

Исследования теплофизических параметров модульных фасадов

Кирилл Павлович Зубарев^{1,2,3}, Вячеслав Владимирович Казунин³,
Виктор Львович Добшиц³, Левон Гарегинович Гаранян³,
Михаил Валерьевич Емельянов¹, Мария Антоновна Слизова¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

³ Российский университет дружбы народов; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведен обзор литературы по подходам к разработке и испытаниям энергоэффективных модульных фасадных систем. Отмечено, что разработка методов проектирования модульных фасадов особенно актуальна в условиях экстремального климата, где теплотехнические характеристики являются основным параметром для улучшения.

Материалы и методы. Обзор литературы проведен с применением как российских, так и зарубежных источников. Использовались российские статьи из списка БАЗ. Описывались зарубежные источники, проиндексированные в международных базах данных (MDPI, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink и Scopus).

Результаты. Рассмотрены исследования J. Li и соавт. по выбору теплоизоляционных материалов, работа A. Sciotti и соавт. по оптимизации узлов соединения и состава конструкционных смесей, а также работа X. Zou и соавт. о конструктивных решениях соединений, обеспечивающих сохранение заводской отделки. Для экспериментальной верификации S.P.B. Sousa и соавт. описали методы испытаний в динамических лабораторных условиях, а статья Z. Azkorra-Larrinaga и соавт. посвящена частично моделируемым натурным условиям.

Выводы. При выборе теплоизоляционных материалов наиболее эффективными считаются вакуумные изоляционные панели, они помогают снизить теплопотери примерно на 73–76 %, а также аэрогелевые покрытия с экономией около 43–49 %. В проектировании соединений модульных фасадов придумали использовать систему внутренних стяжек. Кроме того, как эффективное конструктивное решение, применяют S-образные соединительные профили, которые уменьшают перепад температуры между пенополистирольными панелями с 8 до 1,5 К. Для проверки модульных фасадных систем лучше всего сочетать лабораторные методы с натурными испытаниями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модульное строительство, теплоизоляционные материалы, мостики холода, энергоэффективность, математическое моделирование, температурное поле, теплоперенос, эксперимент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зубарев К.П., Казунин В.В., Добшиц В.Л., Гаранян Л.Г., Емельянов М.В., Слизова М.А. Исследования теплофизических параметров модульных фасадов // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.5

Автор, ответственный за переписку: Кирилл Павлович Зубарев, zubarevki93@mail.ru.

Studies of thermophysical parameters of modular facades

Kirill P. Zubarev^{1,2,3}, Vyacheslav V. Kazunin³, Victor L. Dobshits³, Levon G. Garanyan³,
Mikhail V. Emelianov¹, Maria A. Slizova¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture
and Construction Science (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;

³ RUDN University; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A literature review of approaches to the development and testing of energy-efficient modular facade systems is presented. It is noted that methods for designing modular facades are particularly relevant in extreme climates, where thermal performance is the principal parameter to be improved.

Materials and methods. The literature review was conducted using both Russian and international sources. The literature review included Russian articles published in journals listed by the Higher Attestation Commission (VAK list), as well as in-

ternational publications indexed in major bibliographic databases and available through MDPI, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink, and Scopus.

Results. The studies by J. Li et al. on the selection of thermal insulation materials, the work by A. Sciotti et al. on the optimization of connection joints and the composition of structural mixtures, and the work by X. Zou et al. on structural connection solutions that preserve factory-applied finishing were reviewed. For experimental verification, S.P.B. Sousa et al. described test methods under dynamic laboratory conditions, while the paper by Z. Azkorra-Larrinaga et al. addressed partially simulated full-scale conditions.

Conclusions. Vacuum insulation panels are considered the most effective thermal insulation materials, reducing heat losses by approximately 73–76 %, while aerogel coatings provide savings of about 43–49 %. A system of internal ties has been proposed for the design of modular facade connections. In addition, S-shaped connecting profiles are used as an effective structural solution, reducing the temperature difference between expanded polystyrene panels from 8 to 1.5 K. Modular facade systems are best verified by combining laboratory methods with full-scale tests.

KEYWORDS: modular construction, thermal insulation materials, thermal bridges, energy efficiency, mathematical modeling, temperature field, heat transfer, experiment

FOR CITATION: Zubarev K.P., Kazunin V.V., Dobshits V.L., Garanyan L.G., Emelianov M.V., Slizova M.A. Studies of thermo-physical parameters of modular facades. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.5

Corresponding author: Kirill P. Zubarev, zubarevkill93@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство с применением технологий модульных фасадов имеет преимущества в сравнении с классическим возведением здания [1, 2]. Время постройки сооружений снижается в связи с использованием фасадов или целых жилых блоков, предварительно собранных на заводе [3, 4]. Экономия возникает вследствие сокращения времени, так как существенные затраты на стройплощадке — это заработная плата рабочих [5, 6]. Модульные фасады позволяют проводить экспериментальные исследования в лаборатории на готовом элементе здания [7, 8]. Здания, собранные из модульных конструкций, в ряде случаев могут быть более экологичными и энергоэффективными [9, 10], так как заводская сборка дает возможность использовать материалы, которые практически не применяются на стройплощадке из-за сложностей монтажа [11, 12]. Также заводская сборка позволяет повысить качество установки таких элементов ограждающей конструкции, как теплоизоляция и воздушная прослойка [13, 14]. Экологичность модульных фасадов обоснована выбором материалов природного происхождения [15, 16] и материалов с возможностью повторного использования [17, 18], снижением углеродного следа [19, 20], возможностью минимизировать отходы при монтаже [21, 22]. Дополнительным преимуществом является заводской контроль качества, снижающий риск дефектов [23].

Теплотехнические характеристики строительных материалов влияют на энергопотребление здания [24]. Снижение теплопроводности ограждающих конструкций уменьшает потери тепла зимой и предотвращает перегрев летом, что напрямую уменьшает нагрузку на системы отопления, вентиляции и кондиционирования [25, 26]. Изменение состава основных строительных материалов, применение различных конструктивных решений модулей — одна из приоритетных задач в модульном строительстве

[27, 28]. Для экстремального климата, например арктического, требуются инновационные подходы [29].

Большая часть существующих исследований по модульным фасадам приходится на активные модули [30, 31], значительно меньше умных [32, 33], зеленых [34, 35] и пассивных [36, 37] (классификация предложена в комплексном обзоре модульных фасадов [38]). Также почти все исследования проведены для умеренного климата [39, 40]. По сравнению с 2023 г. в 2025 г. заинтересованность ученых-строителей в модульных фасадах возросла [41, 42]. Экстремальные условия требуют инновационных подходов к энергоэффективному модульному строительству [43]. Срок окупаемости модулей, соответствующих требуемым стандартам отопления, в таких условиях превышает срок службы здания [44].

При создании модульных конструкций важно учитывать мостики холода как в самой конструкции, так и в соединениях модульных элементов [45]. Тепловые потери вследствие неудачного конструктивного решения могут уменьшать эффективность используемых материалов [46]. Для оценки всех параметров модульных фасадов и отслеживания изменений в реальном времени требуются экспериментальные устройства, оборудованные специализированными датчиками, для снятия точных данных [47, 48]. Моделирование условий при невозможности выполнить натурный эксперимент с необходимыми данными имеет потенциал для дальнейших исследований [49, 50].

На рис. 1 представлен жилой дом, собранный из модульных фасадов, что демонстрирует архитектурную гибкость и эстетическую привлекательность этой технологии [8].

Цель исследования — выполнить обзор современных научных работ в области теплотехнических характеристик модульных фасадных систем; изучить применяемые энергоэффективные материалы, влияние конструктивных решений, стенды для имитации натуральных условий.



Рис. 1. Жилой дом, собранный из модульных фасадов, по данным М. Bagarić и соавт.: *a* — модульная стена; *b* — крепление модулей друг к другу; *c* — финальный этап сборки здания [8]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обзор литературы включал изучение и описание как российских, так и зарубежных источников. Использовались российские статьи из списка ВАК. Описывались зарубежные источники, проиндексированные в международных базах данных Scopus и Web of Science. Поиск проводился на платформах MDPI, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink и Scopus. Отбор статей для изучения осуществлялся по ключевым словам. Большинство приведенных источников опубликованы за последние 6 лет. На публикации всех авторов приведены библиографические ссылки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования в области выбора энергоэффективных материалов для конструкции модульного фасада

При разработке модульной фасадной системы J. Li и соавт. экспериментально оценили тепловую эффективность двух передовых изоляционных материалов: аэрогелевого покрытия и вакуумных изоляционных панелей [21]. Данные, полученные с помощью инфракрасной термографии, продемонстрировали более высокие теплозащитные качества аэрогеля в сравнении с минеральной ватой [21].

Представлены фотографии различных теплоизоляционных материалов, выполненные с помощью тепловизионной камеры (рис. 2) [21].

При установке в предложенную авторами модульную конструкцию и вакуумные, и аэрогелевые

панели показали повышение теплотехнических характеристик по сравнению с традиционными классическими решениями. Согласно китайскому нормативу GB 50189–2015 «Нормативы проектирования энергоэффективности общественных зданий», диапазон требуемого коэффициента теплопередачи для наружных стеновых ограждающих конструкций в холодном климате Китая составляет от 0,45 до 0,50 Вт/(м²·К). Применение вакуумных панелей в конструкции модульного фасада позволило достичь экономии 73–76 % относительно нормативных показателей благодаря низкой теплопроводности устанавливаемых панелей. Аэрогелевое покрытие, хотя и несколько уступает вакуумным панелям по достигаемым теплотехническим характеристикам, также обеспечило снижение теплопередачи (43–49 % по сравнению с требованиями норматива) [21].

Авторы разработали модульную фасадную систему таким образом, чтобы совместить энергосберегающие материалы в стандартизированные сборные компоненты. Аэрогелевое покрытие интегрируется в многослойную конструкцию, включающую конструктивные плиты, влагозащитные мембраны и внутреннюю отделку. Данный подход позволяет гибко использовать как вакуумные панели, так и аэрогель в зависимости от требуемого уровня теплозащиты.

Представлена сборная фасадная система по данным J. Li и соавт. (рис. 3) [21].

В рамках исследовательского проекта HPWalls (Высокоэффективные стеновые системы) А. Scioti и соавт. разработали и запатентовали сборные несущие стены из армированного пенополистиролбетона.

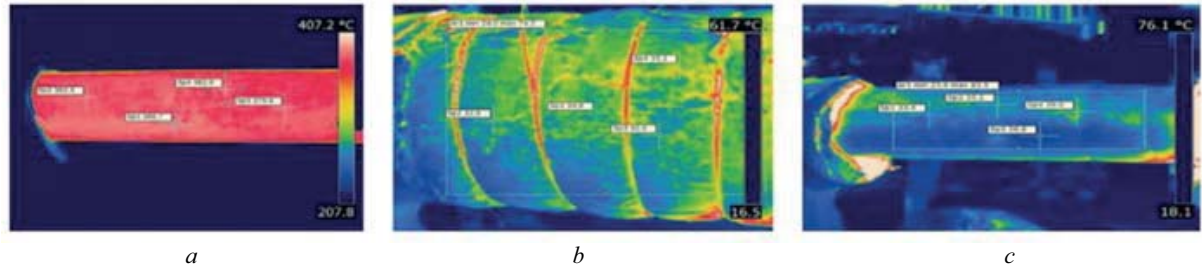


Рис. 2. Фотографии, полученные с помощью тепловизионной камеры, по данным J. Li и соавт. [21]: *a* — трубопровод без тепловой изоляции; *b* — минеральная вата; *c* — аэрогель

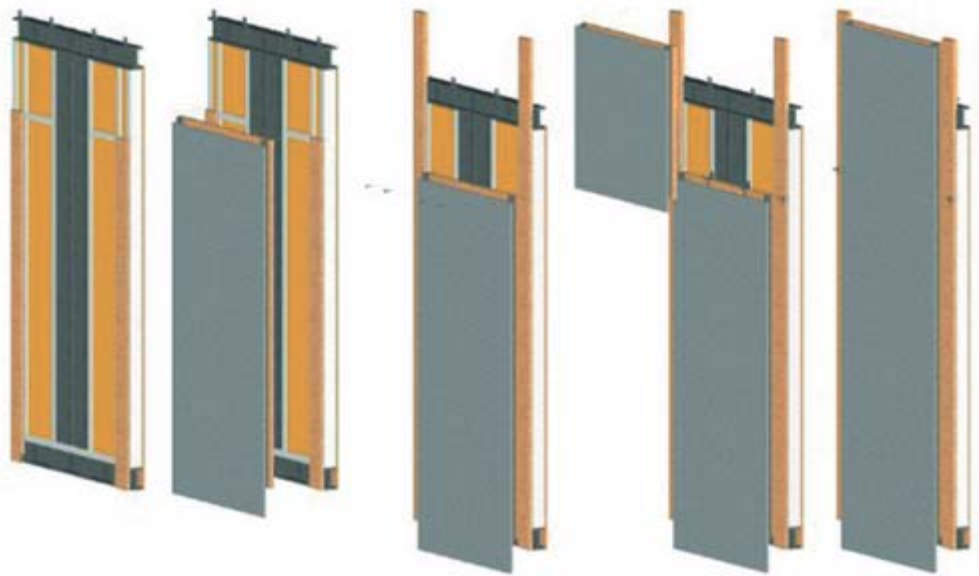


Рис. 3. Сборная фасадная система по данным J. Li и соавт. [21]

В работе авторы предлагают следующие технические решения: уменьшение мостиков холода и поиск баланса в замещении песка вспененным полистиролом для оптимального соотношения тепловых и механических характеристик [27].

Применяли два подхода. Первый заключался в замене песка пенополистиролом в возрастающих процентных соотношениях с сохранением исходной гранулометрической кривой заполнителя. Второй — в замене песка пенополистиролом с предварительным рассевом на частицы заданного размера. Первый подход, с одной стороны, приводит к ухудшению механических свойств из-за несоответствия гранулометрических составов компонентов, однако позволяет добиться экономической эффективности и сокращения трудоемкости процесса [27].

Для исследованных смесей определялись теплофизические характеристики: теплопроводность и объемная теплоемкость с использованием портативного прибора Isomet 2104 (Applied Precision Inc.) с поверхностным датчиком по стандарту UNI EN 12667:2002. Паропроницаемость и коэффициент сопротивления паропроницанию оценивали методом мокрой чаши согласно ISO 12572:2016 в климатической камере Perani AC520 при температуре 23 °C и относительной влажности 50 %. Прочность на сжатие определяли в соответствии с комплексом стандартов UNI EN 12390-2/3/4:2019. На заключительном этапе смеси классифицировали по итальянским нормам на конструкционные и неконструкционные, а также на легкие и обычные. Из десяти образцов, подготовленных авторами в процессе эксперимента, три

Процентное содержание заполнителей в исследованных смесях по данным A. Sciotti и соавт. [27]

Номер	Вспененный полистирол						Песок					
	Размер гранул, мм						Размер гранул, мм					
	0–0,5	0,5–1	1–2	2–4	4–6	6–8	0–0,5	0,5–1	1–2	2–4	4–6	6–8
S0	0						100 %					
S1	25 %						75 %					
S2	50 %						50 %					
S3	75 %						25 %					
S4	100 %						0					
S5			1–2				0–1				2–8	
S6				2–4			0–2				4–8	
S7					4–8		0–4					
S8			1–4				0–1				4–8	
S9				2–8			0–2					
S10				1–8			0–1					

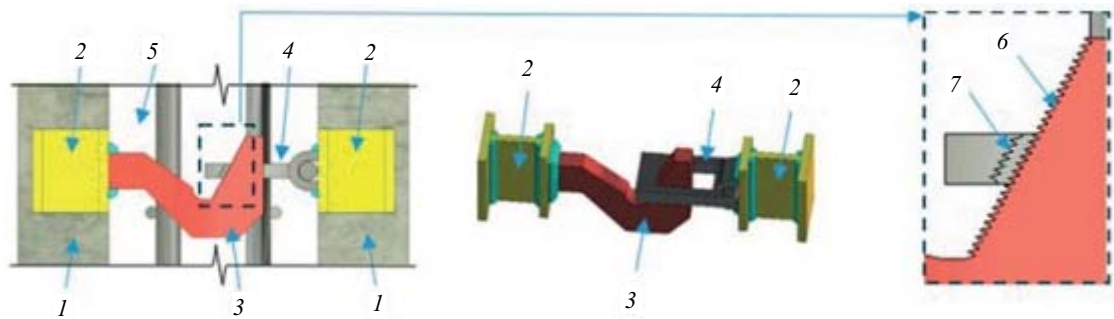


Рис. 4. Схема системы внутренних стяжек по данным X. Zou и соавт.: 1 — боковая стенка из сборного железобетона; 2 — заделка; 3 — крюк; 4 — петля; 5 — монолитный бетон; 6 — зубчатая поверхность на крюке; 7 — зубчатая поверхность на петле



Рис. 5. Испытание образца на растяжение по данным X. Zou и соавт. [1]

были исключены из-за несоответствия требованиям к легким бетонам. Из образцов легкого бетона только четыре образца можно было использовать в качестве конструктивных материалов. Результаты подтвердили гипотезу о том, что замена песка на пенополистирол в процентном соотношении по всей granulометрической кривой (образцы S1, S2, S3 и S4) является более выгодной с точки зрения затрат времени и ресурсов, но приводит к снижению плотности и ухудшению механических свойств стеновой системы. В результате внедрения в состав пенополистирола смеси становились легкими, их несущая способность падала. Авторы провели исследование теплопроводности структурных смесей (S1, S5, S6, S7, S8, S9). Установлено, что образец S8 (замена песка размером 1–4 мм на пенополистирол соответствующего размера) — наиболее эффективное решение, обеспечивающее наилучшую теплоизоляцию при сохранении конструктивных качеств ($\lambda = 1,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) [27].

Данные о процентной замене гранул приведены в таблице [27].

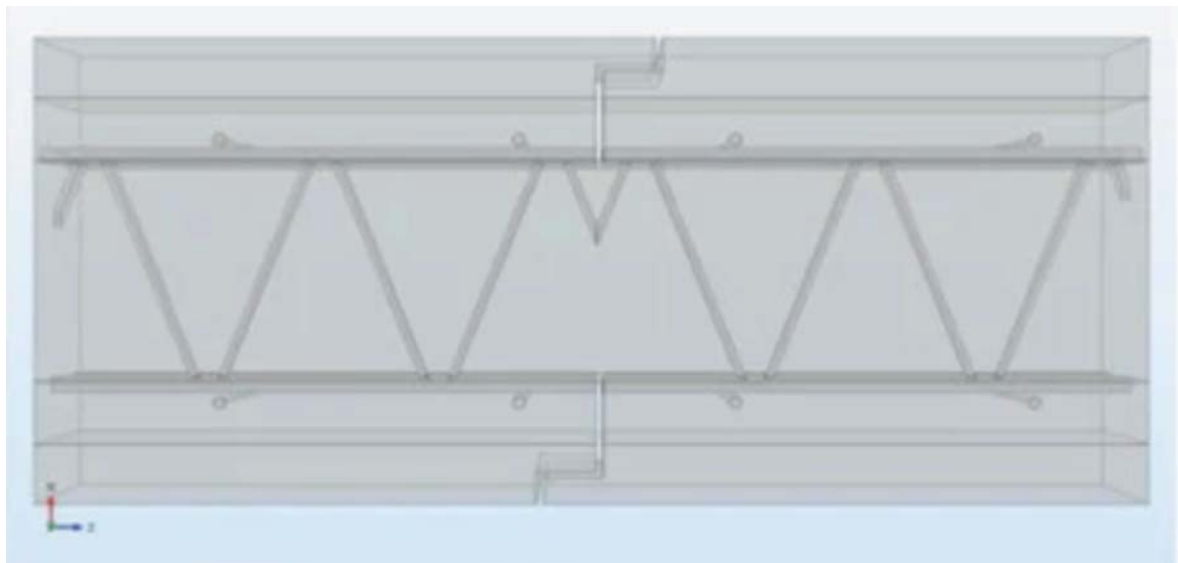


Рис. 6. S-образные соединения модулей по данным A. Sciotti и соавт. [27]

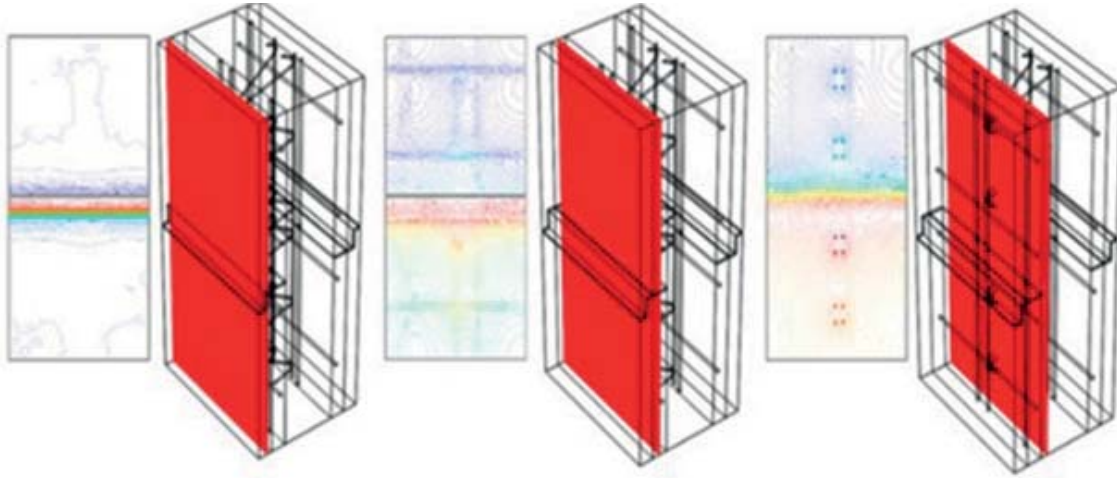


Рис. 7. Температурное поле по данным А. Sciotti и соавт. [27]

Исследования в области создания оптимальной конструкции крепления элементов модульного фасада

Для соединения двух соседних железобетонных модулей в композитную стену Х. Zou и соавт. разработали систему внутренних стяжек (рис. 4) [1].

Конструкция состоит из трех основных частей, устанавливаемых попарно напротив друг друга в стенках двух соседних модулей [1]:

- закладная деталь: Н-образная деталь, бетонизируемая в стенку модуля на заводе;
- крюк: приваривается к закладной детали на одном модуле;
- петля: приваривается к закладной детали на соседнем модуле.

При монтаже петля соседнего модуля опускается под собственным весом и зацепляется за крюк, в результате получается прочное соединение без необходимости разрушения стенок модуля. Система спроектирована для сохранения заводской внутренней отделки при сборке модулей в сооружение. Традиционный метод требует сквозных отверстий под стяжки, что ведет к повреждению отделки и дополнительным работам на площадке. Предложенная Х. Zou система позволяет выполнить всю отделку в заводских условиях, а на стройплощадке лишь соединить модули и залить бетон. Для проверки работоспособности системы были проведены испытания на растяжение для пяти образцов стяжек с разными сценариями монтажных допусков (отклонения до 8 мм) (рис. 5) [1].

В процессе эксперимента все образцы выдержали нагрузки, значительно превышающие расчетные, и разрушились при деформациях от 13,5 до 29,1 мм, что в 2–4 раза больше допустимых 8 мм. Испытания на продавливание бетонных стенок с закладными деталями показали среднюю расчетную несущую способность узла 35,6 кН. Натурные испытания на полно-

эксперимента все образцы выдержали нагрузки, значительно превышающие расчетные, и разрушились при деформациях от 13,5 до 29,1 мм, что в 2–4 раза больше допустимых 8 мм. Испытания на продавливание бетонных стенок с закладными деталями показали среднюю расчетную несущую способность узла 35,6 кН. Натурные испытания на полно-

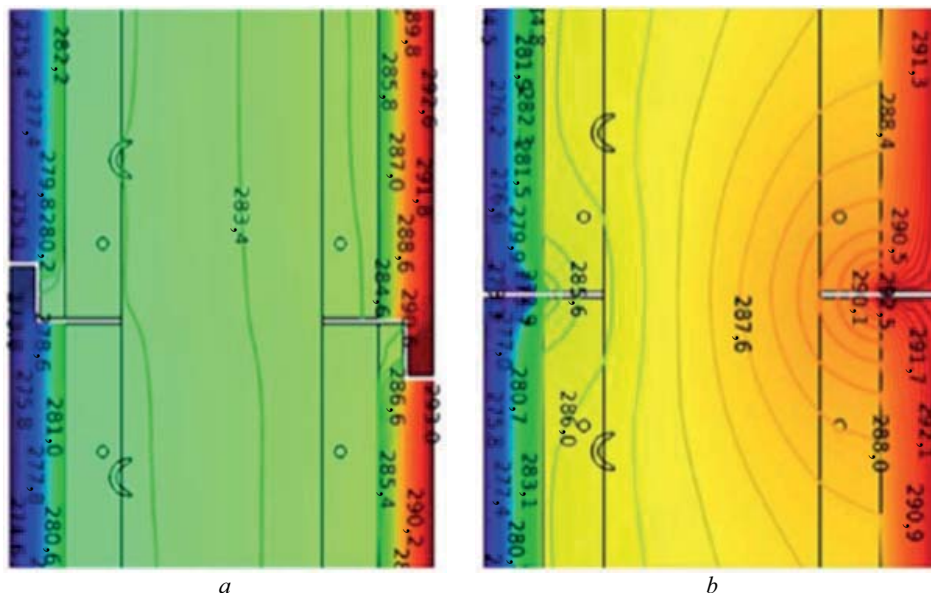


Рис. 8. Поперечное сечение соединений модульных стен по данным А. Sciotti и соавт. [27]: а — S-образные соединения; б — традиционное решение



Рис. 9. Фото существующей установки по данным S.P.B. Sousa и соавт. [26]

размерном макете подтвердили, что деформация стенок при заливке бетона не превышает 3,2 мм [1].

Разработанная система позволила отказаться от сквозных отверстий, сохранить внутреннюю отделку, уменьшить толщину и вес сборных стенок модулей, сократить время монтажа на площадке и снизить стоимость строительства [1].

Для предотвращения появления мостиков холода в модуле A. Sciotti и соавт. спроектировали вертикальные стыки с S-образными профилями (рис. 6) [27].

Компьютерная модель для двух панелей с предложенными соединениями рассчитана в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Проводилось

математическое моделирование температурного поля в двухмерной и трехмерной постановках при перепаде температур 20 °С [27].

Анализ результатов расчетов показал, что ферменная арматура во внутренней полости вызывает локальные искажения изотерм, которые затухают по мере удаления от полости и становятся незначительными на внешней поверхности (рис. 7) [27].

В зоне предложенного S-образного соединения искажение температуры не выявлено [27].

Сравнение с традиционной системой (модули устанавливаются встык с заливкой бетона) продемонстрировало преимущество S-образных профилей. В стандартном решении возникает явный тепловой мостик (рис. 8, б), а разница температур между двумя пенополистирольными панелями достигает 8 К [27].

В предложенной системе этот перепад составляет всего 1,5 К, что обеспечивает более стабильное температурное поле внутренней полости по всему поперечному сечению. Добавление отделочных слоев существенно не влияет на ослабление теплового мостика [27].

Разработка стенда для имитации натуральных климатических условий

S.P.B. Sousa и соавт. применили динамический измеритель теплового потока (Dynamic Heat Flow Meter) для оценки энергоэффективности модульных сэндвич-панелей [26]. В отличие от классического измерителя теплового потока, динамическая версия позволяет программировать изменение температуры во времени, имитируя реальные климатические условия (суточные и сезонные колебания) [26]. Внешний вид существующей установки показан на рис. 9.

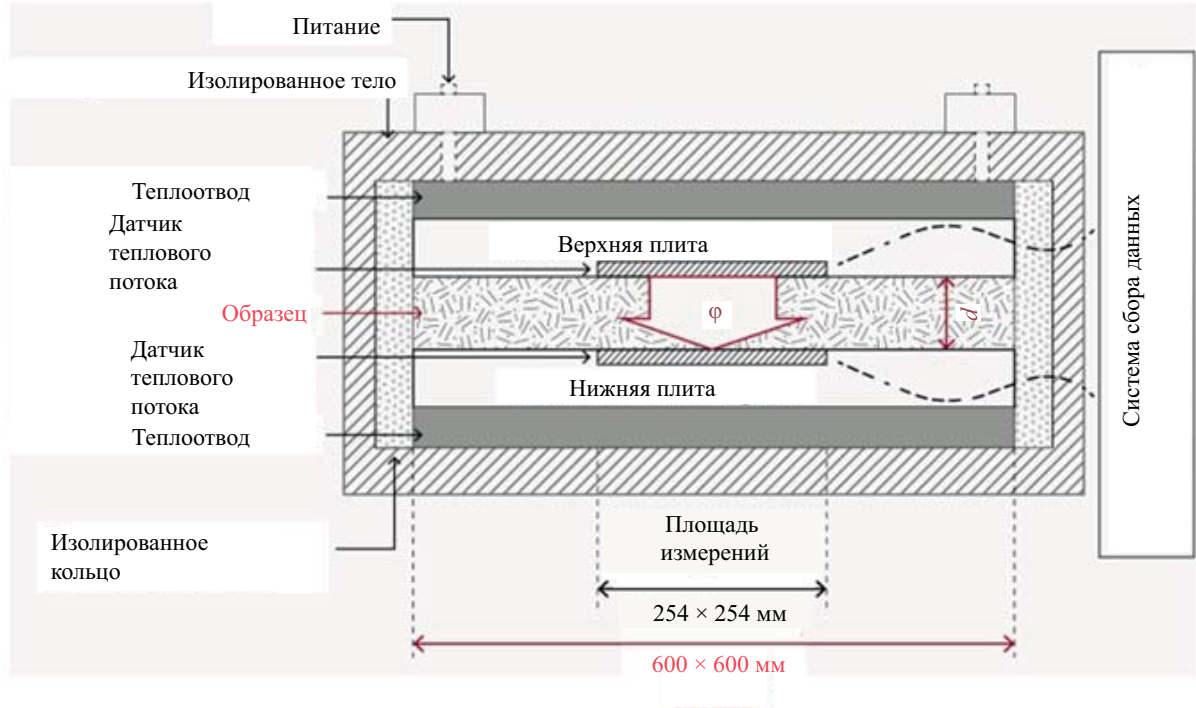


Рис. 10. Чертеж динамического измерителя теплового потока по данным S.P.B. Sousa и соавт. [26]



Рис. 11. Собранный модуль, тестовая ячейка PASLINK по данным Z. Azkorra-Larrinaga и соавт. [15]

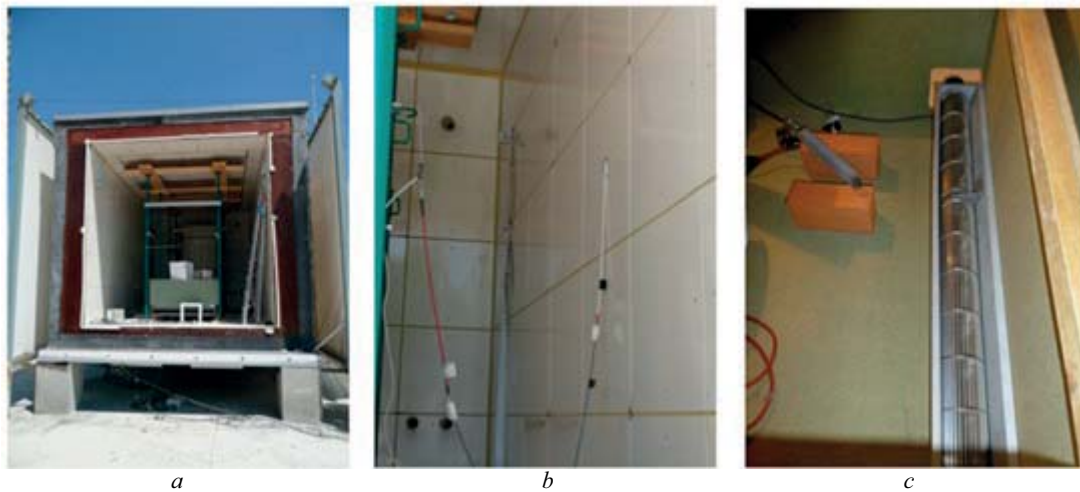


Рис. 12. Размещение датчиков в испытательной камере по данным Z. Azkorra-Larrinaga и соавт.: *a* — южная стена, где расположен испытуемый образец; *b* — датчики температуры воздуха и внутренней поверхности; *c* — электронагреватель и осевой вентилятор [15]

На рис. 10 представлен чертеж динамического измерителя теплового потока, разработанного S.P.B. Sousa и соавт. [26]. Прибор состоит из двух независимо управляемых металлических плит с термоэлектрическими модулями, способными как нагревать, так и охлаждать образец [26].

В нижнюю и верхнюю плиты встроены датчики температуры и теплового потока. Система управления с пропорционально-интегрально-дифференцирующими контроллерами может имитировать различные температурные профили: синусоидальные, ступенчатые, линейные. В описанном авторами эксперименте на верхней плите задавался синусоидальный цикл (от -15 до $+20$ °C с периодом 24 ч) при постоянной температуре 20 °C на нижней плите [26]. По результатам измерений по стандарту EN ISO 13786 производился расчет теплопередачи и временного сдвига [26].

Z. Azkorra-Larrinaga и соавт. исследовали тепловые характеристики модульной зеленой стены и открытого вентилируемого фасада с использованием тестовой ячейки PASLINK [15]. PASLINK (калориметрическая испытательная ячейка для натурных исследований) — это лабораторная установка для испытания строительных конструкций в реальных погодных условиях. Тестовая ячейка представляет собой модуль, с помощью которого измеряют теплообмен между контролируемой внутренней средой и наружным климатом. Камера состоит из двух секций: испытательного помещения $5,0 \times 2,7 \times 2,7$ м, где размещается система сбора данных, и отсека с оборудованием для обработки информации. На одну из стен устанавливался испытуемый образец. Все ограждающие конструкции исследовательской камеры обшивались утеплителем (рис. 11) [15].

Внутри поддерживалась постоянная температура с помощью электрического нагревателя и осевого вентилятора, предотвращающего температурное расслоение воздуха [15]. На рис. 12 показано размещение датчиков в испытательной камере.

Натурный эксперимент дал возможность учесть влияние солнца, ветра и осадков [15]. Полученные результаты авторы сравнивали с существующими данными для аналогичных фасадных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модульные фасады являются важным предметом научных исследований. Наиболее перспективные на-

правления в изучении модульных фасадных систем: обеспечение низкой теплопроводности строительных материалов, устранение мостиков холода в узлах соединений модулей, обеспечение стойкости конструкции к циклическим перепадам температуры, увлажнению и ветровым нагрузкам. Разработка новых композиционных материалов позволит достигнуть баланса между теплоизоляционными свойствами и несущими свойствами. Одновременное применение экспериментальных подходов с математическим моделированием процессов, протекающих в ограждающих конструкциях зданий, даст возможность объективно оценивать эффективность различных решений по проектированию модульных фасадных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zou X., Huang J., Lu W., Shi Ju., Au S., Zhao Zh. *et al.* An Innovative Composite Wall Inner Tie System Applied to Reinforced Concrete Modular Integrated Construction // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 10. P. 3052. DOI: 10.3390/buildings14103052. EDN HVUWUM.

2. Al-Homoud M.S. Thermal bridges in building envelopes : a state-of-the-art review // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 200. Pp. 78–92.

3. Яковлев Н.А., Ватин Н.И. Тепловая неоднородность узлов соединений модульных ограждающих конструкций // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2025. № 5 (119). DOI: 10.4123/CUBS.119.7

4. Коркина Е.В. Основное соотношение для оценки энергосбережения при применении остекления с низкоэмиссионными покрытиями // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 4 (796). С. 132–137. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-132-137. EDN TAXFPZ.

5. Jayathilaka R.D.W.W., Waidyasekara K.G.A.S., Sirimewan D.C. The impact of material and labour cost variables on contactors' budgeted cost // *Proceedings of 10th World Construction Symposium 2022*. 2022. Pp. 884–895. DOI: 10.31705/WCS.2022.71

6. Buijze J.A., Wright A.J. The potential for the Passive House standard in Longyearbyen — the High Arctic // *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021. Vol. 42. Issue 3. Pp. 307–325. DOI: 10.1177/0143624421996989. EDN USMWAI.

7. Zohourian M., Pamidimukkala A., Kermanshachi Sh., Almaskati D. Modular construction : a comprehensive review // *Buildings*. 2025. Vol. 15. Issue 12. P. 2020. DOI: 10.3390/buildings15122020. EDN SRORGP.

8. Bagarić M., Banjad Pečur I., Milovanović B. Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste : A case study // *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 206. P. 109573. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109573. EDN HHTRHD.

9. Fraunhofer IBP. Integral evaluation of innovative building envelopes // *Fraunhofer Publica*. 2020.

10. Klyuev S.V., Ayubov N.A., Fomina E.V., Ageeva M.S., Klyuev A.V., Nedoseko I.V. Influence of carbon black additives and finely ground waste from stone wool production on characteristics of cement systems // *Construction Materials and Products*. 2025. Vol. 8. Issue 4. DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-8. EDN GXNOHN.

11. Гамаюнова О.С. Обоснование стоимости утеплителей от их теплофизических характеристик // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2019. № 1 (76). С. 19–29. DOI: 10.18720/CUBS.76.2. EDN MMSZFC.

12. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Dolgov V., Beskopylny N., Elshaeva D. *et al.* Defects identification and crack depth determination in porous media on the brick masonry example using ultrasonic methods: numerical analysis and machine learning // *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9. Issue 6. P. 267. DOI: 10.3390/jcs9060267. EDN QVVASO.

13. Mohammed M.A., Budaiwi I.M., Al-Osta M.A., Abdou A.A. Thermo-Environmental Performance of Modular Building Envelope Panel Technologies : a Focused Review // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 4. P. 917. DOI: 10.3390/buildings14040917. EDN FTPZKC.

14. Niazy D., Metwally E.A., Rifat M., Awad M.I., Elsabbagh A. A conceptual design of circular adaptive façade module for reuse // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Issue 1. P. 20552. DOI: 10.1038/s41598-023-47593-9. EDN ATKJHY.

15. Azkorra-Larrinaga Z., Romero-Antón N., Martín-Escudero K., Lopez-Ruiz G., Giraldo-Soto C. Evaluation of the Thermal Performance of Two Passive Facade System Solutions for Sustainable Development // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 24. P. 16737. DOI: 10.3390/su152416737. EDN TNBMOV.

16. Salvalai G., Zhao F. Active prefabricated façade with building-integrated photovoltaic (APF-BIPV) technologies for high energy efficient building renovation: a systematic review of recent research advancements //

- Energy and Buildings. 2025. Vol. 348. P. 116440. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116440. EDN PZLXXC.
17. Morganti L., Vandi L., Astudillo Larráz Ju., García-Jaca Ja., Navarro Muedra A., Pracucci A. A1–A5 Embodied Carbon Assessment to Evaluate Bio-Based Components in Façade System Modules // Sustainability. 2024. Vol. 16. Issue 3. P. 1190. DOI: 10.3390/su16031190. EDN HWEHDP.
18. Loizou L., Barati Kh., Shen X., Li B. Quantifying Advantages of Modular Construction: Waste Generation // Buildings. 2021. Vol. 11. Issue 12. P. 622. DOI: 10.3390/buildings11120622. EDN WZSCIH.
19. Mohtashami N., Fuchs N., Streblow R., Osterhage T., Müller D., Fotopoulou M. et al. State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBES) // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.3390/en15030829. EDN HPHOKN.
20. Fawaz M., Elghezawy D., Nashaat B., Megahed N.A. Hybrid Façades: A Systematic Review of Integrating Vertical Greenery Systems with Advanced Façade Technologies // Sustainability. 2026. Vol. 18. Issue 6. P. 2882. DOI: 10.3390/su18062882. EDN ZDWCOF.
21. Li J., Lu S., Wang W., Huang J., Chen X., Wang J. Design and Climate-Responsiveness Performance Evaluation of an Integrated Envelope for Modular Prefabricated Buildings // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 2018. Issue 1. DOI: 10.1155/2018/8082368
22. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 8 (124). DOI: 10.34910/MCE.124.10. EDN HNNOQM.
23. Loli A., Andersen R., Olesen B.W. A full-scale experimental setup for characterizing the thermal performance of building integrated vacuum insulation panels // Energy and Buildings. 2022. Vol. 274. P. 112432.
24. Arun Solomon A., Hemalatha G. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system // Structures. 2020. Vol. 23. Pp. 204–213. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.10.019. EDN DDSMAP.
25. Bacher P., Madsen H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 7. Pp. 1511–1522. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.005
26. Sousa S.P.B., Teixeira H.C., Autretto G., Cardenas V.V., Fantucci S., Favoino F. et al. Eco-Friendly Sandwich Panels for Energy-Efficient Façades // Sustainability. 2025. Vol. 17. Issue 15. P. 6848. DOI: 10.3390/su17156848. EDN KDOVTB.
27. Sciotti A., De Fino M., Martiradonna S., Fatiguso F. Construction Solutions and Materials to Optimize the Energy Performances of EPS-RC Precast Bearing Walls // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 6. DOI: 10.3390/su14063558. EDN QIKWWC.
28. Zaborova D., Musorina T. Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 10. P. 5914. DOI: 10.3390/su14105914. EDN IXJBWJ.
29. Johnsen K.M., Lassen N., Havran J. Challenges and opportunities for modular housing in the Arctic // Polar Geography. 2021. Vol. 44. Issue 4. Pp. 265–282.
30. Lee Y., Ng E. Critical review of current understanding of passive façade design in residential buildings // Environmental Research: Infrastructure and Sustainability. 2024. Vol. 4. Issue 3. P. 032001. DOI: 10.1088/2634-4505/ad78fc. EDN RASCIW.
31. Danková A., Bielek B., Szabó D., Kaniková K., Šveda M. Twin Rooms — Experimental Facility for Research on Advanced Facades // Slovak Journal of Civil Engineering. 2024. Vol. 32. Issue 4. Pp. 19–30. DOI: 10.2478/sjce-2024-0022. EDN JCQUZU.
32. Noaman D.S., Moneer S.A., Megahed N.A., El-Ghafour Sh.A. Integration of active solar cooling technology into passively designed facade in hot climates // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 56. P. 104658. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104658. EDN MXUBGS.
33. Павлова М.О., Захаров В.А. Экспериментальные исследования фасадных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 43–50. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.43-50. EDN ABLQSN.
34. Honic M., Kovacic I., Rechberger H. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 217. Pp. 787–797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.212
35. Mohammadhosseini H., Tahir M.M., Alrshoudi F., Alghamdi H., Alharbi Y.R., Alsaif A. et al. Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 32. P. 101723. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101723. EDN LEWMDB.
36. Maroy K., Steeman M., Van Den Bossche N. Air flows between prefabricated insulation modules and the existing façade: A numerical analysis of the adaption layer // Energy Procedia. 2017. Vol. 132. Pp. 885–890. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.695
37. Pittau F., Lumia G., Heeren N., Iannaccone G., Habert G. Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 214. Pp. 365–376. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.304
38. Eberhardt L.Ch.M., Birkved M., Birgisdottir H. Building design and construction strategies for a circular economy // Architectural Engineering and Design Management. 2022. Vol. 18. Issue 2. Pp. 93–113. DOI: 10.1080/17452007.2020.1781588. EDN UJRDEO.
39. Teng Y., Li K., Pan W., Ng T. Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: A case study of a high-rise residential building in Hong Kong // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 3. P. 886.
40. Guerra B.C., Leite F. Circular economy in the construction industry: An overview of United States stakeholders' awareness, major challenges, and enablers //

Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 170. P. 105617. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105617. EDN SPAANA.

41. Fokaides P.A., Jurelionis A., Gineika A. A review of the thermal performance of vacuum insulation panels and their applications in the building sector // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 70. Pp. 198–210.

42. Gennaro G., Favoino F., Goia F., Michele G.De., Perino M. Calibration of DSF model for real-time control // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2069. P. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012027

43. Soares J., Oliveira A. Numerical simulation of a hybrid CSP/Biomass 5 MWel power plant // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1850. P. 110014. DOI: 10.1063/1.4984488

44. Attia S., Bilir S., Safy T., Struck C., Loonen R., Goia F. Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems // *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 179. Pp. 165–182. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.017

45. Elghazi Y., Elshafei G. Green building envelope: A comparative analysis of vertical greenery systems

and green roofs // *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61. Issue 9. Pp. 7269–7280.

46. Campelo R.P., da Silva L.R.R. Passive façade systems for energy efficiency in buildings : a systematic review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 157. P. 112044.

47. Liu Z., Li J., Zhai Z.J. A review of the application of modular building in different climate zones // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 72. P. 106652.

48. Kim D., Lee S. Bibliometric analysis of research trends in modular construction from 2010 to 2024 // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 162. P. 105378.

49. Gorse C., Johnston D., Boukhanouf R. The economic viability of passive house in challenging climates // *Energy Policy*. 2020. Vol. 147. P. 111826.

50. Van Schilt I.M., Kwakkel J.H., Mense J.P., Verbraeck A. A simulation-based approach for reconstructing a diverse set of supply chain models with sparse data using a quality diversity algorithm // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2026. Vol. 146. P. 103216. DOI: 10.1016/j.simpat.2025.103216. EDN JYHAZF.

Поступила в редакцию 26 апреля 2026 г.

Принята в доработанном виде 29 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Кирилл Павлович Зубарев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей и прикладной физики, доцент кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; старший научный сотрудник лаборатории строительной теплофизики; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, ведущий научный сотрудник научного центра техники и технологий строительства; **Российский университет дружбы народов**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; РИНЦ ID: 831037, Scopus: 57202815810, ResearcherID: F-6850-2019, ORCID: 0000-0002-7609-8521; zubarevkiiril93@mail.ru;

Вячеслав Владимирович Казунин — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; kvv-vyacheslav@yandex.ru;

Виктор Львович Добшиц — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0005-9085-6308; 89153383886@mail.ru;

Левон Гарегинович Гарянян — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0009-0374-7322; Levongaranyan@yandex.ru;

Михаил Валерьевич Емельянов — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 656092, Scopus: 57190730889, ResearcherID: M-1400-2014, ORCID: 0000-0002-1459-2911; Emelianov@mgsu.ru;

Мария Антоновна Слизова — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0002-4309-0651; slizovamaria9@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Modular facade construction offers several advantages over conventional building construction [1, 2]. The construction time of buildings is reduced through the use of factory-prefabricated facades or entire residential modules [3, 4]. Cost savings are achieved through shorter construction time, since labor wages account for a substantial share of on-site costs [5, 6]. Modular facades enable experimental laboratory studies to be performed on a completed building element [7, 8]. Buildings assembled from modular structures may in some cases be more environmentally friendly and energy efficient [9, 10], because factory assembly makes it possible to use materials that are rarely applied on construction sites due to installation difficulties [11, 12]. Factory assembly also improves the installation quality of such building envelope elements as thermal insulation and air cavities [13, 14]. The environmental performance of modular facades is justified by the selection of materials of natural origin [15, 16] and reusable materials [17, 18], by reduced carbon footprint [19, 20], and by the possibility of minimizing installation waste [21, 22]. An additional advantage is factory quality control, which reduces the risk of defects [23].

The thermal performance of building materials affects energy consumption [24]. Reducing the thermal conductivity of building envelope structures decreases heat losses in winter and prevents overheating in summer, which directly reduces the load on heating, ventilation and air-conditioning systems [25, 26]. Modified compositions of basic building materials and various structural solutions for modules are among the priority tasks in modular construction [27, 28]. Extreme climates, including Arctic climates, require innovative approaches [29].

Most existing studies on modular facades concern active modules [30, 31], while far fewer address smart [32, 33], green [34, 35] and passive modules [36, 37] (the classification is proposed in a comprehensive review of modular facades [38]). Almost all studies have also been conducted for temperate climates [39, 40]. Compared with 2023, the interest of construction researchers in modular facades increased in 2025 [41, 42]. Extreme conditions require innovative approaches to energy-efficient modular construction [43]. Under such conditions, the payback period

of modules that meet the required heating standards exceeds the service life of the building [44].

When modular structures are developed, thermal bridges must be taken into account both within the structure itself and in the connections between modular elements [45]. Heat losses caused by an unsuccessful structural solution may reduce the effectiveness of the materials used [46]. To evaluate all parameters of modular facades and monitor changes in real time, experimental devices equipped with specialized sensors are required to obtain accurate data [47, 48]. Simulation of conditions, when it is impossible to perform a full-scale experiment with the required data, has potential for further research [49, 50].

Fig. 1 shows an apartment building assembled from modular facades, demonstrating the architectural flexibility and aesthetic appeal of this technology [8].

The purpose of the study is to review recent research articles focused on the thermal performance of modular facade systems and to examine the energy-efficient materials used, the influence of structural solutions, and test stands for simulating full-scale conditions.

MATERIALS AND METHODS

The literature review included the study and description of both Russian and international sources. Russian papers from the VAK list were used. International sources indexed in the Scopus and Web of Science databases were described. The search was performed on the MDPI, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink and Scopus platforms. Papers were selected for the study by keywords. Most of the cited sources were published during the last six years. Bibliographic references are provided for the publications of all authors.

RESULTS

Studies on the selection of energy-efficient materials for modular facade construction

In developing a modular facade system, J. Li et al. experimentally evaluated the thermal performance of two advanced insulating materials: aerogel coatings and vacuum insulation panels [21]. Data obtained by infrared thermography demonstrated the higher thermal



Fig. 1. An apartment building assembled from modular facades, according to M. Bagarić et al.: *a* — modular wall; *b* — attachment of modules to each other; *c* — final stage of building assembly [8]

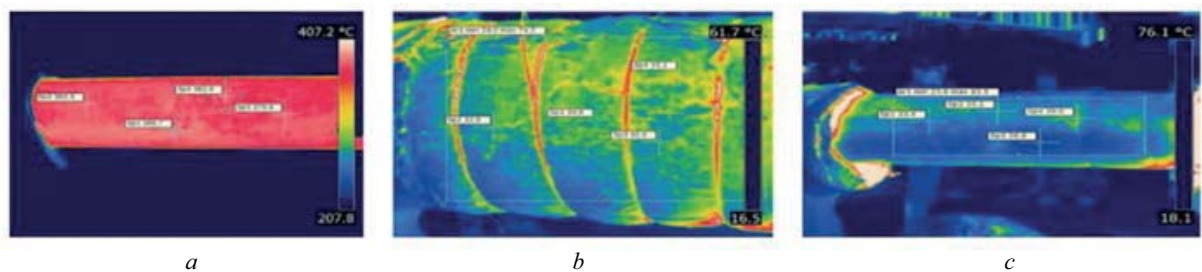


Fig. 2. Photographs taken with a thermal imaging camera according to J. Li et al. [21]: *a* — pipeline without thermal insulation; *b* — mineral wool; *c* — aerogel

protection performance of aerogel compared with mineral wool [21].

Photographs of various thermal insulation materials taken with a thermal imaging camera are presented in Fig. 2 [21].

When incorporated into the modular structure proposed by the authors, both vacuum insulation panels and aerogel panels improved thermal performance compared with conventional solutions. According to the Chinese standard GB 50189–2015 “Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings”, the required thermal transmittance range for external wall envelope structures in the cold climate of China is 0.45–0.50 W/(m²·K). The use of vacuum panels in the modular facade made it possible to achieve savings of 73–76 % relative to standard values due to the low thermal conductivity of the installed panels. Although the aerogel coating is somewhat inferior to vacuum panels in terms of achievable thermal performance, it also provided a reduction in heat transfer (43–49 % compared with the standard requirements) [21].

The authors designed the modular facade system so that energy-saving materials could be integrated into standardized prefabricated components. The aerogel coating is incorporated into a multilayer structure that includes structural boards, moisture-protective membranes

and interior finishing. This approach allows both vacuum panels and aerogel to be used flexibly, depending on the required level of thermal protection.

A prefabricated facade system made according to J. Li et al. is presented in Fig. 3 [21].

Within the HPWalls (High Performance Wall Systems) research project, A. Sciotti et al. developed and patented prefabricated load-bearing walls made of reinforced expanded polystyrene concrete. The authors propose the following engineering solutions: reduction of thermal bridges and identification of a balance in replacing sand with expanded polystyrene to obtain an optimal ratio of thermal and mechanical characteristics [27].

Two approaches were used. The first involved replacing sand with increasing percentages of expanded polystyrene while maintaining the original aggregate particle-size distribution. The second involved replacing sand with expanded polystyrene after preliminary sieving into particles of pre-set size. The first approach results in poorer mechanical properties due to incompatibility between the particle-size distributions of the components; however, it improves cost efficiency and reduces the labor intensity of the process [27].

For the mixtures studied, the thermophysical properties were determined as follows: thermal conductivity and

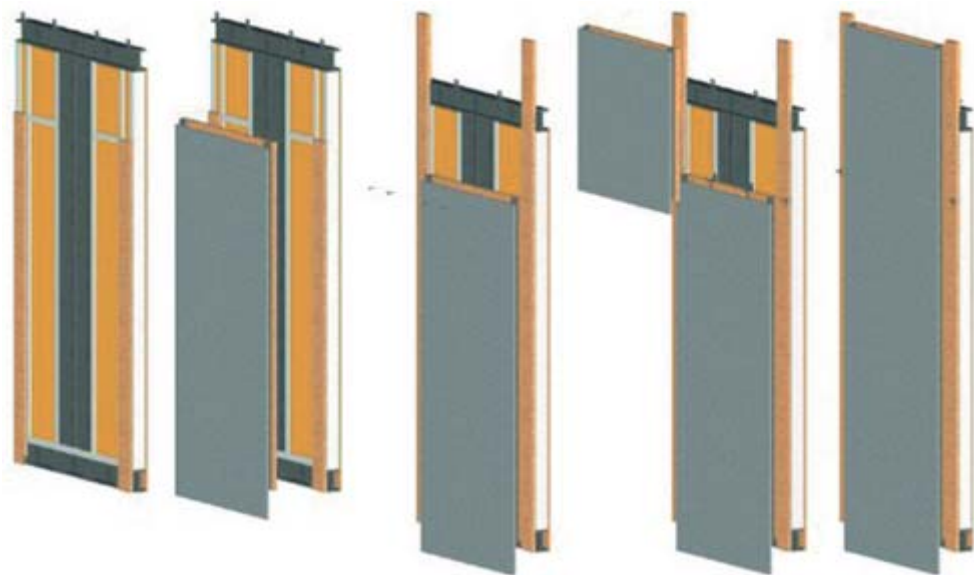


Fig. 3. Prefabricated facade system according to J. Li et al. [21]

Percentage content of aggregates in the studied mixtures according to A. Sciotti et al. [27]

Number	Expanded polystyrene						Sand					
	Granule size, mm						Granule size, mm					
	0–0.5	0.5–1	1–2	2–4	4–6	6–8	0–0.5	0.5–1	1–2	2–4	4–6	6–8
S0	0						100 %					
S1	25 %						75 %					
S2	50 %						50 %					
S3	75 %						25 %					
S4	100 %						0					
S5			1–2				0–1				2–8	
S6				2–4			0–2					4–8
S7					4–8		0–4					
S8			1–4				0–1				4–8	
S9				2–8			0–2					
S10			1–8				0–1					

volumetric heat capacity were measured using a portable Isomet 2104 instrument (Applied Precision Inc.) equipped with a surface probe, in accordance with UNI EN 12667:2002. Water vapour permeability and the water-vapour diffusion resistance factor were assessed by the wet-cup method according to ISO 12572:2016, using a Perani AC520 climatic chamber at 23 °C and 50 % relative humidity. Compressive strength was determined in accordance with the UNI EN 12390-2/3/4:2019 set of standards. At the final stage, the mixtures were classified according to Italian standards as structural and non-structural, as well as lightweight and normal-weight. Of the ten specimens prepared by the authors during the experiment, three were excluded because they did not meet the requirements for lightweight concrete. Among the lightweight concrete specimens, only four could be used as structural materials. The results confirmed the hypothesis that replacing sand with expanded polystyrene as a percentage over the entire grading curve (specimens S1, S2, S3 and S4) is more advantageous in terms of time and resource costs, but leads to lower density and deterioration of the mechanical properties of the wall system. As expanded polystyrene was introduced into the mixture composition, the mixtures became lightweight and their load-bearing capacity decreased. The authors studied the thermal conductivity of structural mixtures (S1, S5, S6, S7, S8 and S9).

It was established that specimen S8 (replacement of sand with a particle size of 1–4 mm by expanded polystyrene of the corresponding size) is the most effective solution, providing the best thermal insulation while preserving structural properties ($\lambda = 1.15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) [27].

Data on the percentage replacement of aggregate granules are presented in the Table [27].

Studies on the development of an optimal fastening design for modular facade elements

X. Zou et al. developed an internal tie system to connect two adjacent reinforced concrete modules into a composite wall (Fig. 4) [1].

The structure has three main parts installed in pairs opposite each other in the walls of two adjacent modules [1]:

- embedded part: an H-shaped element cast into the module wall at the factory;
- hook: welded to the embedded part on one module;
- loop: welded to the embedded part on the adjacent module.

During installation, the loop of the adjacent module descends under its own weight and engages with the hook, resulting in a strong connection without the need to damage the module walls. The system is designed to preserve the factory-applied interior finish when the modules are assembled into a structure. The conventional

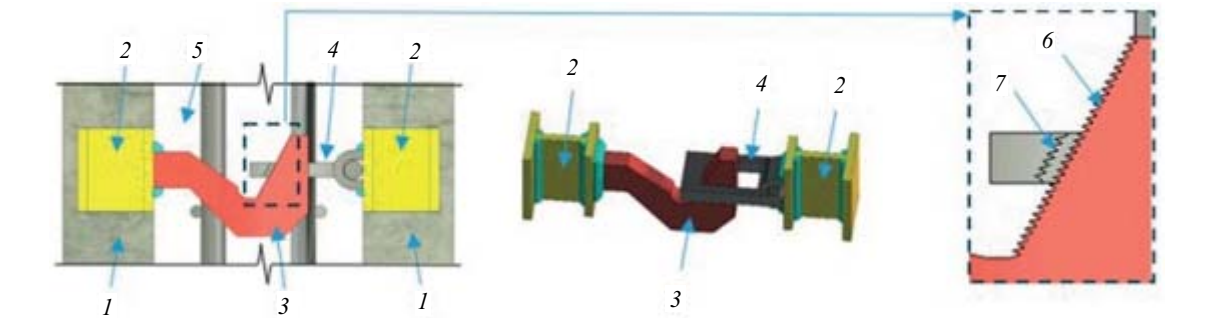


Fig. 4. Diagram of the internal tie system according to X. Zou et al.: 1 — precast concrete side wall; 2 — embedment; 3 — hook; 4 — loop; 5 — cast-in-situ concrete; 6 — serrated surface on the hook; 7 — serrated surface on the loop [1]



Fig. 5. Tensile test of the specimen according to X. Zou et al. [1]

method requires through-holes for ties, which damages the finish and requires additional on-site work. The system proposed by X. Zou makes it possible to complete all finishing operations under factory conditions, while only connecting the modules and placing concrete on site. To verify the serviceability of the system, tensile tests were carried out on five tie specimens under different installation tolerance scenarios (deviations of up to 8 mm) (Fig. 5) [1].

During the experiment, all specimens withstood loads significantly exceeding the design values and failed at deformations ranging from 13.5 to 29.1 mm, which is 2–4 times greater than the permissible 8 mm. Punching tests of concrete walls with embedded parts showed an average design bearing capacity of the joint of 35.6 kN. Full-scale tests on a full-size model confirmed that wall deformation during concrete casting did not exceed 3.2 mm [1].

The developed system made it possible to avoid through-holes, preserve the interior finish, reduce the thick-

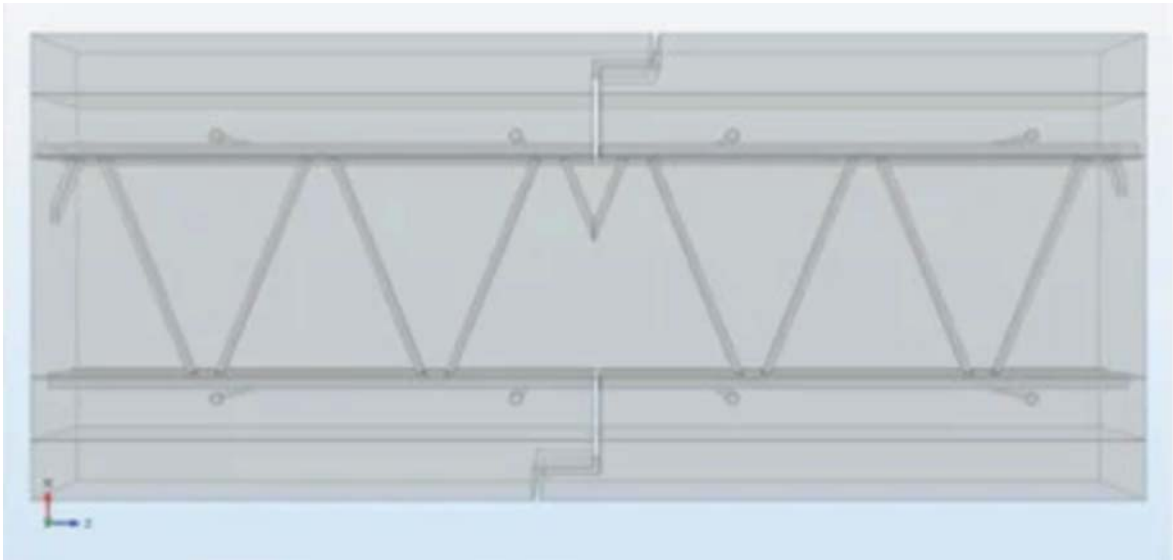


Fig. 6. S-shaped connections of modules according to A. Sciotti et al. [27]

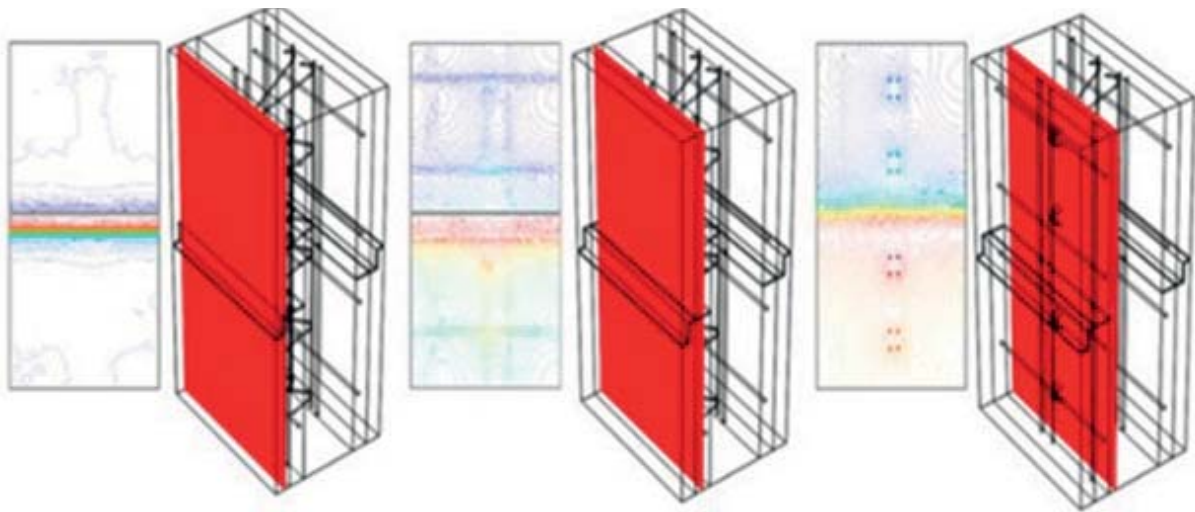


Fig. 7. Temperature field according to A. Sciotti et al. [27]

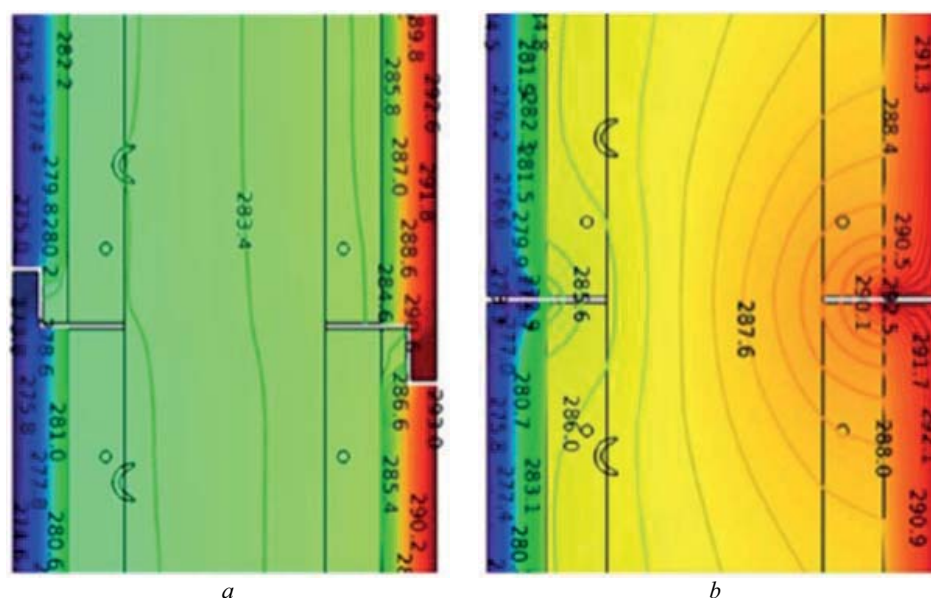


Fig. 8. Cross-section of modular wall joints according to A. Sciotti et al. [27]: *a* — S-shaped connections; *b* — traditional solution

ness and weight of the prefabricated module walls, shorten on-site installation time and reduce construction cost [1].

To prevent thermal bridges in the module, A. Sciotti et al. designed vertical joints with S-shaped profiles (Fig. 6) [27].

A computer model made for two panels with the proposed connections was calculated in COMSOL Multiphysics. Mathematical modeling of the temperature field was performed in two-dimensional and three-dimensional formulations with a temperature difference of 20 °C [27].

Analysis of the calculation results showed that truss reinforcement in the inner cavity causes local distortion of isotherms; these distortions attenuate with distance from the cavity and become insignificant on the external surface (Fig. 7) [27].

No temperature distortion was detected in the zone of the proposed S-shaped connection [27].

Comparison with the traditional system (butt-jointed modules with concrete casting) demonstrated the advantage of S-shaped profiles. In the standard solution, a distinct thermal bridge appears (Fig. 8, *b*), and the temperature difference between two expanded polystyrene panels reaches 8 K [27].

In the proposed system, this difference is only 1.5 K, which provides a more stable temperature field in the inner cavity across the entire cross-section. The addition of finishing layers has no significant effect on reducing the thermal bridge [27].

Development of a test stand for simulating full-scale climatic conditions

S.P.B. Sousa et al. used a Dynamic Heat Flow Meter to evaluate the energy efficiency of modular sandwich panels [26]. Unlike a conventional heat flow meter, the dynamic version makes it possible to program temperature changes over time, simulating real climatic

conditions (daily and seasonal variations) [26]. The appearance of the existing setup is shown in Fig. 9.

Fig. 10 presents the drawing of the dynamic heat flow meter developed by S.P.B. Sousa et al. [26]. The device has two independently controlled metal plates with thermoelectric modules capable of both heating and cooling the specimen [26].

Temperature and heat flow sensors are embedded in the lower and upper plates. A control system with proportional-integral-derivative (PID) controllers can simulate various temperature profiles: sinusoidal, stepwise and linear. In the experiment described by the authors, a sinusoidal cycle was set for the upper plate (from –15 to +20 °C with a period of 24 h) at a constant temperature



Fig. 9. Photograph of the existing setup according to S.P.B. Sousa et al. [26]

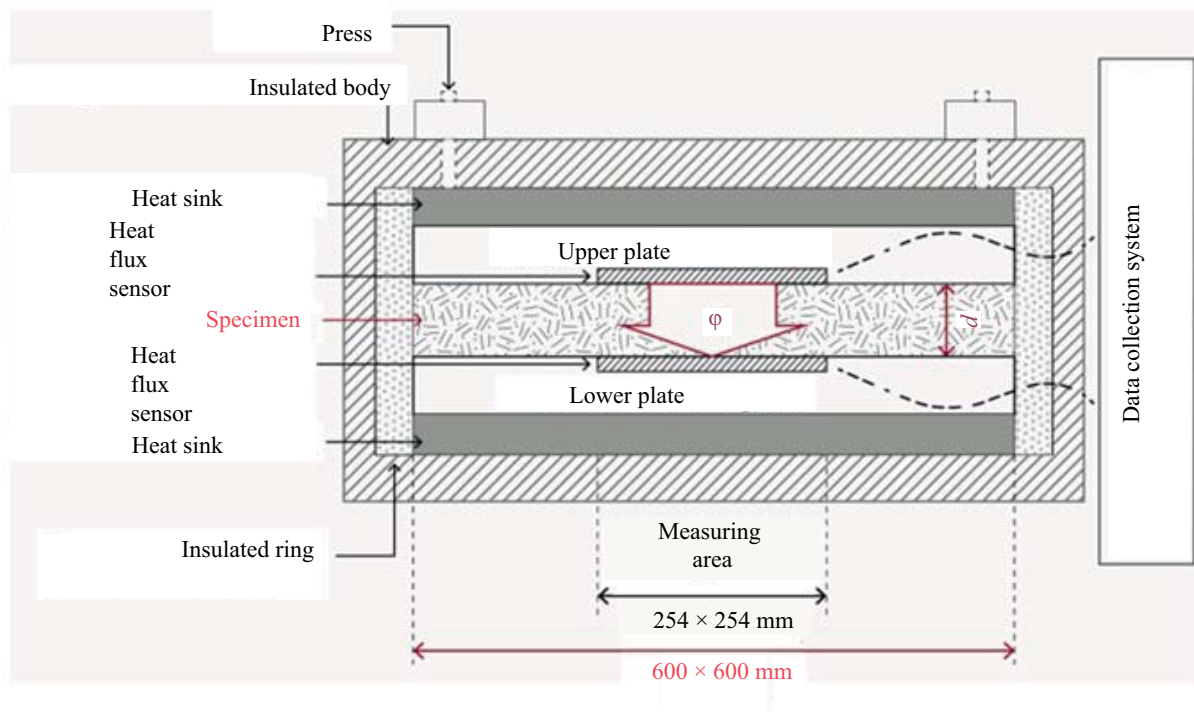


Fig. 10. Drawing of the Dynamic Heat Flow Meter according to S.P.B. Sousa et al. [26]



Fig. 11. Assembled module, PASLINK test cell according to Z. Azkorra-Larrinaga et al. [15]

of 20 °C on the lower plate [26]. Based on measurements according to EN ISO 13786, heat transfer and time shift were calculated [26].

Z. Azkorra-Larrinaga et al. studied the thermal characteristics of a modular green wall and an open ventilated

facade using a PASLINK test cell [15]. PASLINK (a calorimetric test cell for full-scale studies) is a laboratory facility for testing building structures under real weather conditions. The test cell is a module used to measure heat exchange between the controlled indoor environment



Fig. 12. Arrangement of sensors in the test chamber according to Z. Azkorra-Larrinaga et al.: *a* — south wall where the test specimen is located; *b* — air and internal surface temperature sensors; *c* — electric heater and axial fan [15]

and the outdoor climate. The chamber has two sections: a $5.0 \times 2.7 \times 2.7$ m test room, which houses the data collection system, and a compartment with information processing equipment. A test specimen was installed on one of the walls. All envelope structures of the research chamber were covered with insulation material (Fig. 11) [15].

A constant temperature was maintained inside by means of an electric heater and an axial fan that prevented temperature stratification of the air [15]. Fig. 12 shows the arrangement of sensors in the test chamber.

This full-scale experiment made it possible to take into account the effects of solar radiation, wind and precipitation [15]. The results obtained by the authors were compared with existing data for similar facade systems.

CONCLUSIONS AND DISCUSSION

Modular facades are an important subject of scientific research. The most promising areas in the study of modular facade systems include reducing the thermal conductivity of building materials, eliminating thermal bridges in module connection joints, and improving structural resistance to cyclic temperature variations, moisture, and wind loads. The development of new composite materials can help achieve a balance between thermal insulation performance and load-bearing capacity. Combining experimental approaches with mathematical modeling of processes occurring in building envelope structures enables an objective assessment of the effectiveness of various design solutions for modular facade systems.

REFERENCES

1. Zou X., Huang J., Lu W., Shi Ju., Au S., Zhao Zh. et al. An Innovative Composite Wall Inner Tie System Applied to Reinforced Concrete Modular Integrated Construction. *Buildings*. 2024; 14(10):3052. DOI: 10.3390/buildings14103052. EDN HVUWUM.
2. Al-Homoud M.S. Thermal bridges in building envelopes : a state-of-the-art review. *Energy and Buildings*. 2019; 200:78-92.
3. Yakovlev N.A., Vatin N.I. Thermal heterogeneity of joints of modular enclosing structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2025; 5(119). DOI: 10.4123/CUBS.119.7 (rus.).
4. Korkina E.V. The main ratio for evaluating energy savings when using glazing with low-emission coatings. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2025; 4(796):132-137. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-132-137. EDN TAXFPZ. (rus.).
5. Jayathilaka R.D.W.W., Waidyasekara K.G.A.S., Sirimewan D.C. The impact of material and labour cost variables on contactors' budgeted cost. *Proceedings of 10th World Construction Symposium 2022*. 2022; 884-895. DOI: 10.31705/WCS.2022.71
6. Buijze J.A., Wright A.J. The potential for the Passive House standard in Longyearbyen — the High Arctic. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021; 42(3):307-325. DOI: 10.1177/0143624421996989. EDN USMWAI.
7. Zohourian M., Pamidimukkala A., Kermanshachi Sh., Almaskati D. Modular construction : a comprehensive review. *Buildings*. 2025; 15(12):2020. DOI: 10.3390/buildings15122020. EDN SRORGP.
8. Bagarić M., Banjad Pečur I., Milovanović B. Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste : a case study. *Energy and Buildings*. 2020; 206:109573. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109573. EDN HHTRHD.
9. Fraunhofer IBP. Integral evaluation of innovative building envelopes. *Fraunhofer Publica*. 2020.

10. Klyuev S.V., Ayubov N.A., Fomina E.V., Ageeva M.S., Klyuev A.V., Nedoseko I.V. Influence of carbon black additives and finely ground waste from stone wool production on characteristics of cement systems. *Construction Materials and Products*. 2025; 8(4). DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-8. EDN GXNOHH.
11. Gamayunova O.S. Determination of the cost of insulation on their thermophysical characteristics. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2019; 1(76):19-29. DOI: 10.18720/CUBS.76.2. EDN MMSZFC. (rus.).
12. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Dolgov V., Beskopylny N., Elshaeva D. et al. Defects identification and crack depth determination in porous media on the brick masonry example using ultrasonic methods: numerical analysis and machine learning. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(6):267. DOI: 10.3390/jcs9060267. EDN QVVASO.
13. Mohammed M.A., Budaiwi I.M., Al-Osta M.A., Abdou A.A. Thermo-Environmental Performance of Modular Building Envelope Panel Technologies : a Focused Review. *Buildings*. 2024; 14(4):917. DOI: 10.3390/buildings14040917. EDN FTPZKC.
14. Niazy D., Metwally E.A., Rifat M., Awad M.I., Elsabbagh A. A conceptual design of circular adaptive façade module for reuse. *Scientific Reports*. 2023; 13(1):20552. DOI: 10.1038/s41598-023-47593-9. EDN ATKJHY.
15. Azkorra-Larrinaga Z., Romero-Antón N., Martín-Escudero K., Lopez-Ruiz G., Giraldo-Soto C. Evaluation of the Thermal Performance of Two Passive Facade System Solutions for Sustainable Development. *Sustainability*. 2023; 15(24):16737. DOI: 10.3390/su152416737. EDN TNBMOV.
16. Salvalai G., Zhao F. Active prefabricated façade with building-integrated photovoltaic (APF-BIPV) technologies for high energy efficient building renovation: a systematic review of recent research advancements. *Energy and Buildings*. 2025; 348:116440. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116440. EDN PZLXXC.
17. Morganti L., Vandi L., Astudillo Larraz Ju., García-Jaca Ja., Navarro Muedra A., Pracucci A. A1–A5 Embodied Carbon Assessment to Evaluate Bio-Based Components in Façade System Modules. *Sustainability*. 2024; 16(3):1190. DOI: 10.3390/su16031190. EDN HWEHDP.
18. Loizou L., Barati Kh., Shen X., Li B. Quantifying Advantages of Modular Construction: Waste Generation. *Buildings*. 2021; 11(12):622. DOI: 10.3390/buildings11120622. EDN WZSCIH.
19. Mohtashami N., Fuchs N., Streblow R., Osterhage T., Müller D., Fotopoulou M. et al. State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBES). *Energies*. 2022; 15(3). DOI: 10.3390/en15030829. EDN HPHOKN.
20. Fawaz M., Elgheznawy D., Nashaat B., Megahed N.A. Hybrid Façades: A Systematic Review of Integrating Vertical Greenery Systems with Advanced Façade Technologies. *Sustainability*. 2026; 18(6):2882. DOI: 10.3390/su18062882. EDN ZDWCOF.
21. Li J., Lu S., Wang W., Huang J., Chen X., Wang J. Design and Climate-Responsiveness Performance Evaluation of an Integrated Envelope for Modular Prefabricated Buildings. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018; 2018(1). DOI: 10.1155/2018/8082368
22. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 8(124). DOI: 10.34910/MCE.124.10. EDN HNNOQM.
23. Loli A., Andersen R., Olesen B.W. A full-scale experimental setup for characterizing the thermal performance of building integrated vacuum insulation panels. *Energy and Buildings*. 2022; 274:112432.
24. Arun Solomon A., Hemalatha G. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. *Structures*. 2020; 23:204-213. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.10.019. EDN DDSMAP.
25. Bacher P., Madsen H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*. 2011; 43(7):1511-1522. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.005
26. Sousa S.P.B., Teixeira H.C., Autretto G., Cárdenas V.V., Fantucci S., Favoino F. et al. Eco-Friendly Sandwich Panels for Energy-Efficient Façades. *Sustainability*. 2025; 17(15):6848. DOI: 10.3390/su17156848. EDN KDOVTB.
27. Sciotti A., De Fino M., Martiradonna S., Fatiguso F. Construction Solutions and Materials to Optimize the Energy Performances of EPS-RC Precast Bearing Walls. *Sustainability*. 2022; 14(6). DOI: 10.3390/su14063558. EDN QIKWWC.
28. Zaborova D., Musorina T. Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes. *Sustainability*. 2022; 14(10):5914. DOI: 10.3390/su14105914. EDN IXJBWJ.
29. Johnsen K.M., Lassen N., Havran J. Challenges and opportunities for modular housing in the Arctic. *Polar Geography*. 2021; 44(4):265-282.
30. Lee Y., Ng E. Critical review of current understanding of passive façade design in residential buildings. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*. 2024; 4(3):032001. DOI: 10.1088/2634-4505/ad78fc. EDN RASCIW.
31. Danková A., Bielek B., Szabó D., Kaniková K., Šveda M. Twin Rooms — Experimental Facility for Research on Advanced Facades. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2024; 32(4):19-30. DOI: 10.2478/sjce-2024-0022. EDN JCQUZU.

32. Noaman D.S., Moneer S.A., Megahed N.A., El-Ghafour Sh.A. Integration of active solar cooling technology into passively designed facade in hot climates. *Journal of Building Engineering*. 2022; 56:104658. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104658. EDN MXUBGS.
33. Pavlova M.O., Zakharov V.A. Experimental studies of facade structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 4:43-50. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.43-50. EDN ABLQSN. (rus.).
34. Honic M., Kovacic I., Rechberger H. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 217:787-797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.212
35. Mohammadhosseini H., Tahir M.M., Alrshoudi F., Alghamdi H., Alharbi Y.R., Alsaif A. et al. Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32:101723. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101723. EDN LEWMDB.
36. Maroy K., Steeman M., Van Den Bossche N. Air flows between prefabricated insulation modules and the existing façade: A numerical analysis of the adaptation layer. *Energy Procedia*. 2017; 132:885-890. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.695
37. Pittau F., Lumia G., Heeren N., Iannaccone G., Habert G. Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 214:365-376. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.304
38. Eberhardt L.Ch.M., Birkved M., Birgisdottir H. Building design and construction strategies for a circular economy. *Architectural Engineering and Design Management*. 2022; 18(2):93-113. DOI: 10.1080/17452007.2020.1781588. EDN UJRDEO.
39. Teng Y., Li K., Pan W., Ng T. Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: A case study of a high-rise residential building in Hong Kong. *Sustainability*. 2018; 10(3):886.
40. Guerra B.C., Leite F. Circular economy in the construction industry: An overview of United States stakeholders' awareness, major challenges, and enablers. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021; 170:105617. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105617. EDN SPAAHA.
41. Fokaides P.A., Jurelionis A., Gineika A. A review of the thermal performance of vacuum insulation panels and their applications in the building sector. *Energy and Buildings*. 2014; 70:198-210.
42. Gennaro G., Favoino F., Goia F., Michele G.De., Perino M. Calibration of DSF model for real-time control. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2069:012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012027
43. Soares J., Oliveira A. Numerical simulation of a hybrid CSP/Biomass 5 MWel power plant. *AIP Conference Proceedings*. 2017; 1850:110014. DOI: 10.1063/1.4984488
44. Attia S., Bilir S., Safy T., Struck C., Loonen R., Goia F. Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. *Energy and Buildings*. 2018; 179:165-182. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.017
45. Elghazi Y., Elshafei G. Green building envelope: A comparative analysis of vertical greenery systems and green roofs. *Alexandria Engineering Journal*. 2022; 61(9):7269-7280.
46. Campelo R.P., da Silva L.R.R. Passive façade systems for energy efficiency in buildings : a systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 157:112044.
47. Liu Z., Li J., Zhai Z.J. A review of the application of modular building in different climate zones. *Journal of Building Engineering*. 2023; 72:106652.
48. Kim D., Lee S. Bibliometric analysis of research trends in modular construction from 2010 to 2024. *Automation in Construction*. 2024; 162:105378. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105378
49. Gorse C., Johnston D., Boukhanouf R. The economic viability of passive house in challenging climates. *Energy Policy*. 2020; 147:111826.
50. Van Schilt I.M., Kwakkel J.H., Mense J.P., Verbraeck A. A simulation-based approach for reconstructing a diverse set of supply chain models with sparse data using a quality diversity algorithm. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2026; 146:103216. DOI: 10.1016/j.simpat.2025.103216. EDN JYHAZF.

Received April 26, 2026.

Adopted in revised form on April 29, 2026.

Approved for publication on May 3, 2026.

B I O N O T E S : **Kirill P. Zubarev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General and Applied Physics, Associate Professor of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Senior Researcher at the Laboratory of Building Thermal Physics; **Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Science (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Structural Materials, Leading Researcher of the Scientific Center

for Construction Engineering and Technologies; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maclaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ID RSCI: 831037, Scopus: 57202815810, ResearcherID: F-6850-2019, ORCID: 0000-0002-7609-8521; zubarevkirill93@mail.ru;

Vyacheslav V. Kazunin — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maclaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; kvv-vyacheslav@yandex.ru;

Victor L. Dobshits — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maclaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-9085-6308; 89153383886@mail.ru;

Levon G. Garanyan — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maclaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-0374-7322; Levongaranyan@yandex.ru;

Mikhail V. Emelianov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 656092, Scopus: 57190730889, ResearcherID: M-1400-2014, ORCID: 0000-0002-1459-2911; Emelianov@mgsu.ru;

Maria A. Slizova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-4309-0651; ho5metown@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors contributed equally to the publication.

The authors declare no conflicts of interest.