

Integration of solar photovoltaic systems into residential architecture: a bibliometric and practice-oriented analytical approach

L.R. Makhkamova*, D.A. Nazarova

Tashkent architecture and civil engineering university, Tashkent, Uzbekistan

*Corresponding author: laziza.ma@mail.com

Abstract. This article presents a combination of bibliometric analysis of scientific publications from 2010 to 2025 and a practical analysis of architectural and structural solutions for integrating solar photovoltaic systems (PV systems) into residential architecture. Based on the analysis of publication trends, leading authors, and key research topics, the main scientific trends in the field of BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) are identified. The practical section of the article explores architectural, structural, and regulatory aspects of design, as well as the challenges architects face when integrating PV systems into residential buildings. Specific architectural and regulatory recommendations are proposed to support the effective design of residential buildings with integrated photovoltaic systems, reduce technical barriers, and enhance the energy resilience of urban environments.

Keywords: photovoltaic systems, architecture, energy efficiency, design, solar panels, BIPV, sustainable development, solar energy, bibliometric analysis.

1. Введение

Современное общество сталкивается с глобальными вызовами, связанными с изменением климата, ростом цен на энергоносители и необходимостью устойчивого развития городской среды. В этих условиях энергетическая трансформация строительного сектора становится приоритетной задачей для многих стран, включая Узбекистан. Одним из ключевых решений в этом направлении является интеграция солнечных фотоэлектрических систем (ФЭС) в архитектуру жилых зданий.

ФЭС позволяют не только производить чистую энергию, но и снизить зависимость зданий от централизованных источников электроснабжения, что особенно актуально в условиях перегрузки существующих сетей. Кроме того, правильная интеграция солнечных панелей способствует улучшению энергетического баланса зданий, повышает их рыночную стоимость и способствует выполнению международных климатических обязательств.

Особый интерес в архитектурной практике представляет концепция BIPV (Building-Integrated Photovoltaics), при которой солнечные панели становятся неотъемлемой частью фасадов, кровель и других архитектурных элементов здания. Такой подход требует междисциплинарного проектирования, сочетающего архитектурные, инженерные, градостроительные и экологические аспекты.

Несмотря на актуальность темы, в проектной практике наблюдаются многочисленные барьеры: от отсутствия нормативных регламентов до нехватки проектных методик и практических рекомендаций для архитекторов. Особенно остро эта проблема стоит в странах с развивающейся нормативной базой и ограниченными финансово-экономическими механизмами поддержки ВИЭ.

Таким образом, данная статья направлена на выявление ключевых научных и практических аспектов интеграции ФЭС в жилую архитектуру. Объединяя библиометрический анализ с архитектурно-проектным опытом, она подчёркивает необходимость перехода от локально-го и неструктурированного использования солнечных панелей к системному включению ФЭС в архитектурную концепцию. Это требует соответствующих нормативов, профессиональной подготовки и междисциплинарного подхода. Такой взгляд позволяет обеспечить не только энергетическую эффективность зданий, но и устойчивость всей городской среды.

1.1. Архитектурно-конструктивные решения и практические проблемы интеграции ФЭС

Интеграция ФЭС в проект жилого здания требует продуманного архитектурно-конструктивного подхода с учётом ориентации крыши, угла наклона, несущей способности, зонирования инженерного оборудования и инсоляции [6]. В действующих проектах нередко встречаются перегруженные плоские крыши, хаотичное размещение инженерных систем и отсутствие технической зоны, пригодной для ФЭС. Важно учитывать размещение инверторов, кабельных трасс, вентиляции и лёгкий доступ к элементам обслуживания.

Кроме организации крыши, архитекторы должны учитывать взаимодействие между солнечными установками и другими инженерными системами здания, в том числе системами вентиляции, водоотведения, кондиционирования и пожарной безопасности. Часто в проектной документации отсутствует чёткое распределение функциональных зон на кровле, что делает размещение ФЭС затруднительным. Согласованное проектирование всех инженерных подсистем позволяет не

только оптимизировать техническое решение, но и улучшить эстетическое восприятие здания.

Особое внимание следует уделять расчёту несущей способности кровли. Используемые материалы, тип перекрытия и региональные ветровые и снеговые нагрузки должны быть учтены ещё до принятия проектных решений. Ошибки на этом этапе могут привести к отказу от установки солнечных панелей или к их неэффективной работе. Кроме того, конструкции крепления панелей должны быть адаптированы к различным кровельным материалам (металл, бетон, мягкая кровля) и соответствовать требованиям по водонепроницаемости ивиброустойчивости.

При проектировании необходимо предусматривать южную или юго-западную ориентацию скатов с углом наклона 30–35°. При невозможности соблюдения этих параметров следует применять компенсирующие меры: использование регулируемых конструкций или оптимизация угла наклона с помощью надстроек. В зданиях с плоской крышей рекомендуется заранее закладывать технические коридоры и зонирование [7]. Важно учитывать возможное затенение от соседних зданий, деревьев и надстроек, используя инструменты анализа инсоляции и теней.

Использование инструментов моделирования (например, EDGE) позволяет спрогнозировать эффективность решений на этапе эскизного проектирования. Такие инструменты дают возможность оценить энергоэффективность, водопотребление, стоимость и материалоёмкость здания, и внести корректировки в проект ещё до начала строительства. Это особенно важно для зданий, где экономическая целесообразность играет ключевую роль в принятии решений о внедрении ФЭС. Сочетание профессионального проектного подхода с цифровыми методами позволяет добиваться высокого качества проектных решений, соответствующих как экологическим стандартам, так и ожиданиям пользователей.

Анализ проектных решений, выполненных автором, позволяет наглядно продемонстрировать архитектурные и технические особенности размещения солнечных панелей на различных типах кровель. На рисунке 1 представлены примеры крыш с благоприятными условиями для интеграции ФЭС — удобной ориентацией, оптимальным углом наклона и достаточной площадью без затенения и инженерных препятствий. На таких объектах установка панелей выполнялась эффективно и без необходимости переработки проектных решений.

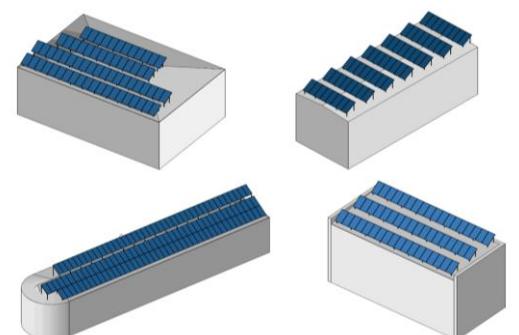


Рисунок 1. Примеры крыш, пригодных для установки ФЭС (авторская иллюстрация)

На рисунке 2 показаны кровли, имевшие конструктивные или планировочные ограничения: неудобную ориентацию, ограниченное пространство, наличие слуховых окон, создающих тень, или фрагментарные наклонные участки. В этих случаях потребовались дополнительные инженерные меры: частичный отказ от модулей, перераспределение массивов панелей или использование нестандартных креплений. Примеры иллюстрируют необходимость предварительного анализа пригодности крыши под ФЭС уже на стадии архитектурной концепции.

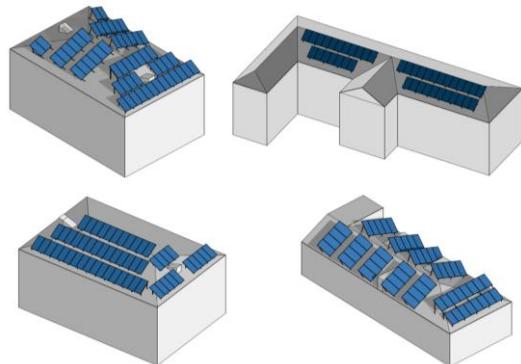


Рисунок 2. Примеры крыш, с затрудненными условиями для установки ФЭС (авторская иллюстрация)

1.2. Нормативное регулирование и государственные инициативы

Интеграция солнечных энергетических технологий в архитектуру требует не только архитектурной готовности зданий, но и поддержки на уровне государственной политики. В Узбекистане эта сфера начала формироваться сравнительно недавно. Одним из первых серьёзных шагов стало Постановление Президента №ПП-57 от 16.02.2023 [8], предписывающее использовать не менее 50% площади кровель новых многоквартирных домов под солнечные панели. Это свидетельствует о признании важности возобновляемых источников энергии на государственном уровне. Однако реальная практика показывает, что между декларацией и реализацией существует значительный разрыв.

Несмотря на принятые государственные решения и стратегические документы, внедрение фотоэлектрических систем в жилую архитектуру Узбекистана по-прежнему сопровождается рядом серьёзных проблем. Одной из главных остаётся недостаточная профессиональная подготовка архитекторов и инженеров: в стране ощущается нехватка образовательных программ, методических материалов и специализированных курсов, которые могли бы обеспечить специалистов необходимыми знаниями.

Финансовый аспект также вызывает затруднения — несмотря на наличие субсидий и льготных кредитов, они охватывают лишь ограниченное число проектов. Особенно сложно частным застройщикам и региональным девелоперам, для которых установка солнечных панелей представляется избыточными расходами. Кроме того, на внутреннем рынке ощущается дефицит оборудования: сертифицированных инверторов, креплений и BIPV-модулей мало, и импортные решения

не всегда соответствуют условиям местного климата и строительства.

Нередко требования нормативных документов исполняются формально: панели размещаются без учёта инсоляции, параметров кровли и удобства обслуживания. Это снижает эффективность систем и формирует недоверие со стороны проектировщиков. Ситуацию осложняет отсутствие скординированного взаимодействия между государственными органами — процедура согласования остаётся сложной и непрозрачной, а дублирующие функции ведомств замедляют развитие сектора.

Дополнительные трудности связаны с разнообразными природно-климатическими условиями в разных регионах страны. Так, например, в горных районах или зонах с обильными снегопадами необходимы специальные проектные решения, учитывающие повышенные ветровые и сугробовые нагрузки. Однако на практике такие особенности часто игнорируются на стадии проектирования. Всё это подчёркивает важность системного подхода, который объединяет международный опыт с учётом местных реалий и позволяет сформировать надёжную основу для нормативного, образовательного и проектного обеспечения внедрения солнечных технологий.

Между тем международный опыт даёт примеры последовательной, системной интеграции солнечных систем в архитектурную и градостроительную практику. В Германии, Калифорнии, Великобритании, Японии и других странах внедрение ФЭС базируется на чётко сформулированных строительных регламентах, которые регламентируют не только технические параметры кровли, но и обеспечивают наличие свободных технических зон, требуемого уровня инсоляции, параметров уклона и ориентации [9,10].

Помимо нормативов, важную роль играют механизмы стимулирования: налоговые послабления, субсидии на проектирование и оборудование, ускоренные процедуры получения разрешений. Эти меры формируют не только экономическую, но и психологическую привлекательность технологии. Более того, развитие цифровых инструментов проектирования (BIM, инсоляционные анализы, каталоги решений) делает возможным массовое применение стандартизованных и эффективных решений, что в свою очередь способствует реальной, а не формальной интеграции ФЭС. Таким образом, международный опыт показывает: только в сочетании нормативного, методического и мотивационного компонентов возможно формирование устойчивой архитектурной среды, готовой к переходу на солнечную энергетику.

2. Материалы и методы

Анализ публикаций в базе данных Scopus за 2010–2025 годы показывает устойчивый рост интереса к теме интеграции фотоэлектрических систем (ФЭС) в жилую архитектуру [1]. Всего за этот период было выявлено и проанализировано 1587 научных публикаций, охватывающих широкий спектр дисциплин — от архитектурного проектирования и инженерных решений до урбанистики, устойчивого развития и экологического моделирования (рисунок 3). Это свидетельствует о высоком уровне

междисциплинарной вовлечённости исследователей в данную тему. Особенно активно исследования развивались в последние три года: с 2022 года количество публикаций резко увеличилось, а пик научной активности пришёлся на 2024 год, когда было опубликовано более 200 статей. Такой рост говорит не только о возрастающем научном интересе, но и о прикладной значимости BIPV-технологий в условиях глобальной энергетической трансформации.

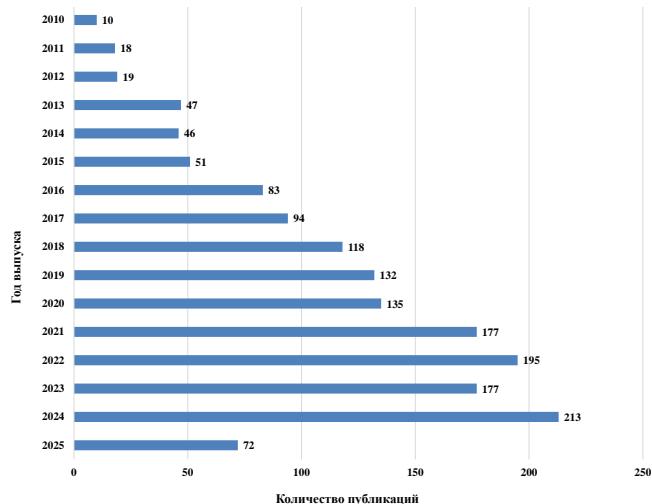


Рисунок 3. Количество публикаций по интеграции фотоэлектрических систем в жилую архитектуру по годам публикации

Среди ведущих авторов, внёсших значительный вклад в формирование исследовательской повестки, можно выделить Koo C., Hong T., Krarti M. [2], а также Pearce J.M., Jeong K., Best R. и других (рисунок 4). Их публикации охватывают широкий спектр тем — от BIM-моделирования BIPV-решений до анализа энергоэффективности и эстетики фасадной интеграции. Географически исследования охватывают такие страны, как США, Китай, Австралия, Великобритания, Италия и Индия, что подчёркивает глобальный масштаб и универсальность исследуемой проблематики (рисунок 5) [3]. При этом каждая из стран предлагает свой подход к интеграции ВИЭ в архитектурную среду, что обогащает теоретическую и практическую базу знаний.

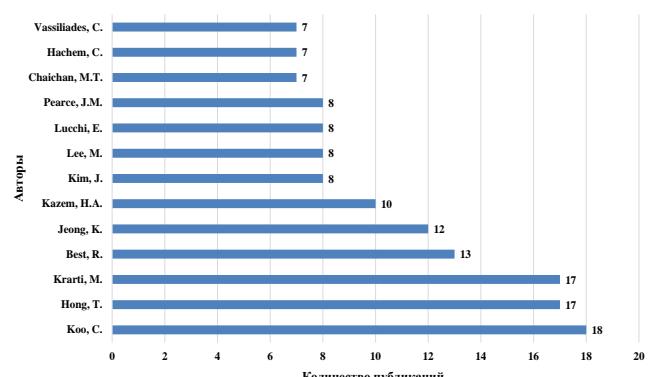


Рисунок 4. Список ведущих авторов, публикавших работы по теме интеграции фотоэлектрических систем в жилую архитектуру

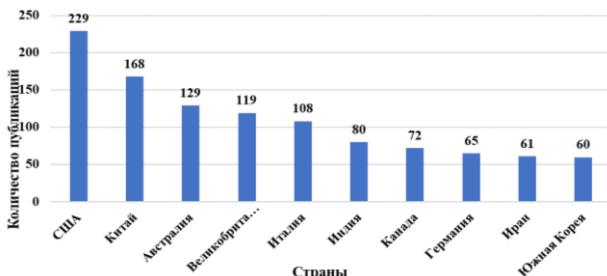


Рисунок 5. Схема международного сотрудничества

Публикации размещены преимущественно в высокорейтинговых журналах, таких как Applied Energy, Renewable Energy, Energy and Buildings, Sustainability, Journal of Building Engineering и других, входящих в топ мировых изданий по устойчивому строительству и архитектурной инженерии (рисунок 6). Тематические статьи охватывают ключевые аспекты BIPV — архитектурную интеграцию, энергоанализику, инженерные решения, визуальное восприятие фасадов, цифровое проектирование, правовое регулирование, а также барьеры внедрения и общественное восприятие [4,5].

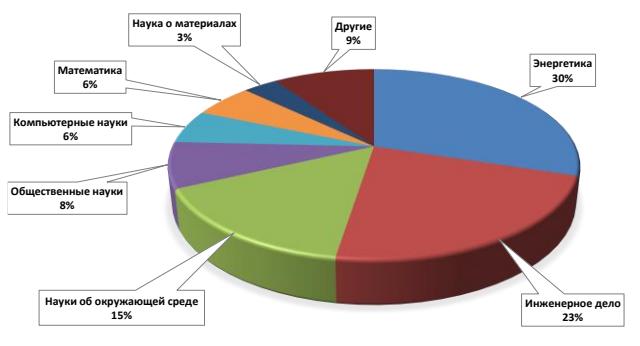


Рисунок 6. Список журналов, публиковавших работы по теме интеграции фотоэлектрических систем в жилую архитектуру

Таким образом, библиометрический анализ подтверждает не только высокий уровень научной активности, но и сформировавшийся устойчивый международный интерес к системной интеграции солнечных технологий в архитектуру. Это подчёркивает актуальность дальнейших прикладных исследований, особенно в контексте адаптации мировых практик к условиям развивающихся стран.

3. Результаты и обсуждение

Для устранения ключевых ограничений и противоречий, выявленных в ходе анализа проектной, нормативной и организационной практики в Узбекистане, необходимо перейти от фрагментарных решений к целостной государственной политике в области архитектурной интеграции солнечных фотоэлектрических систем. Такая трансформация требует как актуализации действующих регламентов, так и системной методической, технической и образовательной поддержки всех участников проектного процесса. В данной статье предлагается комплекс конкретных рекомендаций, ориентированных на условия Узбекистана, направленных на формирование профессиональной среды, благоприятной для эффективного внедрения ФЭС в жилую застройку.

Предлагаемые меры базируются на обобщении международного и локального опыта и могут служить практическим ориентиром для государственных органов, проектных институтов и образовательных учреждений:

- Разработать национальные архитектурные и конструктивные стандарты, учитывающие расчёт несущей способности кровель, допустимый уровень затенения, параметры ориентации и уклона для солнечных панелей;
- Ввести обязательные требования к инсоляции и зонированию кровель с выделением специальных технических зон под ФЭС и инженерные коммуникации;
- Стимулировать использование цифровых инструментов моделирования (таких как EDGE или BIM) уже на стадии эскизного проектирования, позволяя заранее оценивать эффективность проектных решений;
- Сформировать платформу междисциплинарного взаимодействия между архитекторами, конструкторами, инженерами и застройщиками, включая разработку единых методик и стандартов;
- Подготовить и внедрить каталог типовых архитектурных решений по интеграции ФЭС в различные типы жилых зданий с учётом климатических условий Узбекистана, архитектурного контекста и строительных ограничений;
- Включить положения о приоритетной установке ФЭС в регламенты территориального планирования, генеральные планы и нормативные документы по проектированию новых жилых микрорайонов;
- Поддерживать обучение и повышение квалификации архитекторов, инженеров и преподавателей вузов в сфере энергоэффективного проектирования и возобновляемых источников энергии.

Внедрение данных рекомендаций создаст основу для перехода от поверхностного соблюдения нормативов к всесторонне проработанной, профессионально поддержанной и гармонично интегрированной в архитектуру системе применения солнечных технологий в жилом строительстве Узбекистана.

4. Выводы

Проведённый анализ показал, что интеграция солнечных фотоэлектрических систем в жилую архитектуру является не только актуальной задачей, но и стратегическим направлением устойчивого проектирования, способным существенно изменить практику градостроительного развития. Несмотря на позитивные шаги в области нормативного регулирования, реальная проектная и строительная практика демонстрирует наличие значительных ограничений — от отсутствия методических документов до нехватки координации между участниками проектного процесса.

Библиометрический обзор подтвердил, что научное сообщество активно исследует тему BIPV, предлагая разнообразные технологические, архитектурные и экологические подходы, что подчёркивает высокий потенциал этой области. В то же время практический анализ выявил, что без системного подхода — начиная с ранних этапов проектирования и заканчивая реализацией на стройплощадке — использование ФЭС остаётся ограниченным и фрагментарным.

Таким образом, успешная реализация интеграции ФЭС в жилую архитектуру требует пересмотра сущ-

ствующих проектных процедур. Необходим переход к комплексной модели, в которой нормативные рамки, технические решения и образовательная поддержка будут формировать единую, согласованную систему. Только в этом случае солнечные технологии смогут органично войти в структуру жилой застройки и стать основой для формирования энергоэффективной и экологически устойчивой архитектурной среды.

Благодарность

Авторы выражают глубокую признательность компании ООО «Mir Solar» за всестороннюю поддержку, профессиональную среду и уникальные условия для практического участия в проектах по солнечной энергетике. Компания, в которой один из авторов работает с 2016 года, стала одним из пионеров в развитии возобновляемой энергетики в Узбекистане. Благодаря накопленному опыту, стремлению к инновациям и вкладу в развитие отрасли, ООО «Mir Solar» сыграла ключевую роль в формировании практических и исследовательских оснований для настоящей публикации.

References / Литература

- [1] Makhkamova, L.R. (2025). Integratsiya solnechnykh fotoelektricheskikh sistem v zhilyyu arkitekturu: bibliometricheskiy obzor po 2010–2025 godam. *Central Asian Journal of STEM*, 1(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1549367>
- [2] Koo, C., Hong, T. & Krarti, M. (2023). A study on decision-making process for building-integrated photovoltaics design using BIM. *Energy and Buildings*, 285, 112853
- [3] McCarty, J. et al. (2025). Mapping bibliometric trends in sustainable building design research (2010–2023). *Building and Environment*, 241, 110708
- [4] Chen, L. et al. (2024). Aesthetic integration of BIPV into building façades: Challenges and innovations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 252, 112145
- [5] Zhang, Y. et al. (2025). Visual performance and energy output of colored BIPV modules for residential architecture. *Journal of Building Engineering*, 80, 108429
- [6] Makhkamova, L.R. (2025). Integratsiya solnechnykh fotoelektricheskikh sistem v arkitekturnoe proektirovanie zhilykh zdaniy: problemy i perspektivy. *Central Asian Journal of STEM*, 1(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15493785>
- [7] Makhkamov, T.A. & Makhkamova, L.R. (2023). Proektirovanie chastnykh domov s uchaytom VIE.
- [8] Prezident Respubliki Uzbekistan. (2023). Postanovlenie № PP-57
- [9] Gazeta.uz. (2023). Programma «Solnechnyy dom». Retrieved from: <https://www.gazeta.uz/ru/2023/05/10/solar/>
- [10] Vassileva, A. (2022). Rooftop solar to become mandatory in German states in 2023. Retrieved from: [Renewablesnow.com](https://renewablesnow.com)
- [11] International Finance Corporation. (2021). EDGE User Guide. Retrieved from: <https://edgebuildings.com>

Тұрғын архитектурасына күн фотоэлектрлік жүйелерін біріктіру: библиометриялық және практикалық-талдамалық тәсіл

Л.Р. Махкамова*, Д.А. Назарова

Ташкент сәулет-құрылымдық университеті, Ташкент, Өзбекістан

*Корреспонденция үшін автор: laziza.ma@mail.com

Аннотация. Бұл мақала 2010–2025 жылдар аралығындағы ғылыми жарияланымдарға библиометриялық талдау мен күн фотоэлектрлік жүйелерін (ФЭЖ) тұрғын архитектурасына біріктіру бойынша архитектуралық-конструктивтік шешімдердің қолданбалы талдауды ұштастырады. Жарияланым белсенділігіне, жетекші авторлар мен зерттеу тақырыптарына жасалған талдау негізінде BIPV (ғимараттарға күн панельдерін біріктіру) саласындағы негізгі ғылыми үрдістер айқындалды. Мақаланың практикалық бөлімінде жобалаудың архитектуралық, конструктивтік және нормативтік аспекттері, сондай-ақ архитектуралық жобаларда ФЭЖ-ді енгізу кезінде туындастырылады. Тұрғын үйлердің күн панельдерімен тиімді жобалау, техникалық тосқауылдарды азайту және қалалық құрылымының энергия тұрақтылығын арттыру мақсатында накты архитектуралық және нормативтік ұсынымдар ұсынылған.

Негізгі сөздер: фотоэлектрлік жүйелер, сәулет, энергия тиімділігі, жобалау, күн панельдері, BIPV, тұрақты да-му, күн энергиясы, библиометриялық талдау.

Интеграция солнечных фотоэлектрических систем в жилую архитектуру: библиометрический и практико-аналитический подход

Л.Р. Махкамова*, Д.А. Назарова

Ташкентский архитектурно-строительный университет, Ташкент, Узбекистан

*Автор для корреспонденции: laziza.ma@mail.com

Аннотация. Статья представляет собой сочетание библиометрического анализа научных публикаций за 2010–2025 годы и прикладного анализа архитектурно-конструктивных решений по интеграции солнечных фотоэлектрических

систем (ФЭС) в жилую архитектуру. На основе анализа публикационной активности, ведущих авторов и исследовательских тем выявлены основные научные тенденции в области BIPV (интеграция солнечных панелей в здания). В практической части статьи рассматриваются архитектурные, конструктивные и нормативные аспекты проектирования, а также барьеры, с которыми сталкиваются архитекторы при интеграции ФЭС в жилые здания. Предложены конкретные архитектурные и нормативные рекомендации, направленные на эффективное проектирование жилых зданий с учётом интеграции фотоэлектрических систем, минимизации технических барьеров и повышения энергоустойчивости городской застройки.

Ключевые слова: *фотоэлектрические системы, архитектура, энергоэффективность, проектирование, солнечные панели, BIPV, устойчивое развитие, солнечная энергия, библиометрический анализ.*

Received: 11 March 2025

Accepted: 15 June 2025

Available online: 30 June 2025