	Назначение несущей стеной без испытаний и расчетной модели
Полистиролбетон	Теплоизоляционное заполнение, частичная стабилизация оболочки	Передача основных этажных усилий
Анкеры стены	Закрепление из плоскости, контроль положения	Жесткое блокирование межэтажного перемещения каркаса
Поэтажная опора стены	Передача собственного веса стены	Подвешивание нескольких этажей на одной печатной оболочке

5.2. Ограждающая стена

Базовый модуль наружной стены состоит из наружной и внутренней печатных оболочек толщиной по 30 мм и полости толщиной 190 мм. Оболочки соединяются печатными поперечными ребрами или отдельными диэлектрическими связями, число и шаг которых

назначаются с учетом давления свежего заполнителя, местного ветрового давления, монтажа окон и требований к теплотехнической однородности. После достижения оболочкой контрольной прочности полость заполняется полистиролбетоном по захваткам. Слишком раннее заполнение может вызвать выпучивание или раскрытие швов; слишком позднее — ухудшить сцепление и увеличить длительность цикла.



Рисунок 4 — Предлагаемое сечение трехслойной ненесущей 3D-печатной стены

Оконные и дверные проемы требуют локальных рамок или перемычек, передающих нагрузки непосредственно на каркас либо на специально рассчитанные элементы. Крепление фасадных изделий, навесного оборудования и инженерных трасс не следует выполнять только в тонкой печатной оболочке без закладных деталей. В зонах возможного увлажнения предусматриваются капиллярная отсечка, водоотвод, парорегулирование и ремонтопригодные герметики.

5.3. Узел крепления стены к каркасу

Нижняя кромка стены каждого этажа опирается на непрерывный цокольный/межэтажный профиль через выравнивающую и гидроизоляционную прокладку. Верхняя и боковые кромки закрепляются анкерами, способными передавать давление и отсос из плоскости, но допускающими расчетное перемещение вдоль продольного паза. Эластичная прокладка ограничивает ударный контакт, снижает концентрации напряжений и компенсирует малые неровности. Металлические детали должны быть защищены от коррозии и гальванического контакта; при применении нержавеющей или оцинкованной стали учитываются условия среды и совместимость с матрицей композита.

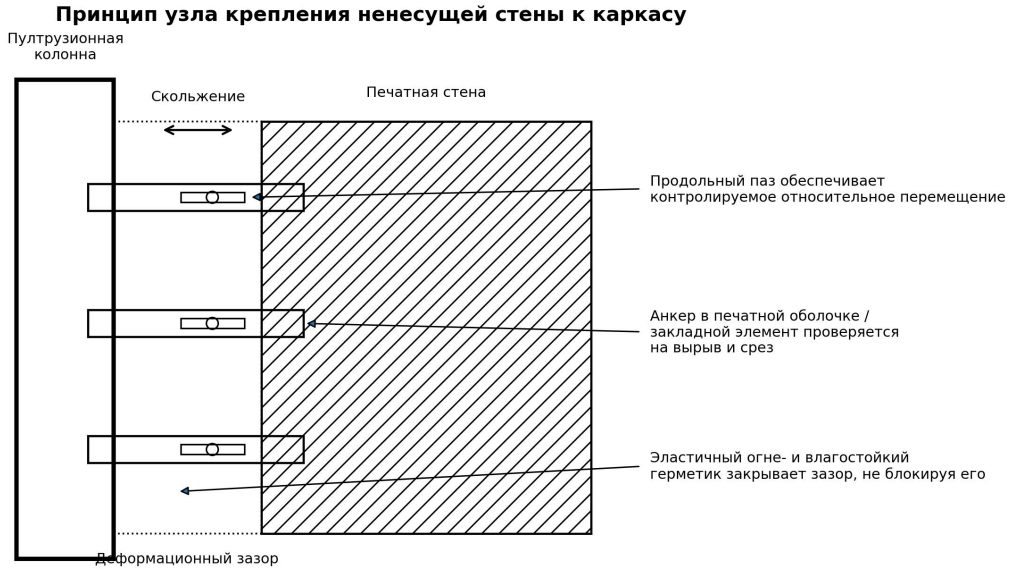

Рисунок 5 — Принцип узла деформационно-развязного крепления ненесущей стены к колонне

Размер паза и монтажного зазора нельзя назначать единым «типовым» числом для всех зданий. Он определяется из расчетного перекоса этажа, температурных перемещений, усадки, геометрических допусков и фактической податливости анкера по выражению (8). При сейсмическом проектировании обычно определяющей становится комбинация относительного этажного перемещения и циклической работоспособности анкера. Ограничители должны исключать выход болта из паза и потерю закрепления стены из плоскости.

6. Предварительная расчетная оценка каркаса

6.1. Колонна

Для иллюстративного замкнутого квадратного профиля 200 × 200 × 12 мм площадь сечения составляет 9024 мм², момент инерции относительно обеих главных осей — $53{,}37 \cdot 10^6$ мм⁴. При длине 3,0 м, шарнирной расчетной схеме (K = 1,0) и EL = 25 ГПа по (1) получено Ncr = 1,463 МН. При осевой силе 170 кН среднее напряжение по (2) составляет 18,84 МПа, а отношение N/Ncr = 0,116.

Таблица 5 — Скрининговая проверка иллюстративной колонны

Показатель	Значение	Интерпретация
Площадь A	9024 мм²	Геометрия без учета отверстий и вырезов
Момент инерции I	$53{,}37 \cdot 10^6$ мм⁴	Для замкнутого квадратного сечения
Осевая сила N	170 кН	Демонстрационный результат глобальной модели
Среднее напряжение σ	18,84 МПа	Не является полной проверкой прочности
Критическая сила Ncr	1463 кН	Только глобальная эйлерова устойчивость
Отношение N/Ncr	0,116	Глобальная форма не управляет примером

Показатель	Значение	Интерпретация
		при принятых допущениях
Неучтенные эффекты	—	Локальная устойчивость, эксцентриситет, ползучесть, огонь, узлы, коэффициенты надежности

Примечание. Полученный запас нельзя трактовать как разрешенную несущую способность профиля: для GFRP локальная потеря устойчивости стенок и узловые эффекты могут наступить значительно раньше глобальной формы.

Расчет показывает лишь отсутствие очевидной проблемы глобальной гибкости для выбранной геометрии. Проектная проверка должна включать взаимодействие продольной силы и изгиба, местную и дисторсионную устойчивость, поперечные свойства ламината, отверстия, начальные несовершенства, длительное действие нагрузки и коэффициенты среды. Дополнительно требуется испытание базового узла, поскольку передача силы через стальной башмак и болты может определять допустимую нагрузку.

6.2. Балка

Для иллюстративной балки замкнутого прямоугольного сечения 300 × 150 × 12 мм площадь составляет 10 224 мм², момент инерции относительно сильной оси — $116{,}74 \cdot 10^6$ мм⁴. Равномерная линейная нагрузка 12,6 кН/м получена умножением условной площади нагрузки 3,5 кПа на грузовую полосу 3,6 м. По формулам (3)–(4) M_{max} = 20,41 кН·м, максимальное упругое напряжение — 26,23 МПа, прогиб — 9,44 мм, что соответствует приблизительно L/381.

Таблица 6 — Скрининговая проверка иллюстративной балки

Показатель	Значение	Комментарий
Пролет L	3,6 м	Шарнирная однопролетная схема
Линейная нагрузка q	12,6 кН/м	Не является окончательным расчетным сочетанием
Максимальный момент M_{max}	20,41 кН·м	По упругой балочной модели
Упругое напряжение σ_{max}	26,23 МПа	Без концентраций в узлах и локальной потери устойчивости
Прогиб δ_{max}	9,44 мм	Мгновенный прогиб при EL = 25 ГПа
Отношение L/δ	≈ 381	Ориентир эксплуатационной жесткости, не нормативный вывод
Неучтенные эффекты	—	Поперечный сдвиг, длительный прогиб, вибрации, отверстия, узлы

Для тонкостенного композитного профиля балочная формула может недооценивать прогиб из-за поперечного сдвига. Кроме того, длительный прогиб при квазипостоянной нагрузке может заметно превышать мгновенное значение. Поэтому на следующем этапе требуется ортотропная конечно-элементная модель и сопоставление с испытаниями полноразмерной балки, включая реальный узел опирания и совместную работу с настилом перекрытия.

6.3. Пространственная жесткость и сейсмическая постановка

В демонстрационной схеме горизонтальные силы воспринимаются диагональными связями. При фактическом проектировании должны быть определены расчетная сейсмичность площадки, грунтовые условия, спектральные параметры и акселерограммы в соответствии с действующими нормами Республики Узбекистан, включая КМК 2.01.03-19 и актуальные решения по формированию региональных акселерограмм [29, 32]. Стандарты ASCE/SEI 74-23 и CEN/TS 19101 могут использоваться как методическая база для композитных элементов, но не заменяют национальные требования [16, 17].

Малая масса каркаса и ограждений потенциально уменьшает инерционные силы, однако низкая жесткость GFRP может увеличивать перемещения. Поэтому сейсмическое преимущество нельзя доказывать только снижением массы. Необходимы модальный спектральный или нелинейный динамический анализ, расчет P–Δ-эффекта, проверка циклической работы связей и анкеров стены, а также исключение удара ограждения о колонны при знакопеременном перекосе.

7. Теплотехническая и массовая эффективность стены

7.1. Базовый расчет

Для базового сечения приняты две минеральные оболочки по 30 мм с $\lambda = 0{,}80$ Вт/(м·К) и полистиролбетонная полость 190 мм с $\lambda = 0{,}10$ Вт/(м·К). При поверхностных сопротивлениях $R_{si} = 0{,}13$ и $R_{se} = 0{,}04$ м²·К/Вт по (5)–(6) получены $R = 2{,}145$ м²·К/Вт и $U = 0{,}466$ Вт/(м²·К). Это расчет для однородной зоны без ребер, анкеров, оконных откосов, цоколей и влагонакопления. Соответствие нормативам должно проверяться для конкретного климатического района по действующей редакции КМК 2.01.04-2018 и климатическим данным [30, 31].

Таблица 7 — Послойный теплотехнический расчет базовой стены

Слой	Толщина, м	λ, Вт/(м·К)	R, м²·К/Вт	Масса, кг/м²
Наружная печатная оболочка	0,030	0,80	0,0375	57,0
Полистиролбетон	0,190	0,10	1,9000	66,5
Внутренняя печатная оболочка	0,030	0,80	0,0375	57,0
Внутренняя и наружная поверхности	—	—	0,1700	—
Итого	0,250	—	2,145	180,5

Примечание. Теплопроводность и плотность приняты для демонстрации; расчетные значения в эксплуатационно-влажном состоянии должны подтверждаться лабораторно.

7.2. Параметрическая чувствительность

Сопротивление стены наиболее чувствительно к теплопроводности и толщине заполнителя. Таблица 8 и рисунок 6 показывают диапазон U при изменении λ полистиролбетона от 0,08 до 0,14 Вт/(м·К) и толщины заполнения от 120 до 240 мм. При базовой толщине 190 мм увеличение λ с 0,08 до 0,14 Вт/(м·К) повышает U примерно с 0,382 до 0,624 Вт/(м²·К), то есть ухудшает показатель приблизительно на 63 %. Это подчеркивает необходимость контроля плотности, влажности и рецептуры заполнителя.

Таблица 8 — Коэффициент теплопередачи U, Вт/(м²·К), при изменении параметров заполнителя

Толщина заполнителя, мм	λ = 0,08	λ = 0,10	λ = 0,12	λ = 0,14
120	0.573	0.692	0.803	0.907
150	0.472	0.573	0.669	0.760
190	0.382	0.466	0.547	0.624
220	0.334	0.409	0.481	0.551
240	0.308	0.378	0.445	0.510

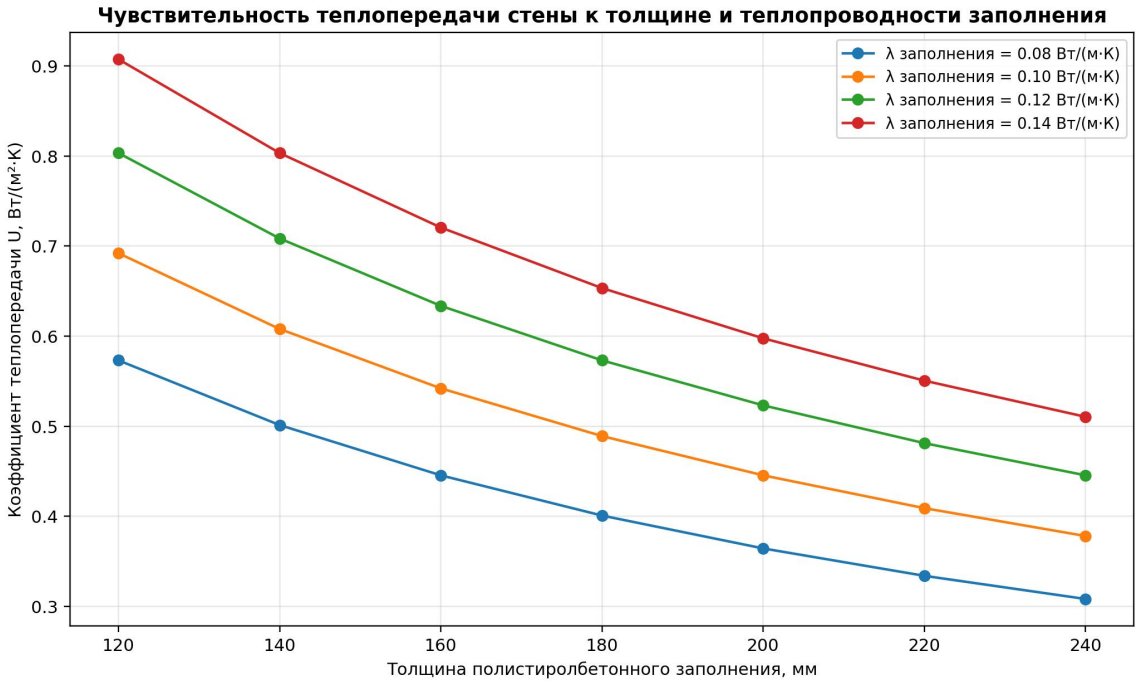

Рисунок 6 — Чувствительность коэффициента теплопередачи стены к толщине и теплопроводности заполнителя

7.3. Поверхностная масса

По выражению (7) поверхностная масса базовой стены без отделки составляет 180,5 кг/м². Для сопоставления условная кладка толщиной 250 мм при плотности 1600 кг/м³ имеет массу около 400 кг/м², а тяжелый бетон той же толщины при плотности 2400 кг/м³ — около 600 кг/м². Следовательно, рассматриваемая стена легче кладки примерно на 55 %, а тяжелого бетона — примерно на 70 %. Это сравнение не включает отделку, крепления, армирование, окна и локальные усиления, но показывает масштаб потенциального снижения постоянной и сейсмической массы.

Таблица 9 — Сравнение расчетной поверхностной массы ограждений без отделки

Вариант	Состав/допущение	Масса, кг/м²	Относительно гибридной стены
Гибридная 3D-	30 + 190 + 30 мм	180,5	1,00

Вариант	Состав/допущение	Масса, кг/м²	Относительно гибридной стены
печатная стена			
Кладка	250 мм, ρ = 1600 кг/м³	400	2,22
Тяжелый бетон	250 мм, ρ = 2400 кг/м³	600	3,32

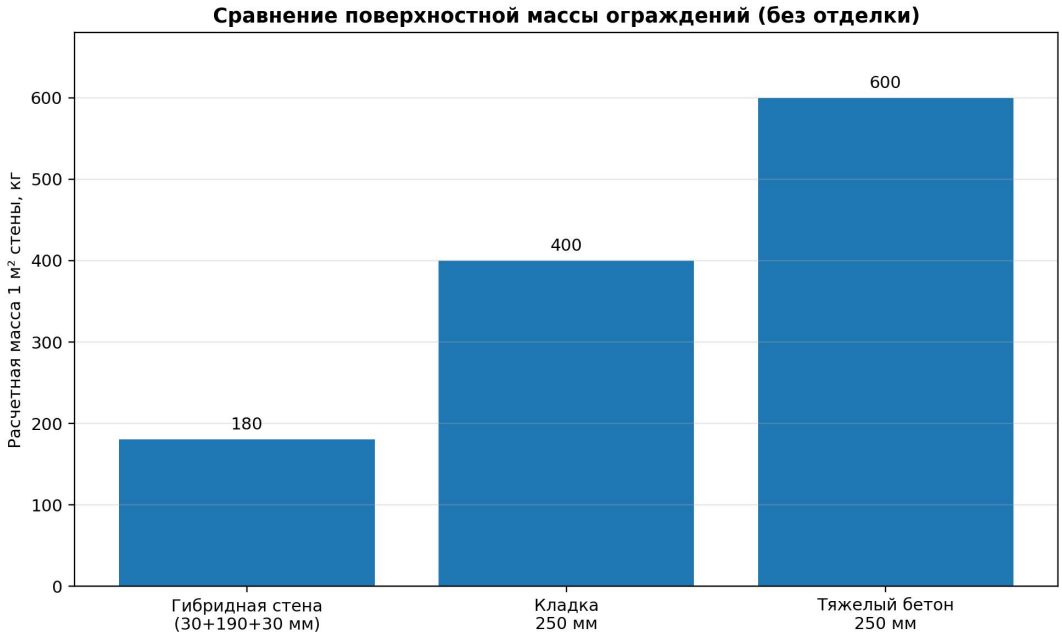

Рисунок 7 — Сравнение поверхностной массы ограждений в принятой расчетной постановке

7.4. Теплотехнические неоднородности и влажностный режим

Реальная стена содержит поперечные ребра, анкеры, обрамления проемов и поэтажные опоры, создающие двумерные и трехмерные тепловые мосты. Поэтому итоговый приведенный коэффициент теплопередачи должен определяться с учетом линейных и точечных включений. Особое внимание требуется узлам цоколя, перекрытия, парапета и оконного откоса. В климате с отопительным периодом необходимо проверить распределение парциального давления, риск конденсации и возможность высыхания конструкции. Печатная оболочка и отделочные слои должны обеспечивать требуемую водонепроницаемость, но не создавать неконтролируемого влагонакопления в полистиролбетоне.

8. Технология возведения

Предлагаемая последовательность сочетает заводскую точность каркаса и гибкость печати на площадке. Фундамент и анкеры выполняются с геодезическим контролем. Каркас монтируется укрупненными элементами, выверяется и временно раскрепляется. После устройства дисков перекрытий и постоянных связей выполняются опорные профили стен и закладные детали. Печать оболочек ведется по захваткам с учетом зоны движения печатающей системы и недопущения загрязнения композитных элементов цементным раствором. Заполнение полистиролбетоном начинается после подтверждения геометрической стабильности и контрольной прочности оболочки.

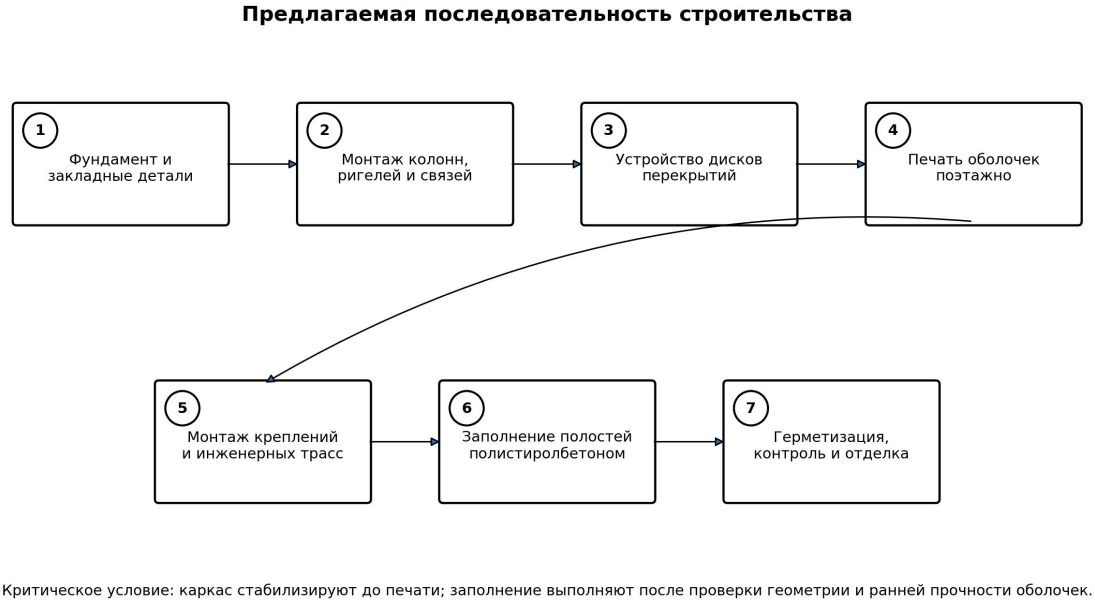

Рисунок 8 — Предлагаемая последовательность строительства гибридного здания

9. **Ограничения исследования**

Полученные численные значения относятся к демонстрационной геометрии и упрощенной упругой модели. В работе не определены расчетные сопротивления конкретного профиля, не выполнены локальная устойчивость и расчет болтовых соединений, не учтены ползучесть и температурное снижение свойств GFRP, не построена нелинейная сейсмическая модель, не выполнены двухмерные теплотехнические расчеты узлов и гигротермический анализ. Параметры печатного материала и полистиролбетона не основаны на испытаниях конкретных смесей. Поэтому статья формирует обоснованную конструктивную гипотезу и план доказательства, но не дает разрешения на строительство.

При адаптации к конкретному проекту необходимо учитывать действующие национальные нормы, технические условия производителей, сертификацию оборудования и материалов, требования пожарной и санитарной безопасности, а также результаты инженерно-геологических и сейсмологических изысканий. Зарубежные стандарты используются как источник методологии только в части, не противоречащей обязательным требованиям страны строительства.

10. **Заключение**

1. Разработана принципиальная система малоэтажного здания, в которой несущий пултрузионный стеклопластиковый каркас и ненесущая 3D-печатная стена образуют функционально разделенные, но контролируемо связанные подсистемы.

2. Предложено передавать вертикальные и горизонтальные нагрузки через балки, колонны, диски и специально назначенные связи, исключая неопределенное участие печатных стен в глобальной жесткости.

3. Для демонстрационной колонны 200 × 200 × 12 мм получены $\sigma = 18.8$ МПа и $N_{cr} = 1463$ кН; отношение $N/N_{cr} = 0.116$. Результат подтверждает только глобальную эйлерову устойчивость и не заменяет проверок локальной устойчивости, узлов и длительной работы.

4. Для демонстрационной балки 300 × 150 × 12 мм пролетом 3,6 м при $q = 12{,}6$ кН/м получены $M_{max} = 20.41$ кН·м и $\delta = 9.44$ мм (около $L/381$). В проектной модели дополнительно обязательны поперечный сдвиг, ползучесть, вибрации и соединения.

5. Для стены 30 + 190 + 30 мм при λ заполнителя 0,10 Вт/(м·К) расчетно получены R = 2.145 м²·К/Вт, U = 0.466 Вт/(м²·К) и масса 180.5 кг/м². Параметрический анализ показал высокую чувствительность U к влажности и плотности заполнителя.

6. Ключевым конструктивным решением признано поэтажное опирание стены и применение скользящих анкеров, передающих усилия из плоскости и допускающих расчетный межэтажный перекос, температурные перемещения и усадку.

7. Сформированы последовательность строительства, контрольные точки и матрица рисков, охватывающие точность каркаса, параметры печати, давление заполнителя, герметизацию, огнезащиту и цифровую прослеживаемость.

8. Для перехода к проектному применению необходима многоуровневая верификация «материал — элемент — узел — фрагмент — здание», включая циклическое испытание фрагмента «рама–стена», огневую оценку и натурный мониторинг.

Сведения о финансировании и конфликте интересов

Финансирование исследования и сведения об авторах указываются при подготовке рукописи к подаче в выбранный журнал. Конфликт интересов не заявлен. Все числовые результаты настоящей версии получены расчетно и не представлены как результаты натурных экспериментов.

Литература

1. ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary.
2. ISO/ASTM 52939:2023. Additive manufacturing for construction — Qualification principles — Structural and infrastructure elements.
3. Roussel N., Lowke D. (eds.). Digital Fabrication with Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM TC 276-DFC. Cham: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-90535-4.
4. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research. 2018;112:37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
5. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A. et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials — Production steps, processes, and their underlying physics: A review. Cement and Concrete Research. 2020;132:106037. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106037.
6. De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella V.N., Habert G., Agusti-Juan I. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. Cement and Concrete Research. 2018;112:25–36.
7. Buswell R.A., da Silva W.R.L., Bos F.P. et al. A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. Cement and Concrete Research. 2020;134:106068. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106068.
8. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Materials and Structures. 2012;45(8):1221–1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
9. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T. Hardened properties of high-performance printing concrete. Cement and Concrete Research. 2012;42(3):558–566. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.
10. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. Cement and Concrete Research. 2018;106:103–116. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.
11. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. Cement and Concrete Research. 2019;119:132–140.

12. Mohan M.K., Rahul A.V., De Schutter G., Van Tittelboom K. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. Cement and Concrete Composites. 2021;115:103855.
13. Ma G., Buswell R., Leal da Silva W.R. et al. Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. Cement and Concrete Research. 2022;156:106774. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106774.
14. Bos F.P., Menna C., Pradena M. et al. The realities of additively manufactured concrete structures in practice. Cement and Concrete Research. 2022;156:106746. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106746.
15. Bos F.P. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: A RILEM TC 304-ADC interlaboratory study. Materials and Structures. 2025. DOI: 10.1617/s11527-025-02686-x.
16. ASCE/SEI 74-23. Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2023.
17. CEN/TS 19101:2022. Design of fibre-polymer composite structures.
18. Bank L.C. Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials. Hoboken: Wiley, 2006.
19. Correia J.R. et al. Design of Fibre-Polymer Composite Structures: Commentary to CEN/TS 19101:2022. CRC Press, 2025. DOI: 10.1201/9781032706948.
20. Mottram J.T., Turvey G.J. Physical test data for the appraisal of design procedures for bolted joints in pultruded FRP structural shapes and systems. Progress in Structural Engineering and Materials. 2003;5(4):195–222. DOI: 10.1002/pse.154.
21. Matharu N.S., Mottram J.T. Plain and threaded bearing strengths for the design of bolted connections with pultruded FRP material. Engineering Structures. 2017;152:878–887. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.10.003.
22. Pirchio D. et al. Assessment of Resistance Factors for LRFD of Steel Bolted Connections in Pultruded FRP Frames. Journal of Composites for Construction. 2024;28(2). DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-4104.
23. Babu K.G., Babu D.S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. Cement and Concrete Research. 2003;33(5):755–762. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01055-4.
24. Chen B., Liu J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. Cement and Concrete Research. 2004;34(7):1259–1263. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.12.014.
25. Bouvard D., Chaix J.M., Dendievel R. et al. Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete. Cement and Concrete Research. 2007;37(12):1666–1673.