

Урбанистика и городские системы <https://ugsjournal.ru>

Urban Studies and Urban Systems

2025, Том 2, № 1 / 2025, Vol. 2, Iss. 1 <https://ugsjournal.ru/issue-1-2025.html>

URL статьи: <https://ugsjournal.ru/PDF/02SAUG125.pdf>

2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности

Ссылка для цитирования этой статьи:

Аль Рабади, Р. Б. Е. Наноматериалы в подвижных фасадных системах: архитектурный и технологический потенциал / Р. Б. Е. Аль Рабади // Урбанистика и городские системы. — 2025. — Т. 2. — № 1. — URL: <https://ugsjournal.ru/PDF/02SAUG125.pdf>.

For citation:

Al-Rabadi R.B.E. Nanomaterials in Movable Façade Systems: Architectural and Technological Potential. *Urban Studies and Urban Systems*. 2025;2(1): 02SAUG125. Available at: <https://ugsjournal.ru/PDF/02SAUG125.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 691+539.2

Аль Рабади Рана Башир Еид

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Аспирант

1042235145@pfur.ru

Наноматериалы в подвижных фасадных системах: архитектурный и технологический потенциал

Аннотация. В статье рассматривается потенциал применения наноматериалов в подвижных фасадных системах как одного из ключевых направлений развития современной архитектуры и строительных технологий. Подвижные фасады анализируются как адаптивные оболочки здания, способные изменять свои свойства в зависимости от климатических, световых и эксплуатационных условий. Особое внимание уделяется роли наноматериалов в повышении энергоэффективности, долговечности и функциональной гибкости фасадных конструкций.

В работе рассматриваются основные типы наноматериалов, применяемых в фасадных системах, включая нанопористые теплоизоляционные материалы, нанокompозитные покрытия, электрохромные и фотохромные стёкла, а также наноструктурированные защитные слои. Анализируется их влияние на теплопередачу, светопропускание, самоочищающиеся свойства и устойчивость фасадов к внешним воздействиям.

Подвижные фасадные системы рассматриваются как архитектурный инструмент формирования адаптивной оболочки здания, обеспечивающей баланс между энергетической эффективностью, визуальным комфортом и архитектурной выразительностью. Отдельное внимание уделяется применению таких систем в жилой архитектуре как одном из наиболее чувствительных типов застройки с точки зрения микроклимата и качества среды проживания.

Сделан вывод о том, что интеграция наноматериалов в подвижные фасадные системы формирует новую парадигму проектирования фасадов, в которой архитектурная оболочка перестаёт быть статичным элементом и превращается в активный компонент взаимодействия здания с окружающей средой. Полученные результаты могут быть использованы в архитектурном проектировании, инженерных разработках и дальнейших исследованиях в области устойчивой архитектуры.

Ключевые слова: наноматериалы; подвижные фасады; адаптивные фасадные системы; архитектурная оболочка; энергоэффективность зданий; нанопокртия; смарт-материалы; фасадные технологии; жилая архитектура; устойчивое строительство

Введение

В условиях глобального перехода к устойчивому развитию архитектура всё в большей степени ориентируется на повышение энергетической эффективности зданий, снижение их экологического воздействия и улучшение качества внутренней среды. Фасад здания в этом контексте перестаёт рассматриваться исключительно как ограждающая конструкция и приобретает статус активной архитектурно-технологической системы, способной регулировать взаимодействие между внешней средой и внутренним пространством.

Одним из наиболее перспективных направлений развития фасадных технологий являются подвижные фасадные системы. В отличие от традиционных статичных фасадов, такие системы обладают способностью адаптироваться к изменениям климатических условий, уровня инсоляции, температуры и эксплуатационных требований. Подвижные фасады позволяют динамически управлять светопропусканием, теплопередачей и визуальной проницаемостью оболочки здания, что существенно расширяет архитектурные и функциональные возможности фасадов.

Параллельно с развитием адаптивных фасадных систем активно развивается направление наноматериалов в строительстве. Наноматериалы характеризуются уникальными физико-химическими свойствами, недостижимыми для традиционных строительных материалов, включая повышенную прочность, малую толщину, улучшенные теплоизоляционные характеристики, самоочищающиеся и фотокаталитические свойства, а также способность изменять оптические и тепловые параметры в зависимости от внешних воздействий. В совокупности это делает наноматериалы особенно перспективными для применения в фасадных конструкциях.

Интеграция наноматериалов в подвижные фасадные системы формирует качественно новый этап развития архитектурной оболочки здания. Фасад перестаёт быть пассивным элементом и превращается в активный интерфейс между архитектурой и окружающей средой. При этом наноматериалы обеспечивают не только повышение эксплуатационных характеристик фасадов, но и расширяют возможности архитектурного формообразования, позволяя создавать более лёгкие, тонкие и функционально сложные фасадные структуры.

Несмотря на растущий интерес к данной тематике, в научных исследованиях наноматериалы и подвижные фасадные системы нередко рассматриваются раздельно: либо в контексте материаловедения, либо в рамках инженерных фасадных решений. В то же время их комплексное рассмотрение как единой архитектурно-технологической системы остаётся недостаточно систематизированным, особенно с точки зрения архитектурной теории и проектной практики.

Важное значение данная проблематика приобретает для жилой архитектуры, где требования к микроклимату, визуальному комфорту и энергоэффективности особенно высоки. Подвижные фасады с применением наноматериалов позволяют не только снижать энергопотребление зданий, но и формировать более комфортную и адаптивную жилую среду, отвечающую современным социальным и экологическим требованиям.

В связи с этим возникает необходимость комплексного анализа роли наноматериалов в подвижных фасадных системах с учётом их архитектурного, технологического и экологического потенциала.

Целью настоящего исследования является анализ возможностей применения наноматериалов в подвижных фасадных системах и определение их влияния на формирование архитектурной оболочки здания.

Для достижения поставленной цели в статье предполагается решение следующих задач:

- рассмотреть основные типы наноматериалов, применяемых в фасадных системах;
- проанализировать конструктивные и функциональные особенности подвижных фасадов;
- выявить архитектурные и энергетические преимущества интеграции наноматериалов в фасадные оболочки;
- определить роль подвижных фасадных систем в формировании устойчивой и адаптивной архитектуры, в том числе в жилых зданиях.

Методологическую основу исследования составляют анализ научных публикаций, сравнительно-типологический подход и системное рассмотрение фасадных технологий в контексте современной архитектурной практики.

Материалы и методы

Развитие нанотехнологий в конце XX — начале XXI века оказало существенное влияние на трансформацию строительных материалов и архитектурных технологий. Наноматериалы представляют собой материалы, структурные элементы которых имеют размеры порядка нанометров, что определяет их принципиально иные физические, механические, тепловые и оптические свойства по сравнению с традиционными строительными материалами. В архитектуре данные материалы рассматриваются не только как средство повышения эксплуатационных характеристик конструкций, но и как фактор изменения самой концепции архитектурной оболочки здания.

В строительной практике наноматериалы применяются в виде нанодобавок к бетонам, нанокompозитов, нанопокрытий, нанопористых теплоизоляционных материалов, а также функциональных стеклянных систем. Их использование позволяет повысить прочность, износостойкость, устойчивость к воздействию влаги, ультрафиолетового излучения и температурных колебаний, а также увеличить долговечность строительных конструкций [1; 2]. Одновременно с этим наноматериалы способствуют снижению массы элементов и оптимизации их геометрических параметров, что особенно важно для современных фасадных систем.

Одним из наиболее перспективных направлений является применение нанопористых теплоизоляционных материалов, в частности аэрогелей. Благодаря крайне низкой теплопроводности при минимальной толщине слоя такие материалы позволяют существенно уменьшать толщину ограждающих конструкций без потери теплоизоляционных свойств. Это открывает новые возможности для архитектурного формообразования, в котором фасад приобретает большую визуальную лёгкость и пластичность [3; 4].

Нанокompозитные материалы обеспечивают сочетание высокой прочности и малой массы, что расширяет возможности их применения в конструкциях с повышенными требованиями к подвижности и трансформируемости. За счёт включения наночастиц в полимерные, стеклянные и металлические матрицы достигается повышение устойчивости к механическим нагрузкам, коррозии и усталостным деформациям. Данные свойства делают нанокompозиты особенно перспективными для использования в элементах адаптивных фасадных систем [5; 6].

Особую группу составляют функциональные нанопокрывтия, применяемые в фасадных конструкциях. К ним относятся самоочищающиеся, фотокаталитические, антибактериальные и водоотталкивающие покрытия. Самоочищающиеся поверхности позволяют значительно снизить уровень загрязнения фасадов и сократить затраты на их обслуживание, что имеет важное значение для высотной и плотной городской застройки [7]. Фотокаталитические покрытия дополнительно способствуют разложению органических загрязнителей под воздействием солнечного излучения, улучшая экологические характеристики городской среды.

В архитектурной практике всё большее распространение получают электрохромные, термохромные и фотохромные стеклянные системы, основанные на наноструктурированных слоях. Эти материалы позволяют изменять степень прозрачности и светопропускания фасада в зависимости от внешних условий или электрического воздействия, обеспечивая динамическое регулирование световой среды внутри здания [8-10]. В результате стеклянные фасады перестают быть пассивным элементом оболочки и становятся активным инструментом управления микроклиматом.

Следует отметить, что внедрение наноматериалов оказывает влияние не только на технические характеристики фасада, но и на архитектурный образ здания. Использование тонких, полупрозрачных и функционально активных материалов формирует новый тип фасадной пластики, в которой визуальная лёгкость сочетается с высокой технологической насыщенностью. Фасад приобретает свойства динамичной и многослойной оболочки, способной изменять своё восприятие в зависимости от условий освещения и угла обзора.

С точки зрения архитектурной теории наноматериалы способствуют переходу от традиционного понимания фасада как ограждающей конструкции к восприятию его как интерфейса между зданием и окружающей средой. Такой интерфейс не только защищает внутреннее пространство, но и активно участвует в формировании микроклимата, световой среды и визуального взаимодействия с городским пространством [3].

В контексте устойчивого развития наноматериалы позволяют существенно снизить энергопотребление зданий за счёт улучшения теплоизоляционных и свето-регулирующих свойств фасадов. Это особенно актуально в условиях роста энергетических затрат и ужесточения экологических нормативов. Одновременно с этим применение наноматериалов способствует увеличению срока службы фасадных конструкций и снижению эксплуатационных расходов [5].

Вместе с тем использование наноматериалов в строительстве связано с рядом проблемных аспектов, включая вопросы экологической безопасности, переработки и утилизации, а также потенциального воздействия наночастиц на здоровье человека и окружающую среду. В связи с этим внедрение наноматериалов требует комплексной оценки их жизненного цикла и научно обоснованного регулирования [3].

Наибольший архитектурный потенциал наноматериалы проявляют в сочетании с адаптивными архитектурными системами, в которых их функциональные свойства используются максимально полно. Подвижные фасадные системы являются одной из ключевых сфер применения наноматериалов, поскольку требуют одновременно лёгкости, прочности, долговечности и функциональной гибкости фасадных элементов.

Таким образом, наноматериалы формируют материально-технологическую основу для перехода от статичной архитектуры к архитектуре адаптивной, в которой фасад рассматривается как активный элемент взаимодействия здания с окружающей средой. Данный подход создаёт предпосылки для дальнейшего анализа подвижных фасадных систем как одного из наиболее перспективных направлений применения наноматериалов в современной архитектуре.

Результаты и обсуждения

Подвижные фасадные системы в современной архитектуре рассматриваются как один из ключевых инструментов формирования адаптивной оболочки здания. В отличие от традиционных статичных фасадов, такие системы обладают способностью изменять своё положение, конфигурацию или физические характеристики в зависимости от внешних и внутренних условий эксплуатации. Это позволяет рассматривать фасад не как фиксированную конструкцию, а как динамическую архитектурно-технологическую систему.

С архитектурной точки зрения подвижный фасад формирует новый тип взаимодействия между зданием и окружающей средой. Фасад перестаёт быть исключительно границей и приобретает функцию активного медиативного слоя, регулирующего световые, тепловые и визуальные потоки. В результате архитектурная оболочка становится частью климатической, функциональной и композиционной структуры здания.

Типологически подвижные фасадные системы можно разделить на несколько основных групп. *Первая группа* включает механически подвижные элементы: поворотные, раздвижные, складные и подъёмно-опускные панели. Такие элементы позволяют физически изменять конфигурацию фасада, регулируя степень затенения, проветривания и визуальной открытости. *Вторая группа* представлена системами с изменяемыми физическими свойствами, в которых подвижность реализуется не за счёт перемещения элементов, а через трансформацию материала, например в электрохромных и фотохромных стеклянных системах [8; 10]. *Третью группу* составляют комбинированные фасады, сочетающие механическую трансформацию и функциональные свойства материалов.

Подвижные солнцезащитные экраны являются одним из наиболее распространённых типов подвижных фасадов. Они позволяют формировать выразительный фасадный ритм, изменяющийся в течение суток и в зависимости от положения солнца. Архитектурный образ здания при этом становится динамичным, что усиливает его визуальную выразительность и индивидуальность. Экранные элементы формируют дополнительный фасадный слой, который может быть как конструктивно независимым, так и интегрированным в общую систему оболочки здания.

С точки зрения энергетической эффективности подвижные фасады играют важную роль в снижении тепловых нагрузок на здание. Регулирование солнечного излучения и теплопередачи способствует уменьшению потребности в кондиционировании и отоплении, что подтверждается исследованиями в области адаптивных оболочек зданий [3]. Подвижные фасады позволяют учитывать суточные и сезонные изменения климата, что делает их особенно эффективными в регионах с выраженной контрастностью погодных условий.

В архитектурной теории подвижные фасады рассматриваются как проявление концепции адаптивной архитектуры, в которой здание способно реагировать на изменения окружающей среды. Такая архитектура ориентирована не на статичную форму, а на процессуальность и изменчивость, что принципиально отличает её от традиционных моделей проектирования [9]. Фасад в этом контексте становится основным инструментом адаптации здания к внешним воздействиям.

С композиционной точки зрения подвижные фасадные элементы формируют дополнительный уровень фасадной глубины. Между основной ограждающей конструкцией и подвижным экраном возникает промежуточное пространство, которое усиливает пространственную выразительность фасада и формирует сложную светотеневую структуру. Это пространство может рассматриваться как архитектурная зона перехода между интерьером и экстерьером, обладающая собственным функциональным и эстетическим потенциалом.

Подвижные фасады также оказывают влияние на восприятие здания в городской среде. Динамическое изменение положения фасадных элементов формирует вариативный визуальный образ, благодаря чему здание воспринимается по-разному в зависимости от времени суток, погодных условий и точки обзора. В этом смысле подвижный фасад становится инструментом формирования архитектурной идентичности здания.

Особое значение подвижные фасады приобретают в жилой архитектуре. Возможность регулирования степени открытости, освещённости и визуальной изоляции позволяет жильцам адаптировать фасад под индивидуальные потребности, что положительно влияет на психологический комфорт и качество жилой среды [8]. Фасад перестаёт быть исключительно коллективным архитектурным элементом и частично становится индивидуализируемым пространством.

В многоэтажной жилой застройке подвижные фасадные системы позволяют преодолеть визуальную монотонность фасадов за счёт вариативности положения элементов. Фасад перестаёт восприниматься как однотипная плоскость и приобретает динамический характер, что повышает идентификационную ценность здания в городской среде и способствует формированию более разнообразного архитектурного ландшафта.

Следует отметить, что подвижные фасадные системы предъявляют высокие требования к конструктивным решениям и материалам. Их надёжность, долговечность и безопасность во многом зависят от применения высокотехнологичных материалов, включая наноматериалы, способные обеспечивать необходимое сочетание прочности, лёгкости и устойчивости к внешним воздействиям [1; 5]. В этом контексте наноматериалы становятся не вспомогательным, а системообразующим компонентом подвижных фасадных конструкций.

Кроме того, подвижные фасады требуют интеграции с инженерными и цифровыми системами здания. Управление положением фасадных элементов может осуществляться как вручную, так и автоматически с использованием датчиков освещённости, температуры и ветровых нагрузок. Это позволяет рассматривать подвижные фасады как часть интеллектуальной архитектурной системы здания.

Таким образом, подвижные фасадные системы представляют собой не только конструктивное и инженерное решение, но и важный архитектурный принцип, определяющий развитие современной фасадной архитектуры. Они формируют переход от статичной архитектуры к архитектуре адаптивной, интерактивной и процессуальной.

Развитие подвижных фасадных систем создаёт теоретическую и практическую основу для интеграции наноматериалов в архитектурную оболочку здания, что позволяет перейти к анализу их совместного применения в современных фасадных конструкциях.

Интеграция наноматериалов в подвижные фасадные системы формирует качественно новый этап развития архитектурной оболочки здания. В данном случае наноматериалы перестают рассматриваться как вспомогательный компонент и становятся системообразующим элементом, определяющим конструктивные, функциональные и эстетические характеристики фасада.

Подвижные фасады предъявляют особые требования к материалам: они должны сочетать малую массу, высокую прочность, устойчивость к циклическим нагрузкам, воздействию ультрафиолетового излучения, влаги и температурных перепадов. Традиционные строительные материалы не всегда способны обеспечить такое сочетание свойств, тогда как наноматериалы позволяют существенно расширить диапазон технических возможностей фасадных конструкций [1; 5].

Одним из ключевых направлений интеграции наноматериалов является применение нанокомпозитов в элементах подвижных фасадных панелей. Нанокомпозиты обеспечивают повышение прочности при снижении массы конструкции, что особенно важно для фасадных элементов, находящихся в постоянном движении. Это позволяет уменьшить нагрузку на механизмы крепления и привода, повышая общую надёжность системы.

Нанопористые теплоизоляционные материалы, включая аэрогели, используются в составе подвижных фасадных панелей для обеспечения высокой теплоизоляции при минимальной толщине. Такое решение позволяет сохранять компактность фасадных элементов и одновременно обеспечивать высокие энергетические показатели оболочки здания. В подвижных фасадах это особенно важно, поскольку увеличение толщины панели напрямую влияет на массу и сложность механических систем.

Функциональные нанопокрывтия играют важную роль в повышении эксплуатационной устойчивости подвижных фасадов. Самоочищающиеся и водоотталкивающие покрытия снижают накопление загрязнений и влаги на поверхности подвижных элементов, что уменьшает износ механизмов и продлевает срок службы системы [7]. В условиях городской среды такие покрытия позволяют сохранять эстетическое качество фасада без частого технического обслуживания.

Особое значение имеют наноструктурированные стеклянные системы, используемые в подвижных фасадах. Электрохромные и фотохромные стёкла позволяют регулировать степень прозрачности и светопропускания фасада без необходимости механического перемещения элементов [8; 10]. В сочетании с подвижными экранами такие материалы формируют многоуровневую адаптивную систему, в которой механическая и материальная трансформация работают совместно.

Интеграция наноматериалов также влияет на архитектурное формообразование. Возможность создания тонких, лёгких и функционально насыщенных фасадных элементов позволяет формировать более сложные и выразительные фасадные композиции. Подвижный фасад перестаёт быть исключительно техническим устройством и становится полноценным архитектурным инструментом, участвующим в формировании образа здания.

С точки зрения архитектурной теории интеграция наноматериалов в подвижные фасады способствует формированию концепции «активной оболочки», в которой фасад рассматривается как динамическая система взаимодействия здания с окружающей средой. Такая оболочка способна адаптироваться к изменению климата, уровня инсоляции, ветровых нагрузок и пользовательских сценариев эксплуатации.

В жилой архитектуре интеграция наноматериалов в подвижные фасады имеет особое значение. Она позволяет формировать индивидуализируемую фасадную оболочку, адаптируемую под потребности конкретного пользователя. Жилое пространство при этом получает дополнительный уровень защиты, комфорта и визуальной гибкости, что повышает качество архитектурной среды.

Кроме того, применение наноматериалов способствует снижению эксплуатационных затрат за счёт повышения долговечности фасадных элементов и уменьшения потребности в техническом обслуживании. Это делает подвижные фасады с наноматериалами не только архитектурно выразительным, но и экономически обоснованным решением.

Следует отметить, что интеграция наноматериалов в подвижные фасадные системы требует комплексного междисциплинарного подхода, объединяющего архитектурное проектирование, инженерные расчёты и материаловедение. Только в рамках такого подхода возможно формирование по-настоящему эффективных и устойчивых фасадных решений.

Таким образом, наноматериалы и подвижные фасадные системы образуют единую архитектурно-технологическую систему, в которой материалы нового поколения обеспечивают реализацию адаптивных принципов фасадной архитектуры. Их совместное применение формирует основу для дальнейшего развития фасадных оболочек зданий как активных, интеллектуальных и экологически устойчивых архитектурных структур.

Заключение

Проведённое исследование показало, что наноматериалы и подвижные фасадные системы формируют одно из наиболее перспективных направлений развития современной архитектурной оболочки здания. Их интеграция позволяет перейти от статичной модели фасада к адаптивной архитектурной системе, способной реагировать на изменения климатических, световых и эксплуатационных условий.

Анализ наноматериалов продемонстрировал, что материалы нового поколения обладают комплексом свойств, критически важных для фасадных конструкций: высокой прочностью при малой массе, улучшенными теплоизоляционными характеристиками, функциональной изменяемостью и устойчивостью к внешним воздействиям. Эти свойства создают материально-технологическую основу для реализации подвижных и трансформируемых фасадных элементов.

Рассмотрение подвижных фасадных систем позволило установить, что такие конструкции представляют собой не только инженерное решение, но и важный архитектурный принцип, определяющий формирование адаптивной, процессуальной и интерактивной архитектуры. Подвижный фасад выполняет роль медиативного слоя между зданием и окружающей средой, объединяя климатические, композиционные и пользовательские функции.

Интеграция наноматериалов в подвижные фасадные системы обеспечивает качественно новый уровень функционирования фасадной оболочки. Нанокompозиты, нанопокpытия, нанопористые теплоизоляционные материалы и наноструктурированные стеклянные системы позволяют повысить надёжность, долговечность и функциональную гибкость фасадных конструкций. При этом фасад приобретает не только технологическую, но и архитектурную выразительность, формируя динамичный и вариативный образ здания.

Особое значение полученные результаты имеют для жилой архитектуры, где требования к микроклимату, визуальному комфорту и индивидуализации пространства особенно высоки. Подвижные фасады с применением наноматериалов позволяют формировать более гибкую, адаптивную и психологически комфортную жилую среду, отвечающую современным экологическим и социальным требованиям.

В более широком архитектурном контексте наноматериалы и подвижные фасадные системы способствуют формированию концепции активной архитектурной оболочки, в которой фасад рассматривается как интеллектуальный элемент взаимодействия здания с окружающей средой. Это свидетельствует о переходе от традиционного понимания фасада как ограждающей конструкции к его восприятию как функционально и композиционно значимого архитектурного интерфейса.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что интеграция наноматериалов в подвижные фасадные системы представляет собой не частное технологическое решение, а стратегическое направление развития современной архитектуры. Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на разработку комплексных методик проектирования

адаптивных фасадных оболочек с учётом архитектурных, инженерных и экологических факторов.

Полученные выводы могут быть использованы в архитектурном проектировании, научных исследованиях и образовательной практике, а также послужить основой для дальнейшего развития концепции устойчивой и адаптивной архитектуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pacheco-Torgal F. Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials / F. Pacheco-Torgal, S. Jalali — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.009 // Construction and Building Materials. — 2011. — Т. 25, №. 2. — С. 582–590
2. Sanchez F. Nanotechnology in concrete – A review / F. Sanchez, K. Sobolev — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014 // Construction and Building Materials. — 2010. — Т. 24, №. 11. — С. 2060–2071.
3. Loonen R.C.G.M. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges / R.C.G.M. Loonen, M. Trčka, D. Cóstola, J.L.M. Hensen — DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.016. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2013. — Т. 25. — С. 483–493.
4. Casini M. Active dynamic windows for buildings: A review / M. Casini — DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.049 // Renewable Energy. — 2018. — Т. 119. — С. 923–934.
5. Baetens R. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review / R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen — DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.012// Energy and Buildings. — 2011. — Т. 43, №. 4. — С. 761–769.
6. Gallo P. Adaptive façades developed with innovative nanomaterials for a sustainable architecture in the Mediterranean area / P. Gallo, R. Romano — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.289 // Procedia Engineering. — 2017. — Т. 180. — С. 1274–1283.
7. Hincapié I. Nanoparticles in façade coatings: A survey of industrial experts on functional and environmental benefits and challenges / I. Hincapié, T. Künniger, A. Wichser, R. Hischer, B. Nowack — DOI: 10.1007/s11051-015-3085-3 // Journal of Nanoparticle Research. — 2015. — Т. 17. — С. 287.
8. Favoino F. The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies / F. Favoino, M. Overend, Jin Qian — DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.065 // Applied Energy. — 2015. — Т. 156. — С. 1–15.
9. Knaack U. Façades: Principles of Construction / U. Knaack, T. Klein, M. Bilow, T. Auer. — Basel: Birkhäuser, 2014. — 360 с.
10. Granqvist C.G. Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices / C.G. Granqvist — DOI: 10.1016/j.tsf.2014.02.002 // Thin Solid Films. — 2014. — Т. 564. — С. 1–38.

Al-Rabadi Rana Basheer Eid

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
E-mail: 1042235145@pfur.ru

Nanomaterials in Movable Façade Systems: Architectural and Technological Potential

Abstract. The article examines the potential of nanomaterials in movable facade systems as one of the key directions in the development of contemporary architecture and building technologies. Movable facades are analyzed as adaptive building envelopes capable of modifying their properties in response to climatic, lighting and operational conditions. Particular attention is paid to the role of nanomaterials in improving energy efficiency, durability and functional flexibility of facade structures.

The study considers the main types of nanomaterials applied in facade systems, including nanoporous thermal insulation materials, nanocomposite coatings, electrochromic and photochromic glazing, as well as nanostructured protective layers. Their influence on heat transfer, light transmittance, self-cleaning properties and resistance of facades to environmental impacts is analyzed.

Movable facade systems are interpreted as an architectural tool for creating adaptive building envelopes that ensure a balance between energy performance, visual comfort and architectural expressiveness. Special attention is given to residential buildings as one of the most sensitive building types in terms of indoor microclimate and quality of living environment.

It is concluded that the integration of nanomaterials into movable facade systems forms a new paradigm of facade design, in which the building envelope ceases to be a static element and becomes an active component of interaction between the building and its environment. The results may be applied in architectural design practice, engineering solutions and further research in the field of sustainable architecture.

Keywords: nanomaterials; movable facades; adaptive facade systems; building envelope; energy efficiency; nano-coatings; smart materials; facade technologies; residential architecture; sustainable construction