УДК 72.012.6:621.311.243
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-226-233

БИПВ-ТЕХНОЛОГИИ (BIPV) В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ: ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ И ЭСТЕТИКА ФАСАДОВ

Н. Шулерова, Б.С. Кариев

Аннотация. Рассматриваются BIPV-технологии как направление современной архитектуры, в котором фотоэлектрические модули становятся частью строительной оболочки, а не внешним техническим дополнением. Основное внимание уделено фасадам, поскольку именно вертикальная плоскость наиболее явно соединяет инженерную функцию, энергогенерацию и художественный образ здания. Цель исследования – выявить, каким образом интегрированная фотоэлектрика влияет на функциональность, тектонику и эстетику фасадов. На основе анализа современных публикаций и международных материалов IEA PVPS выделены ключевые типы BIPV-решений: непрозрачные модули облицовки, полупрозрачное фотоэлектрическое стекло, цветные панели, двойные фасады и гибридные BIPV/T-системы. Показано, что архитектурная ценность BIPV зависит не только от энергетической эффективности, но и от качества деталировки, масштаба модулей, цветовой стратегии, обслуживания, пожарной безопасности и согласования с нормативными требованиями. Новизна статьи заключается в авторской матрице оценки BIPV-фасада, где энергетические, конструктивные и эстетические параметры рассматриваются как единая проектная задача.

Ключевые слова: BIPV; интегрированная фотоэлектрика; солнечный фасад; архитектурная оболочка; энергоэффективность; эстетика фасада; фотоэлектрическое стекло; устойчивое проектирование; нулевой энергетический баланс.

АЗЫРКЫ АРХИТЕКТУРАДАГЫ БИПВ -ТЕХНОЛОГИЯЛАР (BIPV): ФАСАДДАРДЫН ФУНКЦИОНАЛДУУЛУГУ ЖАНА ЭСТЕТИКАСЫ

Н. Шулерова, Б.С. Кариев

Аннотация. Макалада BIPV-технологиялар азыркы архитектуранын багыты катары каралат, мында фотоэлектрдик модулдар сырткы техникалык кошумча эмес, курулуш кабыгынын бир бөлүгү болуп калат. Негизги көңүл фасаддарга бурулган, анткени дал ушул вертикалдык тегиздик инженердик функцияны, энергия иштеп чыгууну жана имараттын көркөм образын абдан айкын байланыштырып турат. Изилдөөнүн максаты интеграцияланган фотоэлектрика фасаддардын функционалдуулугуна, тектоникасына жана эстетикасына кандайча таасир этерин аныктоо болуп саналат. Заманбап басылмаларды жана IEA PVPS эл аралык материалдарын талдоонун негизинде BIPV-чечимдеринин негизги түрлөрү: тунук эмес каптоочу модулдар, жарым-жартылай тунук фотоэлектрдик айнектер, түстүү панелдер, кош фасаддар жана гибриддик BIPV/T-системалары бөлүп көрсөтүлгөн. BIPVдин архитектуралык баалуулугу энергетикалык натыйжалуулуктан гана эмес, деталдаштыруунун сапатынан, модулдардын масштабынан, түс стратегиясынан, тейлөөдөн, өрт коопсуздугунан жана ченемдик талаптарга шайкеш келүүсүнөн да көз каранды экени көрсөтүлгөн. Макаланын жаңылыгы энергетикалык, конструктивдик жана эстетикалык параметрлер бирдиктүү долбоорлоо маселеси катары каралган BIPV-фасадын баалоонун автордук матрицасында турат.

Түйүндүү сөздөр: BIPV; интеграцияланган фотоэлектрика; күн фасады; архитектуралык кабык; энергия натыйжалуулугу; фасаддын эстетикасы; фотоэлектрдик айнек; туруктуу долбоорлоо; нөлдүк энергетикалык баланс.

BIPV TECHNOLOGIES IN CONTEMPORARY ARCHITECTURE: FUNCTIONALITY AND AESTHETICS OF FACADES

N. Shulerova, B.S. Kariev

Abstract. The article examines BIPV technologies as an architectural approach in which photovoltaic modules become part of the building envelope rather than an external technical addition. The focus is on facades because the vertical surface most clearly combines engineering performance, electricity generation and visual identity. The purpose of the study is to identify how integrated photovoltaics influence facade functionality, tectonics and aesthetics. Based on recent publications and IEA PVPS materials, the article distinguishes the main types of BIPV facade solutions: opaque cladding modules, semi-transparent photovoltaic glass, coloured panels, double-skin facades and hybrid BIPV/T systems. The architectural value of BIPV depends not only on energy output but also on detailing, module scale, colour strategy, maintenance, fire safety and compliance with regulatory requirements. The contribution of the article is an author's matrix for evaluating a BIPV facade as a single design task connecting energy, construction and aesthetic parameters.

Keywords: BIPV; building-integrated photovoltaics; solar facade; building envelope; energy efficiency; facade aesthetics; photovoltaic glass; sustainable design; net-zero energy building.

Введение. Фасад в современной архитектуре перестает быть только границей между интерьером и внешней средой. Он регулирует свет, тепло, вентиляцию, акустику, визуальное восприятие здания и все чаще участвует в производстве энергии. На этом пересечении появляется BIPV-building-integrated photovoltaics, или строительная интеграция фотоэлектрических модулей. В отличие от обычных солнечных панелей, закрепленных поверх готовой крыши или стены, BIPV заменяет часть строительного материала и одновременно выполняет энергетическую функцию.

Актуальность темы связана с ростом требований к низкоуглеродной архитектуре. Здания потребляют значительную долю энергии, а городские территории ограничены по площади, поэтому использование оболочки здания для локальной генерации становится особенно важным. Фасадные BIPV-системы позволяют включать солнечную энергетику в плотную городскую застройку, где кровля не всегда имеет достаточную площадь или правильную ориентацию.

Для архитектора BIPV представляет не только инженерную технологию, но и новый материал. Модуль имеет размер, цвет, фактуру, отражение, ритм швов и конструктивную глубину. Если эти свойства не учитываются на ранней стадии проектирования, фасад начинает выглядеть как техническая накладка. Если же фотоэлектрика включена в композицию здания с самого начала, она может стать частью архитектурного образа и одновременно повысить энергетическую автономность объекта.

Проблема исследования состоит в том, что BIPV часто оценивают либо как энергетическую систему, либо как внешний декоративный эффект. Такой разрыв мешает проектированию: энергетик стремится увеличить выработку, архитектор – сохранить образ, конструктор – обеспечить надежность, а заказчик – контролировать стоимость. Поэтому требуется рассматривать BIPV-фасад как комплексную систему, где функциональность и эстетика не противопоставляются, а согласуются в единой проектной логике.

Теоретические основы BIPV-фасадов. BIPV относится к тем технологиям, которые меняют само понимание строительной оболочки. Согласно современной научной трактовке, интегрированный фотоэлектрический элемент должен выполнять одну или несколько функций ограждающей конструкции: защищать от осадков, ветра и перегрева, участвовать в формировании фасада, обеспечивать светопропускание или затенение, а также генерировать электрическую энергию [1]. Это отличает BIPV от BAPV, где солнечная панель установлена поверх уже существующего строительного элемента.

Международная программа IEA PVPS Task 15 подчеркивает двойственную природу BIPV: это одновременно электротехнический продукт и строительный компонент [2]. Из-за этого для проектирования недостаточно стандартного подхода, принятого в солнечной энергетике. Необходимо учитывать пожарные требования, ветровые нагрузки, влажностный режим, долговечность креплений, заменяемость модулей, доступность обслуживания и совместимость с фасадной подсистемой.

В архитектурном отношении BIPV-фасад можно рассматривать как активную кожу здания (рисунок 1). Он не просто закрывает внутреннее пространство, а участвует в энергетическом обмене с городом. При этом его выразительность строится на повторяемости модулей, глубине швов, отражении неба, степени прозрачности и соотношении активных и неактивных участков (рисунок 2).

Материалы и методы исследования. Исследование выполнено на основе анализа научных обзоров 2021–2025 гг., материалов IEA PVPS Task 15, публикаций о цветных BIPV-модулях и экономической оценке интегрированной фотоэлектрики. Комплексные обзоры современного состояния BIPV показывают, что технология развивается одновременно как энергетическая система, строительный компонент и архитектурный материал [3]. Источники подбирались так, чтобы охватить три стороны темы: технологическую, архитектурную и эксплуатационно-экономическую.

Методика включала сравнительную классификацию фасадных BIPV-решений, выявление их функций и ограничений, а также формирование авторской матрицы оценки. Такой подход согласуется с многофакторной оценкой BIPV-установок, где система рассматривается одновременно как элемент здания и как генератор электроэнергии [4]. В качестве критериев использовались энергетическая роль, строительная функция, эстетическое влияние, сложность монтажа, требования к обслуживанию и потенциал применения в условиях солнечного климата Центральной Азии.

Отдельно рассматривалась проблема оригинальности архитектурного решения. BIPV не должен превращать разные здания в одинаковые темные стеклянные поверхности. Современные технологии цветной печати, полупрозрачного стекла и кастомизированных модулей дают возможность сохранять индивидуальность фасада, однако требуют более точного моделирования и координации между архитектором, инженером и производителем [5].

Функциональность BIPV-фасадов.

Первая функция BIPV-фасада – производство электроэнергии непосредственно на здании. Вертикальные модули обычно имеют меньшую годовую выработку по сравнению с оптимально ориентированной кровлей, но они могут работать эффективнее в утренние и вечерние часы, а также использовать большие площади высотных и общественных зданий. Для плотной городской среды это принципиально важно: энергетический потенциал переносится с земли на поверхность здания (рисунок 3).

Вторая функция – замещение традиционных фасадных материалов. BIPV-панель может работать как облицовка, часть навесного вентилируемого фасада, стеклопакет, солнцезащитный элемент, балюстрада или кровельный модуль (таблица 1). Экономическая логика такой системы строится не только на продаже или экономии электроэнергии, но и на том, что один элемент выполняет сразу несколько задач. Обзоры некоммерческих зданий показывают, что расчет BIPV только по прямой стоимости электроэнергии часто занижает реальную ценность системы [6].



Рисунок 1 – BIPV-фасад как активный элемент архитектурной оболочки



Рисунок 2 – Фрагмент BIPV-стекла и визуальная читаемость фотоэлектрического слоя

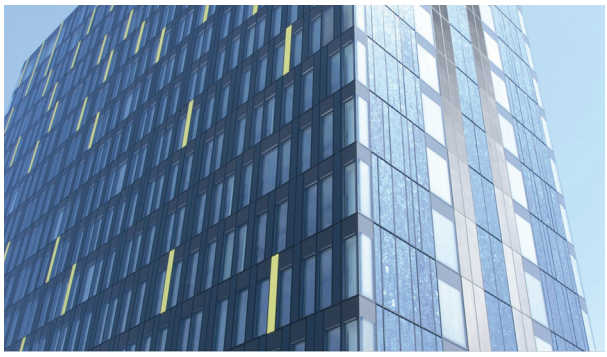


Рисунок 3 – Вертикальная интеграция фотоэлектрических модулей в высотный фасад



Рисунок 4 – Полупрозрачное фотоэлектрическое остекление в общественном здании

Таблица 1 – Основные типы BIPV-фасадов и их функции

Тип решения	Строительная функция	Архитектурный эффект
Непрозрачные панели облицовки	Замена фасадных кассет или плит	Ритм модулей, темная или цветная плоскость, технологический образ
Полупрозрачное PV-стекло	Остекление, затенение, частичная защита от перегрева	Игра света и тени, визуальная легкость, фильтрованный интерьерный свет
Цветные BIPV-модули	Облицовка с заданной цветовой палитрой	Адаптация к архитектурному контексту и снижение визуальной техничности
Двойной фасад с PV-слоем	Энергогенерация, вентиляционный зазор, защита от солнца	Глубина фасада, многослойность, выразительная технологическая тектоника
BIPV/T-система	Генерация электричества и отвод тепла	Инженерная интеграция, применимая для энергоактивных зданий

Третья функция – управление микроклиматом. Полупрозрачные модули могут снижать прямую солнечную радиацию, формировать тень и уменьшать перегрев помещений (рисунок 4). Однако эта функция требует точного баланса: слишком плотная раскладка фотоэлементов ухудшает естественное освещение, а слишком прозрачная – снижает выработку энергии. Поэтому фасад должен проектироваться через моделирование инсоляции, видимости, теплового режима и ожидаемой генерации.

Эстетика солнечной оболочки. Главный эстетический вопрос BIPV состоит в том, может ли энергетическая технология стать полноценным архитектурным материалом. Ранние фотоэлектрические фасады часто воспринимались как темные технические поверхности. Сегодня ситуация меняется: появляются цветные, матовые, полупрозрачные и текстурированные решения, которые позволяют работать с масштабом здания и контекстом улицы [5].

Эстетика BIPV зависит от трех уровней. *Первый уровень* – модуль: цвет, отражение, степень прозрачности, видимость ячеек. *Второй уровень* – фасадная система: размер кассет, швы, крепления, углы, примыкания к окнам и входам. *Третий уровень* – городской образ: как активная солнечная оболочка воспринимается с улицы, с расстояния и в разное время суток (рисунок 5).

Цветные BIPV-модули особенно важны для архитекторов, потому что они позволяют уменьшить конфликт между энергетикой и художественным замыслом. Обзоры эстетически ориентированных BIPV-систем для зданий с нулевым энергопотреблением также подчеркивают, что визуальная привлекательность становится одним из условий широкого внедрения технологии [7]. Однако цвет почти всегда связан с оптическими потерями: часть света отражается или поглощается для формирования



Рисунок 5 – Жилой фасад
с интегрированными солнечными панелями

Таблица 2 – Факторы эстетической интеграции BIPV в фасад

Фактор	Проектный вопрос	Риск при слабой проработке
Цвет и отражение	Соответствует ли модуль архитектурному образу и контексту	Фасад выглядит случайной технической вставкой
Модульная сетка	Совпадают ли размеры pv-панелей с ритмом окон и облицовки	Возникают дробные швы и визуальный шум
Деталировка	Скрыты ли крепления, продуманы ли углы и примыкания	Энергетическая система нарушает тектонику фасада
Прозрачность	Достаточно ли света и приемлем ли уровень затенения	Интерьер становится слишком темным или перегретым
Старение материала	Как фасад будет выглядеть через 10–20 лет	Неравномерное загрязнение и потеря визуального качества

нужного оттенка и не участвует в генерации. Поэтому задача проектирования заключается не в выборе «самого красивого» или «самого эффективного» варианта, а в поиске приемлемого баланса между визуальной интеграцией и энергетическим результатом (таблица 2).

Ограничения и проектные условия применения. Несмотря на технологическую зрелость, BIPV остается более сложным продуктом, чем обычная фасадная облицовка. Для него важны согласование электрических и строительных норм, пожарная безопасность, доступ к кабелям, контроль влаги, вентиляционный зазор, замена поврежденных модулей и ответственность участников проекта. Отчеты IEA PVPS указывают, что стандартизация и испытания BIPV остаются одной из ключевых тем развития рынка [8].

Другой барьер связан с междисциплинарностью. Архитектор, фасадный инженер, электрик, производитель стекла, подрядчик и заказчик должны принимать решения совместно, причем на ранней стадии. Если BIPV подключается к проекту слишком поздно, появляются компромиссы: нарушается сетка фасада, не хватает места для кабелей, усложняется обслуживание, а экономический расчет становится менее убедительным (рисунок 6).

Для городов с высокой солнечной активностью, включая Бишкек и другие города Центральной Азии, BIPV может быть особенно перспективен. Южные и юго-восточные фасады общественных зданий, учебных корпусов, торговых центров и офисов способны работать как энергоактивные поверхности. Однако требуется учитывать пыль, летний перегрев, необходимость обслуживания и возможное снижение эффективности при затенении соседней застройкой (таблица 3).



Рисунок 6 – Навесная фотоэлектрическая система на стене здания

Таблица 3 – Матрица оценки BIPV-фасада

Критерий	Что проверяется	Проектное значение
Энергетика	Ориентация, затенение, площадь активной поверхности, деградация	Обоснование ожидаемой генерации и окупаемости
Конструкция	Крепления, вентиляция, водоотвод, замена модулей	Надежная работа фасада как строительной системы
Пожарная безопасность	Кабели, материалы, проходки, доступ для обслуживания	Снижение рисков эксплуатации
Эстетика	Цвет, сетка, фактура, отражение, примыкания	Целостный архитектурный образ здания
Эксплуатация	Очистка, мониторинг, ремонт, доступ к инверторам	Сохранение эффективности и внешнего вида
Контекст	Климат, пыль, соседняя застройка, требования города	Адаптация технологии к местным условиям

Предложения по проектированию BIPV-фасадов.

Первое правило – включать BIPV в проект с концептуальной стадии. Тогда сетка модулей может совпасть с архитектурным ритмом, а инженерные решения не будут разрушать композицию фасада. В идеале солнечная оболочка должна проектироваться вместе с несущей схемой, оконными проемами, солнцезащитой и системой обслуживания.

Второе правило – выбирать технологию не по каталожной эффективности, а по месту в здании. Для глухих участков подходят непрозрачные панели, для атриумов и общественных пространств – полупрозрачное стекло, для исторического или деликатного контекста – цветные и матовые решения. Один и тот же модуль может быть удачным в промышленном здании и неуместным в культурном объекте.

Третье правило – заранее моделировать компромисс между цветом и выработкой. Чем сильнее модуль маскируется под традиционный материал, тем внимательнее нужно проверять потери. Эстетика не должна быть оправданием технически слабого решения, но и максимальная генерация не должна автоматически разрушать архитектурный образ.

Четвертое правило – проектировать обслуживание как часть фасада. Доступ к модулям, кабельным соединениям, инверторам и загрязняемым поверхностям должен быть понятен до строительства.

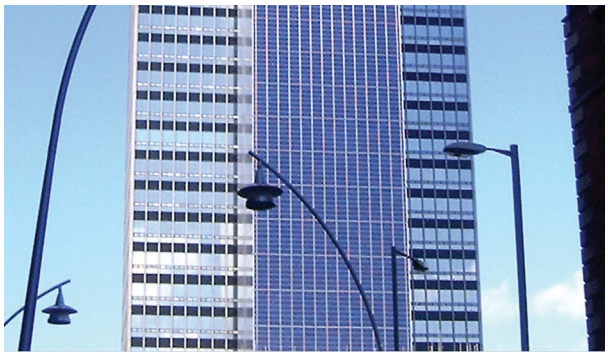


Рисунок 7 – Масштабное применение
солнечных модулей на оболочке здания

Для пыльного климата это особенно важно: ухудшение прозрачности и загрязнение поверхности напрямую влияют и на внешний вид, и на генерацию.

Пятое правило – использовать BIPV как образовательный и имиджевый элемент. В университетах, общественных зданиях и инновационных центрах фасад может показывать данные о выработке энергии, объяснять принцип работы системы и формировать культуру ответственного отношения к ресурсам (рисунок 7).

Заключение. BIPV-технологии меняют роль фасада в современной архитектуре. Фасад становится не только эстетической и защитной оболочкой, но и активной энергетической поверхностью. При грамотном проектировании фотоэлектрические модули способны заменить часть традиционных строительных материалов, снизить энергетическую нагрузку здания и сформировать выразительный технологический образ.

Функциональность BIPV-фасада проявляется в генерации электричества, солнцезащите, замещении облицовки, управлении светом и участии в общей стратегии устойчивого здания. Эстетика определяется цветом, фактурой, масштабом модулей, качеством деталировки и согласованием с архитектурным контекстом. Поэтому BIPV нельзя оценивать только через киловатт-часы: его ценность раскрывается на стыке энергетики, конструкции и художественного решения.

Для широкого применения BIPV необходимы стандартизация, междисциплинарная подготовка специалистов, раннее включение технологии в проект и адаптация к местному климату. Для Центральной Азии перспективны фасады общественных и образовательных зданий, где солнечная оболочка может одновременно работать как инженерная система, архитектурный акцент и инструмент экологического просвещения.

Поступила: 01.06.2026; рецензирована: 15.06.2026; принята: 17.06.2026.

Литература

1. *Faes A.* Building-integrated photovoltaics / A. Faes, A. Virtuani, H. Quest et al. // Nature Reviews Clean Technology. 2025. Vol. 1. P. 333–350. DOI: 10.1038/s44359-025-00059-9. URL: https://www.nature.com/articles/s44359-025-00059-9 (дата обращения: 30.04.2026).
2. IEA PVPS Task 15. Enabling Framework for the Development of BIPV. 2024-2027. URL: https://iea-pvps.org/research-tasks/enabling-framework-for-the-development-of-bipv/ (дата обращения: 30.04.2026).
3. *Bonomo P.* Comprehensive review and state of play in the use of photovoltaics in buildings / P. Bonomo, F. Frontini, R. Loonen, A.H.M.E. Reinders // Energy and Buildings. 2024. Vol. 323. Article 114737. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114737. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824008533 (дата обращения: 30.04.2026).
4. *Wilson H.R.* Multi-dimensional evaluation of BIPV installations: Development of a tool to assess the performance as building component and electricity generator / H.R. Wilson, F. Frontini, P. Bonomo et al. //

Energy and Buildings. 2024. Vol. 312. Article 114207. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114207. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824003232 (дата обращения: 30.04.2026).
5. *Pelle M.* Opaque Coloured Building Integrated Photovoltaic (BIPV): A Review of Models and Simulation Frameworks for Performance Optimisation / M. Pelle, F. Causone, L. Maturi, D. Moser // Energies. 2023. Vol. 16. № 4. Article 1991. DOI: 10.3390/en16041991. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1991 (дата обращения: 30.04.2026).
6. *Weerasinghe R.P.N.P.* Economic viability of building integrated photovoltaics: A review of forty-five non-domestic buildings in twelve western countries / R.P.N.P. Weerasinghe et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 137. Article 110622. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110622. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120309060 (дата обращения: 30.04.2026).
7. *Basher M.K.* Aesthetically Appealing Building Integrated Photovoltaic Systems for Net-Zero Energy Buildings: Current Status, Challenges, and Future Developments - A Review / M.K. Basher, M. Nur-E-Alam, M.M. Rahman et al. // Buildings. 2023. Vol. 13. № 4. Article 863. DOI: 10.3390/buildings13040863. URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/863 (дата обращения: 30.04.2026).
8. IEA PVPS Task 15. Advancing BIPV Standardization: Addressing Regulatory Gaps and Performance Challenges. Report T15-24:2024. URL: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/12/IEA-PVPS-T15-24-2024-EXEC-SUMM-BIPV-Standardization.pdf (дата обращения: 30.04.2026).