Научная статья

УДК 69.059.2:621.472

МОНТАЖ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДОВ СО ВСТРОЕННЫМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Поляков Денис Алексеевич, кандидат технических наук, Московский политехнический университет, Россия, Москва, polyakov_polytech@yandex.ru

Аннотация. Интеграция фотоэлектрических модулей в ограждающие конструкции зданий формирует принципиально новые требования к технологии их возведения, особенно в части обеспечения пожарной безопасности и контроля скрытых дефектов. Цель работы - разработка технологических решений по монтажу навесных вентилируемых фасадов с интегрированными фотоэлектрическими модулями и комплексная оценка монтажных процессов. Объектом исследования выступил натурный макет фасадной системы, возведенный в климатическом районе II. Методология включала хронометраж укрупненных операций, двухэтапную электролюминесцентную диагностику кремниевых ячеек, инструментальный контроль усилий затяжки крепежа, а также анализ результатов крупномасштабных огневых испытаний аналогичных систем. Анализ показал, что трудоёмкость монтажа BIPV-фасадов почти вдвое выше трудоёмкости монтажа фасадов с традиционной облицовкой. Это связано с необходимостью точной подгонки межмодульных зазоров и прокладки силовых кабелей. Применение динамометрического контроля позволяет снизить риск образования микротрещин в кремниевых ячейках, а повторная электролюминесцентная диагностика после монтажа — выявить возникшие дефекты. Оценка поведения конструкции при экстремальных тепловых воздействиях обосновала неэффективность исключительно интумесцентных барьеров и доказала необходимость применения комбинированных

противопожарных рассечек с механическим удержанием стеклянных панелей. Дополнительно сформулированы требования к прокладке кабельных трасс постоянного тока в вентилируемой полости для предотвращения рисков дугового пробоя. Сформированные критерии приемки и декомпозиция монтажных операций могут быть использованы при актуализации нормативной базы и составлении технологических карт для объектов с интегрированной фотоэлектрикой.

Ключевые слова: вентилируемый фасад; интегрированные фотоэлектрические модули; технология монтажа; пожарная безопасность ограждающих конструкций; электролюминесцентный контроль; трудоемкость строительных операций; натурный макет; противопожарные рассечки.

Original article

INSTALLATION OF VENTILATED FACADES WITH BUILT-IN PHOTOVOLTAIC MODULES: TECHNOLOGICAL AND CONTROL OPERATIONS

Poliakov Denis Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, polyakov_polytech@yandex.ru

Abstract. The integration of photovoltaic modules into building envelopes creates fundamentally new requirements for their construction technology, particularly in terms of fire safety and the detection of hidden defects. The objective of this study is to develop technological solutions for the installation of curtain-wall ventilated facades with active cladding and to comprehensively evaluate the production processes. The object of the study was a full-scale model of the facade system, constructed in climate zone II. The methodology included timing of large-scale operations, two-stage electroluminescence diagnostics of silicon cells, instrumental control of fastener tightening forces, and analysis of the results of large-scale fire tests of similar systems. An analysis of labor costs revealed that the installation of BIPV

facades is almost twice as expensive as traditional cladding, due to the need for precise adjustment of intermodular gaps and the routing of power circuits. The use of dynamometric testing and repeated electroluminescence after installation of the elements helps minimize the formation of microcracks in the silicon wafer. An assessment of the structure's performance under extreme thermal conditions demonstrated the ineffectiveness of intumescent barriers alone and demonstrated the need for combined firebreaks with mechanical retention of glass panels. Additionally, requirements were formulated for the installation of DC cables in the ventilated cavity to prevent the risk of arcing. The resulting acceptance criteria and breakdown of installation operations can be used to update regulatory frameworks and create process maps for facilities with integrated photovoltaics.

Keywords: ventilated facade; integrated photovoltaic modules; installation technology; fire safety of enclosing structures; electroluminescent control; labor intensity of construction operations; full-scale model; fire-resistant cuts.

Актуальность исследования. Развитие технологий энергоэффективного строительства способствует использованию ограждающих конструкций не только для теплозащиты здания, но и в составе инженерных систем [1]. Интеграция фотоэлектрических модулей в плоскость фасадов становится востребованным решением, особенно в регионах с высокими широтами, где угол падения солнечных лучей делает вертикальные поверхности более эффективными для генерации энергии, чем горизонтальные кровельные покрытия. Отражённый от соседних зданий и снежного покрова солнечный свет дополнительно увеличивает количество излучения, поступающего на фотоэлектрические модули [2]. Расширение функций фасада требует разработки технологий монтажа конструкций, которые обеспечивают теплозащиту здания и одновременно вырабатывают электроэнергию.

Согласно классификации Международного энергетического агентства, системы интегрированной фотоэлектрики (BIPV) принципиально отличаются от

навесных аналогов (BAPV) [3], [4]. Если последние присоединяются к готовым конструкциям, то модули BIPV изначально проектируются как строительные изделия, заменяющие традиционные фасадные материалы [5]. Двойное назначение модулей определяет особенности их монтажа. С одной стороны, система должна обеспечивать требуемые теплофизические и эксплуатационные характеристики ограждающей конструкции, включая организацию вентилируемой полости для отвода влаги и тепла [6]. С другой стороны, она выступает элементом электроустановки, что требует прокладки силовых и информационных кабелей, размещения коммутационных коробок и блоков непосредственно внутри ограниченного пространства фасадного экрана [7], [8].

Основная сложность заключается в необходимости одновременно соблюдать строительные и электротехнические требования. Нормативно-техническая база, регламентирующая применение подобных систем, фрагментирована и не учитывает комплексного поведения конструкции в реальных условиях. Действующие стандарты, такие как IEC 61730 или EN 13501-1, оценивают изолированные параметры: малую воспламеняемость при локальном воздействии пламени, электрическую безопасность или механическую прочность отдельных элементов. Однако они не регламентируют технологию монтажа системы в сборе [9-11]. Отсутствие утвержденных технологических карт, описывающих последовательность операций по установке модулей, формированию узлов примыканий, организации воздушных зазоров и скрытой прокладке коммуникаций, приводит к тому, что на стройплощадке собираются сложные многослойные конструкции, поведение которых при критических воздействиях заранее не прогнозировалось.

Особенно уязвимым элементом в таких системах выступает вентилируемая полость. Наличие горючих полимерных компонентов в структуре самих модулей (защитные пленки, герметики, изоляция кабелей) в сочетании с эффектом тяги, возникающим в воздушном зазоре, создает условия для скрытого и быстрораспространяющегося горения [12]. Практика показывает, что

стандартные противопожарные рассечки и барьеры могут оказаться неэффективными, если термическое воздействие приводит к деформации или выпадению несущих элементов фасадной облицовки, таких как стеклянные панели, закрепленные на полимерных клеевых составах. При разрушении фасадного экрана противопожарные преграды утрачивают эффективность, и пламя может распространяться в смежные секции [13], [14].

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью комплексного учёта строительно-технологических, электротехнических и противопожарных требований при монтаже вентилируемых фасадов с интегрированными фотоэлектрическими модулями. Особенности многослойной конструкции, наличие электрических соединений и вентилируемой полости обусловливают дополнительные требования к последовательности монтажных операций и производственному контролю. Цель работы заключается в анализе технологической организации монтажа фасадной системы с BIPV-модулями, определении наиболее уязвимых операций и оценке возможностей контроля механической целостности и эксплуатационной безопасности конструктивных элементов.

Степень разработанности проблемы исследования. Современные научные исследования фасадных систем с интегрированными фотоэлектрическими модулями охватывают вопросы преобразования солнечной энергии, теплового взаимодействия модулей с ограждающими конструкциями, надёжности механических соединений и обеспечения пожарной безопасности. Развитие технологии BIPV предполагает переход от оценки отдельных электротехнических компонентов к анализу эксплуатационных характеристик системы в сборе [15-17]. Существенное значение имеют исследования влияния геометрии фасада, ориентации модулей и отражённого солнечного излучения на эффективность работы фотоэлектрических элементов [18, 19].

Отдельное направление научных работ связано с изучением пожарных воздействий на многослойные фасадные системы. Результаты соответствующих

исследований свидетельствуют о необходимости учитывать взаимное расположение облицовочных панелей, воздушного зазора, несущей подсистемы, кабельных коммуникаций и противопожарных элементов [17, 20]. При этом механическая целостность креплений и сохранность геометрии фасадного экрана могут существенно влиять на развитие повреждений в условиях температурных воздействий. Несмотря на наличие исследований отдельных компонентов, вопросы взаимосвязи технологии монтажа, образования скрытых дефектов фотоэлектрических модулей и последовательности их производственного контроля требуют дальнейшей систематизации. Это определяет целесообразность комплексного анализа монтажных операций и методов обеспечения качества фасадной конструкции на этапах её возведения.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступил процесс возведения наружной стены административного здания класса функциональной пожарной опасности Ф4 в климатическом районе II (г. Санкт-Петербург). Проектная документация предусматривала устройство вентилируемого фасада площадью 1200 м² с интеграцией фотоэлектрических модулей BIPV.

Конструктивный узел фасадной системы включает несущую стену из железобетона, слой теплоизоляции из базальтовых минераловатных плит плотностью 80 кг/м³, ветрозащитную мембрану, воздушный зазор глубиной 65 мм и наружный экран из стеклополимерных модулей BIPV. Модули имеют алюминиевую раму, стеклянную лицевую поверхность и полимерную заднюю стенку. Крепление осуществляется к вертикальным алюминиевым направляющим, которые, в свою очередь, фиксируются к несущей стене посредством стальных кронштейнов с терморазрывными прокладками. Вентилируемая полость пересекается горизонтальными противопожарными рассечками из интумесцентных материалов. Кабельные трассы постоянного тока прокладываются в пространстве за модулями в гофрированных рукавах с индексом огнестойкости не ниже EI60, что соответствует требованиям для

скрытой электропроводки в горючих средах.

Для отработки технологических решений и сбора эмпирических данных на строительной площадке был возведен натурный макет площадью 12 м², имитирующий фрагмент фасада с оконным проемом. Методология исследования включала хронометраж монтажных операций, инструментальный контроль усилий затяжки резьбовых соединений, электролюминесцентную диагностику фотоэлементов до и после монтажа, а также теплотехническое моделирование в среде EnergyPlus для оценки влияния глубины вентзазора на температурный режим модулей.

Результаты исследования. Процесс монтажа BIPV-фасада был разделён на основные операции. Для оценки разработанной технологии трудозатраты на монтаж BIPV-фасада сопоставлены с трудозатратами на устройство навесного вентилируемого фасада (НВФ) с облицовкой из керамогранита аналогичной массы (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительная оценка трудоёмкости монтажа фасадных систем (на 1 м²)

Наименование операции	НВФ (керамогранит), нормо-час	BIPV-фасад, нормо-час	Примечание к технологическим особенностям BIPV
Разметка осей и установка кронштейнов	0,45	0,45	Идентично, требуется повышенная точность разметки
Монтаж направляющих и теплоизоляции	0,60	0,65	Требуется аккуратная обшивка кронштейнов мембраной
Прокладка кабельных трасс и коммутация	0,00	0,85	Специфическая операция: укладка DC-кабелей, монтаж коннекторов MC4
Установка облицовочных модулей	0,75	1,20	Требуются точная подгонка зазоров и выполнение скрытых электрических соединений
Герметизация швов и противопожарные рассечки	0,30	0,55	Установка интумесцентных лент, монтаж алюминиевых профилей
Электрическая проверка и пусконаладка	0,00	0,40	Прозвонка цепей, замер холостого хода
Итого	2,10	4,10	Трудоёмкость BIPV выше в 1,95 раза

Источник: разработано автором.

Данные, представленные в таблице 1, свидетельствуют о том, что

интеграция фотоэлектрики практически удваивает трудозатраты на квадратный метр. Основной прирост трудозатрат связан с прокладкой кабельных трасс и точной установкой модулей: даже небольшое отклонение может сделать невозможной стыковку соседних элементов.

Для минимизации скрытых дефектов была внедрена двухэтапная система контроля качества. Входной контроль осуществлялся методом электролюминесценции (ЭЛ) на земле до подъема модулей на высоту. Приёмочный контроль проводился повторно после завершения монтажа ряда (таблица 2).

Таблица 2 - Матрица контроля качества и типичные дефекты при монтаже BIPV

Контролируемый параметр	Метод и инструмент контроля	Критерии приёмки / Допуски	Выявляемые дефекты
Целостность кремниевых ячеек	Электролюминесцентная съёмка (до и после монтажа)	Отсутствие микротрещин, разрывов шин	Микротрещины ячеек из-за перекоса рамы при затяжке
Усилие затяжки анкеров и болтов	Динамометрический ключ	Согласно расчету, ± 5% от проектного	Недотяг (риск ветрового отрыва), перетяг (деформация профиля)
Геометрия плоскости и зазоры	Лазерный нивелир, щуп	Отклонение плоскостности ≤ 2 мм/2м; зазор 20±2 мм	Неравномерные зазоры, «волна» на фасаде
Герметичность и целостность кабелей	Визуальный осмотр, мегаомметр	Отсутствие перегибов, сопротивление изоляции > 50 МОм	Повреждение изоляции при прокладке кабелей, нарушение контакта в разъёмах MC4

Источник: разработано автором.

Натурный макет позволил выявить критическую уязвимость: при монтаже 4,2% модулей электролюминесцентная съёмка после установки зафиксировала появление микротрещин, отсутствовавших при входном контроле. Анализ показал, что дефекты возникали из-за неравномерной затяжки крепёжных болтов алюминиевой рамы, вызывавшей механические напряжения в стекле и кремниевой пластине. Это потребовало включить в технологическую карту

требование применять динамометрические ключи и затягивать крепёж в перекрёстной последовательности.

Вопросы пожарной и электрической безопасности решались не универсальными запретами, а привязкой к классу конструктивной пожарной опасности здания. С учётом результатов крупномасштабных испытаний, показавших неэффективность стандартных барьеров при выпадении стёкол, для предотвращения распространения огня по вентилируемой полости в узлах примыкания к оконным откосам и между этажами применены комбинированные рассечки. Они включают не только интумесцентный материал, но и механический стальной лист, предотвращающий выпадение горящих фрагментов. На стороне постоянного тока (до 1000 В) в распределительных коробках установлены устройства защиты от дугового пробоя (AFCI), что критически важно для предотвращения возгорания при нарушении контакта в разъемах MC4.

Обсуждение результатов исследования. Анализ трудозатрат подтверждает, что главная сложность монтажа BIPV заключается не в самом креплении модулей, а в организации скрытых инженерных коммуникаций и обеспечении геометрической точности. Если при монтаже керамогранита отклонения на 3–4 мм можно компенсировать шириной межплиточного шва, то при установке BIPV-модулей с жёсткими рамами необходимо выдерживать проектный зазор 20 мм. Превышение этого значения ухудшает условия движения воздуха в вентиляционном зазоре и внешний вид фасада, а уменьшение повышает риск контакта стеклянных панелей при тепловом расширении.

Результаты теплотехнического моделирования в среде EnergyPlus позволили оптимизировать глубину воздушного зазора. С одной стороны, увеличение зазора улучшает конвективный теплоотвод от тыльной стороны модулей, снижая их рабочую температуру и повышая КПД фотоэлементов. С другой стороны, это увеличивает ветровую нагрузку на подсистему и усложняет

узлы примыканий (таблица 3).

Таблица 3 - Влияние глубины вентилируемого зазора на энергоэффективность BIPV-системы (результаты моделирования EnergyPlus)

Глубина вентзазора, мм	Средняя температура тыльной стороны модуля летом, °C	Расчетная годовая выработка электроэнергии, кВт·ч/м²	Увеличение ветровой нагрузки на подсистему, %
40	68,4	112,5	Базовая
65 (проектная)	59,2	118,3	+ 14%
100	54,1	121,0	+ 28%
150	51,5	122,4	+ 45%

Источник: разработано автором.

Согласно таблице 3, увеличение зазора с 65 до 100 мм повышает выработку электроэнергии примерно на 2,3%, но требует существенного увеличения металлоёмкости несущей подсистемы для восприятия ветровой нагрузки. Глубина 65 мм, заложенная в проекте, была признана оптимальной, обеспечивая баланс между электрической эффективностью, строительной стоимостью и пожарной безопасностью (достаточное пространство для срабатывания интумесцентных рассечек).

Важным аспектом, выявленным при обсуждении результатов, стала необходимость защиты персонала при эксплуатации. Фотоэлектрические модули находятся под напряжением постоянного тока при любом освещении. Технологическая карта была дополнена разделом по обслуживанию, предусматривающим использование специализированных изолированных инструментов и обязательное отключение стрингов на уровне инверторов с применением блокировок, исключающих случайную подачу напряжения.

Выводы. Полученные в ходе исследования данные убедительно доказывают, что существующая нормативная база, опирающаяся преимущественно на лабораторные испытания отдельных компонентов, не в полной мере отражает реальное поведение фасадных систем с интегрированной фотоэлектрикой в экстремальных условиях. Переход от пассивных ограждающих конструкций к активным энергогенерирующим оболочкам требует фундаментального пересмотра подходов к стандартизации. При

развитии нормативной документации основное внимание следует уделять оценке пожарной и конструктивной безопасности фасадной системы в целом, а не только сертификации отдельных компонентов, поскольку взаимодействие разных материалов в вентилируемой полости определяет характер развития аварийных ситуаций.

В части разработки технологических карт и проектов производства работ первостепенное значение приобретает детализация монтажных операций, обеспечивающая сохранность хрупких элементов и герметичность инженерных коммуникаций. Типовые решения должны в обязательном порядке включать регламенты использования динамометрического инструмента при фиксации крепежных узлов, что позволит исключить возникновение внутренних напряжений в стекле и кремниевых пластинах. Особое внимание в производственной документации необходимо уделить трассировке кабелей постоянного тока внутри воздушного зазора. Маршруты прокладки и точки крепления кабелей необходимо определять с учётом расположения элементов подсистемы так, чтобы исключить контакт кабелей с острыми кромками алюминиевых профилей и их провисание, способное привести к короткому замыканию или образованию электрической дуги.

Анализ результатов крупномасштабных огневых испытаний диктует необходимость внесения существенных корректировок в действующие своды правил, регламентирующие устройство навесных фасадных систем. Выявленный факт обхода противопожарных рассечек вследствие оплавления полимерных компонентов и выпадения стеклянных панелей указывает на недостаточность применения исключительно интумесцентных материалов. Нормативные документы должны предписывать использование комбинированных узлов сопряжения, где вспучивающиеся ленты дополняются механическими стальными экранами, способными удержать раскаленные фрагменты облицовки и предотвратить проникновение пламени в смежные секции вентилируемой полости. Кроме того, требуется законодательное

закрепление обязанности проведения полномасштабных огневых тестов для любых новых конфигураций BIPV-фасадов перед их допуском на строительную площадку.

Не менее критичным аспектом для включения в строительные нормы является регулирование устойчивости облицовки к термическому шоку и предотвращение падения крупногабаритных фрагментов. Обрушение стеклянных панелей массой до десяти килограммов создает прямую угрозу как для лиц, находящихся на прилегающей территории, так и для подразделений пожарной охраны. Свод правил должен содержать расчетные методики и конструктивные требования к дублирующим системам удержания стекла, которые сработают даже при потере несущей способности первичного клеевого шва или деформации алюминиевой рамы. Параллельно с этим, электротехнические разделы нормативной базы необходимо дополнить требованиями по обязательному применению устройств защиты от дугового пробоя в распределительных цепях фасадных систем, а также регламентировать классы огнестойкости гофрированных рукавов и кабельных каналов, прокладываемых в горючей среде вентилируемого зазора.

Формирование комплексной нормативно-технической базы, объединяющей требования строительной механики, теплотехники и пожарной безопасности, станет основой для безопасной масштабной интеграции фотоэлектрических модулей в архитектурную среду. Согласование производственных инструкций, описывающих этапы монтажа, с требованиями сводов правил позволит снизить риск скрытых дефектов и неконтролируемого распространения огня. Дальнейшие исследования в области технологии строительства следует направить на поиск новых термостойких полимерных составов для тыльной стороны модулей и разработку крепёжных узлов, обеспечивающих сохранение формы фасадного экрана при экстремальном тепловом воздействии.

Список литературы

1. Николаева И. О. Особенности интеграции фотоэлектрических установок в архитектуру зданий (на примере научно-производственных комплексов) // Архитектура и современные информационные технологии. — 2023. — № 2 (63). — С. 115–129. — DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-115-129.

2. Assoa Y. B., Valencia-Caballero D., Rico E., Del Caño T., Furtado J. V. Performance of a Large Size Photovoltaic Module for Façade Integration // Renewable Energy. — 2023. — Vol. 211. — P. 903–917. — DOI: 10.1016/j.renene.2023.04.087.

3. Лачинов М. А., Мотяев М. А., Королев П. Е. Фасадная система с облицовочными панелями из фотоэлектрических модулей : патент RU 2803030 C2, Российская Федерация. — Опубликован 05.09.2023.

4. Stølen R., Li T., Wingdahl T., Steen-Hansen A. Large- and Small-Scale Fire Test of a Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Façade System // Fire Safety Journal. — 2024. — Vol. 144. — Art. 104083. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.104083.

5. Шуршилин Е. А., Олехнович Я. А. Влияние отказа работы облицовочных панелей на теплотехнические свойства навесных вентилируемых фасадных конструкций // Строительство и техногенная безопасность. — 2024. — № 32. — С. 55–62. — DOI: 10.29039/2413-1873-2024-32-55-62.

6. Pelle M., Gubert M., Dalla Maria E., Astigarraga A., Avesani S., Maturi L. Experimental Evaluation of the Temperature Related Behaviour of Pigment Based Coloured BIPV Modules Integrated in a Ventilated Façade // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 323. — Art. 114763. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114763.

7. Babin M., Andersen N. L., Thorning J. K., Thorsteinsson S. Yield Analysis of a BIPV Façade Prototype Installation // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 322. — Art. 114730. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114730.

8. Belloni E., Bianchini G., Casini M., Faba A., Intravaia M., Laudani A., Lozito G. M. An Overview on Building-Integrated Photovoltaics: Technological Solutions, Modeling, and Control // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 324. — Art. 114867. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114867.

9. Chen X., Luo C., Ji J., Liu L., Su X., Yu Y., Zhang H., Peng R. Experimental Investigation of Photoelectrical Performance and Thermal Characteristics of Ventilated Building-Integrated Photovoltaic System Utilizing Lightweight and Flexible Crystalline Silicon Module // Journal of Cleaner Production. — 2024. — Vol. 460. — Art. 142612. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142612.

10. Тарануха Н. Л., Ананин К. Ю., Новиков М. Ю., Канаков И. Д. Развитие домостроения с учетом энергосберегающих технологий – применения гибридных систем энергоэффективности // Градостроительство и архитектура. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 72–82. — DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.10.

11. Albinius N., Rau B., Riedel M., Ulbrich C. A Comprehensive Case Study of a Full-Size BIPV Facade // Energies. — 2025. — Vol. 18, No. 5. — Art. 1293. — DOI: 10.3390/en18051293.

12. Ma X., Yang R. J., Bao D. W. Advancing Building-Integrated Photovoltaics: Solution for Facade Installation Challenges // International Journal of Construction Management. — 2025. — Опубликовано онлайн 17 декабря 2025 г. — DOI: 10.1080/15623599.2025.2595510.

13. Cuce P. M., Cuce E. Ventilated Facades for Low-Carbon Buildings: A Review // Processes. — 2025. — Vol. 13, No. 7. — Art. 2275. — DOI: 10.3390/pr13072275.

14. Pizzatto S. M. dos S. et al. Ventilated Facade System: A Review // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. — 2025. — Vol. 64, No. 3. — Art. 100443. — DOI: 10.1016/j.bsecv.2025.100443.

15. Ruan D., Fan C., Hu M., Li Y., Guan J. Building-Integrated Photovoltaics Through Multi-Physics Synergies: A Critical Review of Optical, Thermal, and Electrical Models in Facade Applications // Renewable Energy. — 2025. — Vol. 251. — Art. 123332. — DOI: 10.1016/j.renene.2025.123332.

16. Corti P., Follo A., Bonomo P. Workflow to Support Cost-Benefits Comparison and Sensitivity Analysis of BIPV Case Studies: Three Examples of BIPV Facades in the South of Switzerland // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 322. — Art. 114732. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114732.

17. Borja Block A., Escarre Palou J., Courtant M. et al. Colouring Solutions for Building Integrated Photovoltaic Modules: A Review // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 314. — Art. 114253. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114253.

18. Xu S., Wang X., Song Z., Tang Y., Ji J. Design, Experimental Testing, and Numerical Investigation of a Ventilated Semi-Transparent Photovoltaic Facade Integrated with Supply-Air Conditioning in Summer // Renewable Energy. — 2026. — Vol. 263. — Art. 125415. — DOI: 10.1016/j.renene.2026.125415.

19. Сабитов Л. С., Волков М. Ю. Оптимизация взаимодействия участников строительного проекта при устройстве навесных фасадных систем // Строительное производство. — 2025. — № 4. — Art. CP0009. — DOI: 10.29039/2658-5340-2025-4-CP0009.

20. Stankiuvienė A., Šukys R. Fire Performance of Ventilated Rendered Facades with EPS Insulation: Full-Scale DIN-Type Evaluation and Influence of Cavities on Flame Spread // Fire. — 2026. — Vol. 9, No. 3. — Art. 113. — DOI: 10.3390/fire9030113

References

1. Nikolaeva I. O. Osobennosti integracii fotoe`lektricheskix ustanovok v arxitekturu zdanij (na primere nauchno-proizvodstvenny`x kompleksov) // Arxitektura i sovremenny`e informacionny`e texnologii. — 2023. — № 2 (63). — S. 115–129. — DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-115-129.

2. Assoa Y. B., Valencia-Caballero D., Rico E., Del Caño T., Furtado J. V. Performance of a Large Size Photovoltaic Module for Façade Integration // Renewable Energy. — 2023. — Vol. 211. — P. 903–917. — DOI: 10.1016/j.renene.2023.04.087.

3. Lachinov M. A., Motyaev M. A., Korolev P. E. Fasadnaya sistema s obliczovochny`mi panelyami iz fotoe`lektricheskix modulej : patent RU 2803030 C2, Rossijskaya Federaciya. — Opublikovan 05.09.2023.

4. Stølen R., Li T., Wingdahl T., Steen-Hansen A. Large- and Small-Scale Fire Test of a Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Façade System // Fire Safety Journal. — 2024. — Vol. 144. — Art. 104083. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.104083.

5. Shurshilin E. A., Olexnovich Ya. A. Vliyanie otkaza raboty` obliczovochny`x

panelej na teplotexnicheskie svojstva navesny`x ventiliruemy`x fasadny`x konstrukcij // Stroitel`stvo i texnogennaya bezopasnost`. — 2024. — № 32. — S. 55–62. — DOI: 10.29039/2413-1873-2024-32-55-62.

6. Pelle M., Gubert M., Dalla Maria E., Astigarraga A., Avesani S., Maturi L. Experimental Evaluation of the Temperature Related Behaviour of Pigment Based Coloured BIPV Modules Integrated in a Ventilated Façade // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 323. — Art. 114763. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114763.

7. Babin M., Andersen N. L., Thorning J. K., Thorsteinsson S. Yield Analysis of a BIPV Façade Prototype Installation // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 322. — Art. 114730. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114730.

8. Belloni E., Bianchini G., Casini M., Faba A., Intravaia M., Laudani A., Lozito G. M. An Overview on Building-Integrated Photovoltaics: Technological Solutions, Modeling, and Control // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 324. — Art. 114867. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114867.

9. Chen X., Luo C., Ji J., Liu L., Su X., Yu Y., Zhang H., Peng R. Experimental Investigation of Photoelectrical Performance and Thermal Characteristics of Ventilated Building-Integrated Photovoltaic System Utilizing Lightweight and Flexible Crystalline Silicon Module // Journal of Cleaner Production. — 2024. — Vol. 460. — Art. 142612. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142612.

10. Taranuxa N. L., Ananin K. Yu., Novikov M. Yu., Kanakov I. D. Razvitie domostroeniya s uchetom e`nergosberegayushhix texnologij – primeneniya gibridny`x sistem e`nergoe`ffektivnosti // Gradostroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — T. 15, № 3. — S. 72–82. — DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.10.

11. Albinius N., Rau B., Riedel M., Ulbrich C. A Comprehensive Case Study of a Full-Size BIPV Facade // Energies. — 2025. — Vol. 18, No. 5. — Art. 1293. — DOI: 10.3390/en18051293.

12. Ma X., Yang R. J., Bao D. W. Advancing Building-Integrated Photovoltaics: Solution for Facade Installation Challenges // International Journal of Construction Management. — 2025. — Опубликовано онлайн 17 декабря 2025 г. — DOI:

10.1080/15623599.2025.2595510.

13. Cuce P. M., Cuce E. Ventilated Facades for Low-Carbon Buildings: A Review // Processes. — 2025. — Vol. 13, No. 7. — Art. 2275. — DOI: 10.3390/pr13072275.

14. Pizzatto S. M. dos S. et al. Ventilated Facade System: A Review // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. — 2025. — Vol. 64, No. 3. — Art. 100443. — DOI: 10.1016/j.bsecv.2025.100443.

15. Ruan D., Fan C., Hu M., Li Y., Guan J. Building-Integrated Photovoltaics Through Multi-Physics Synergies: A Critical Review of Optical, Thermal, and Electrical Models in Facade Applications // Renewable Energy. — 2025. — Vol. 251. — Art. 123332. — DOI: 10.1016/j.renene.2025.123332.

16. Corti P., Follo A., Bonomo P. Workflow to Support Cost-Benefits Comparison and Sensitivity Analysis of BIPV Case Studies: Three Examples of BIPV Facades in the South of Switzerland // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 322. — Art. 114732. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114732.

17. Borja Block A., Escarre Palou J., Courtant M. et al. Colouring Solutions for Building Integrated Photovoltaic Modules: A Review // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 314. — Art. 114253. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114253.

18. Xu S., Wang X., Song Z., Tang Y., Ji J. Design, Experimental Testing, and Numerical Investigation of a Ventilated Semi-Transparent Photovoltaic Facade Integrated with Supply-Air Conditioning in Summer // Renewable Energy. — 2026. — Vol. 263. — Art. 125415. — DOI: 10.1016/j.renene.2026.125415.

19. Sabitov L. S., Volkov M. Yu. Optimizaciya vzaimodejstviya uchastnikov stroitel`nogo proekta pri ustrojstve navesny`x fasadny`x sistem // Stroitel`noe proizvodstvo. — 2025. — № 4. — Art. CP0009. — DOI: 10.29039/2658-5340-2025-4-CP0009.

20. Stankiuvienė A., Šukys R. Fire Performance of Ventilated Rendered Facades with EPS Insulation: Full-Scale DIN-Type Evaluation and Influence of Cavities on Flame Spread // Fire. — 2026. — Vol. 9, No. 3. — Art. 113. — DOI: 10.3390/fire9030113

Статья поступила в редакцию 27.05.2026; одобрена после рецензирования 06.07.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 27.05.2026; approved after peer review 06.07.2026; accepted for publication 08.10.2026.