

Стекло с управляемой прозрачностью (smart window) в гражданском строительстве

А.Е. Донцова ^{1*}, А.В. Калинина ²

¹⁻² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Информация о статье УДК 691.6

Аннотация

Смарт-стекло является усовершенствованным типом стекла, которое способно изменять прозрачность в зависимости от различных условий.

В работе исследуется перспективность применения остекления для улучшения естественного освещения в различных сферах методами сравнения трёх видов смарт-стекла, сбора информации по каждому из видов, анализа достоинств, недостатков, а также энергоэффективности материала и обзора текущей ситуации по его использованию в строительстве.

На основе приведенной характеристики различных технологий смарт-стекла выявлены его достоинства, недостатки и связанные с ними сложности, которые в перспективе должны быть разрешены. На конкретных примерах рассмотрены области применения стекла с управляемой прозрачностью. Выявлено, что с развитием техники и технологии производства смарт-стекла произошло улучшение некоторых его оптических свойств при уменьшении стоимости, что ведет к увеличению доступности данного материала.

Ключевые слова: строительство, гражданское строительство, энергоэффективность, смарт-стекло, естественное освещение, остекление, оптические свойства

Содержание

1.	Введение	74
2.	Обзор литературы	74
3.	Цель исследования	75
4.	Основная часть	75
5.	Заключение	78
6.	Благодарности	79

Контактный автор:

1*. +7 (981) 188-93-00, anne.dontsoova@gmail.com (Анна Евгеньевна Донцова, студент);

2. +7 (981) 831-81-27, kalinina0906@yandex.ru (Аксинья Васильевна Калинина, студент).

1. Введение

Очевидный прогресс в технике и технологии в России и за рубежом за последние 20 лет позволил реализовать новые дизайнерские и архитектурные решения в строительстве. С течением времени остекление зданий приобретает всё большую актуальность, так как стекло является недорогим, но безупречным по эстетической выразительности конструкционным материалом, позволяющим экономить электроэнергию за счёт естественного освещения. По этой причине взгляды на возможности использования стекла в гражданском строительстве кардинально изменились за указанный промежуток времени. Таким образом, стекло заняло исключительное положение среди строительных материалов для ограждающих конструкций. Кроме того, существуют различные типы стёкол, некоторые из которых могут изменять свои свойства. К ним относятся смарт-стекло, изменяющее прозрачность при изменении макропараметров. Существует три основных технологии производства «умного стекла»: полимерный жидкокристаллический слой, на взвешенных частицах, электрохромный слой. Каждая из них обладает определенными достоинствами и недостатками, в связи с чем они имеют различные сферы применения. Таким образом, ареал использования стекла с управляемой прозрачностью достаточно широк: от офисных помещений до автомобильных стекол и иллюминаторов самолетов. Недостатком смарт-стекла является высокое энергопотребление, которое влечет за собой недоступность широкого использования материала в гражданском строительстве. Эта проблема приводит к поискам новых эффективных решений, обладающих инвестиционной привлекательностью. Одним из таких решений является технология, согласно которой стекло способно самостоятельно производить электроэнергию из солнечного света и изменять степень прозрачности. Это инновационное свойство стекла позволит электроэнергетике выйти на новый уровень развития и снизить потребность человечества в сырьевых ресурсах. Начиная с 2009 года рынок смарт-стекла расширяется за счёт увеличения популярности и востребованности стекол с регулируемой прозрачностью. Более того, инвестиции спонсоров позволяют предположить и дальнейший рост производства и продаж данного материала, а вместе с этим и его совершенствование.

2. Обзор литературы

Технологии изготовления различных типов смарт-стекла исследованы авторами в работах [1-6].

Мартынов С.В., Самарцев В.М., Еремин Б.Г., Еремин Д.Б. описали в статье испытания на светопропускание, которые были проведены в соответствии с ГОСТ 27902-88 на образцах, изготовленных из электрохромного стекла. Ими была разработана экспериментальная установка для определения нормального светопропускания электрохромного стекла по интенсивности светового потока [1].

Низовцев М.И. и Терехов В.И. изучили тепловые характеристики окон с тепловыделением и вентилированием межстекольных прослоек с использованием экранов и жалюзи с теплоотражающими покрытиями [2].

В статье Никитиной О.С., Харебина И.И., Кузнецовой Ю.В. стекло рассматривается как изобретение с улучшенными механическими свойствами, характеристиками и «интеллектуальными» особенностями [3].

Рудолф С.Е., Диекманн Д., Бродрик Д. в своей работе исследовали причины активного использования технологии «умного стекла». В качестве основных факторов авторы упомянули увеличение поверхности застекления и растущие требования по снижению потребления энергии [4].

В исследовании Murray J., Ma D.K., Munday J.N. описан созданный авторами новый тип «умного стекла», имеющий многослойную структуру из полимерной матрицы с вкраплениями из жидкокристаллических материалов и аморфного кремния. Авторами подробно описано строение стекла и принцип его работы [5].

В своей научной работе Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. изучили решение проблемы высокого энергопотребления с применением технологии смарт-стекла. Были рассмотрены различные типы покрытий стекла, включая обычные, продвинутое и интеллектуальные [6].

Исследование перспектив применения технологий «умного стекла» и анализ рынка проведены в работах [7-9].

В научной работе Макарян И.А., Грачев В.П., Алдошин С.М. проанализировали наиболее перспективные области практического использования передовых энергосберегающих устройств на основе «умного стекла». Авторы показали, что на период написания статьи на рынке отсутствовали большеформатные «умные стекла» для применения в строительстве и транспорте [7].

Макарян И.А., Ефимов О.Н., Куршева В.В., Кондырина Т.Н., Кондрашов С.А. провели анализ состояния и перспектив развития высокоэффективных электрохромных устройств. Были определены наиболее перспективные области практического применения и показали, что рынок «умных стекол» находится в начальной стадии своего становления [8].

В научном обзоре Тутов Е.А. проанализировал состояние и перспективы применения в архитектурном остеклении энергетически эффективных «умных» окон с хромогенными покрытиями. Автор провел сравнение особенностей электро-, термо- и фотохромного эффектов [9].

Примеры применения технологий электрохромного стекла приведены в работах [10-12].

Аноприевой И.Л. были изучены основные характеристики и свойства смарт-панелей, рассмотрела их достоинства и недостатки. Это исследование может стать обзорным материалом для дальнейшего изучения функциональных возможностей и различного рода применения в строительной отрасли [10].

Отческих К.А. исследовал разработку российских ученых, позволяющую сэкономить ресурсы, заключающуюся в покрытии стеклянного листа слоем двуоксида титана. Автором исследован прогресс в строительстве, вызванный корреляцией архитектуры и строительных материалов [11].

Основной целью исследования Саяпиной Д.Г. и Коробия Е.Б. является рассмотрение видов «умного стекла» и определение их преимуществ. В процессе работы был проведен анализ рынка «умных стекол», рассмотрены свойства «умного стекла», найдены отечественные и зарубежные аналоги использования «умного стекла» в архитектуре, дизайне, рекламе. Также в статье затрагиваются вопросы энергоэффективности и экономичности использования смарт-стекла [12].

3. Цель исследования

Целью работы является выявление перспектив применения смарт-стекла в различных сферах. Задачи:

1. Рассмотрение различных видов смарт-стекла;
 2. Анализ достоинств и недостатков материала;
 3. Изучение нынешней ситуации по использованию данного материала;
- Оценка перспектив применения «умного стекла»

4. Основная часть

Описание и классификация стекол с управляемой прозрачностью

Смарт-стекло – это композитный материал, состоящий из слоев стекла и различных химических материалов, который используется для изготовления светопрозрачных конструкций. Особенностью данного стекла является изменение оптических свойств при изменении внешних условий.

Смарт-стекло с управляемой прозрачностью имеет высокую степень рассеивания, то есть, когда стекло находится в матовом состоянии, уже на малых расстояниях (1-2 см) за ним не видно практически никаких предметов. В прозрачном состоянии стекло немного рассеивает лучи, падающие на него под большим углом [13]. Поэтому если смотреть вдоль стекла, то можно заметить легкую матовость. Многие исследователи при работе с «умными стеклами» используют наноматериалы, которые способны обеспечить стекло улучшенными цветовыми качествами, ускорить время переключения между состояниями, удлинить время использования. Все это приводит к совершенствованию свойств стекла с управляемой прозрачностью, а, следовательно, и к расширению областей применения данного стекла. Также прогресс в технологии «умных» стекол делает их все более доступными для использования в строительстве [14].

Различают три основные технологии смарт-стекла:

1. Полимерный жидкокристаллический слой (PDLC – Polymer Dispersed Liquid Crystals). В полимерных жидкокристаллических устройствах смесь жидких полимерных кристаллов диспергируются в жидкий полимер, после чего затвердевают. В этом процессе жидкие кристаллы становятся несовместимы с твердым полимером и формируют вкрапления в полимере, что приводит к изменению свойств смарт-стекла. Без напряжения, жидкие кристаллы не упорядочены, что приводит к рассеянию параллельных лучей света и созданию непрозрачной матово-белой структуры. При подаче напряжения на проводящие слои жидкие кристаллы принимают положение, перпендикулярное плоскости электропроводного слоя и обеспечивают прозрачность.

2. На взвешенных частицах (SPD – suspended particle devices). Между двумя слоями стекол помещается тонкая пленка слоистых материалов стержнеобразных по структуре частиц, взвешенных в жидкости. Если напряжение не приложено, взвешенные частицы ориентированы случайно и поглощают свет, так, что стекло приобретает темно-синий, серый или черный оттенок. Если напряжение приложено, взвешенные частицы выравниваются и стекло становится прозрачным. Отличием данного стекла является то, что оно оптически проницаемо в любом состоянии.

3. Электрохромный слой (ECD – ElectroChromatic Devices) [15-18]. Изменяемый слой в данной технологии состоит из напыления ионов лития. Прозрачность материала регулируется подачей напряжения, при этом контролируется количество пропускаемого света и тепла и состояние изменяется между цветным, полупрозрачным состоянием и прозрачным. подача напряжения необходима только для изменения степени прозрачности, а для поддержания достигнутого состояния необходимость в электропитании отсутствует.

Независимо от принципов работы, все типы материалов, применяемых для производства смарт-стекла, чувствительны к влаге, агрессивным средам и механическим воздействиям, поэтому проходят обязательную процедуру ламинирования. Смарт-стекло производится путем триплексования 2-х или более листов стекла или поликарбоната. Наиболее распространены следующие технологии изготовления панелей смарт стекла по типу используемых ламинирующих пленок:

1. Этиленвинилацетатная пленка (EVA). Обладает хорошим сцеплением к пластику и стеклу. Преимуществом является низкая стоимость как пленки, так и оборудования для ее изготовления. К недостаткам можно отнести высокую мутность при многослойном ламинировании, чувствительность к влажности и низким температурам, а также высокую вероятность расслоения.

2. Поливинилбутиральная пленка (PVB). Обладает хорошим сцеплением со стеклом, но низким с пластиком. При низкой стоимости данной технологии готовый продукт имеет достаточно высокое качество. Недостатком является чувствительность к влажности.

Пленка из термопластичного полиуретана (TPU). Обладает высоким сцеплением с пластиком и стеклом. Основные преимущества — невосприимчивость к влажности, механическим нагрузкам и действиям агрессивных сред. Данная технология производит продукты высокого качества, о чем говорит ее использование для производства изделий остекления для аэрокосмической отрасли. Недостатком является высокая стоимость пленки и оборудования.

Достоинства и недостатки рассматриваемого материала

К достоинствам смарт-стекла можно отнести прочность, высокую диффузию света, однородность в матовом состоянии, а также многофункциональность, ведь данный материал одновременно сочетает в себе функции обычного стекла, светового затвора и проекционного экрана. Смарт-стекло позволяет уменьшить потери тепла, сократить расходы на кондиционирование и освещение, служат альтернативой жалюзи и механическим затемняющим экранам, шторам [19, 20].

Светопрозрачные конструкции, используемые до 2000 годов, имели ряд конструктивных недостатков. Конструкции старого образца были изготовлены из стеклблоков и стеклопрофилита. Они имели высокую воздухопроницаемость и теплопроводность, низкий коэффициент светопропускания и минимальную ремонтпригодность. Сделать замену отдельного элемента было практически невозможно в случае его поломки [21].

Новейшие же виды «умного стекла» на взвешенных частицах отличаются высокой степенью прозрачности: в них практически отсутствует явление опалесценции (замутнения) [22]. Более того, с развитием различных способов художественной обработки стекла «умное стекло» приобрело мобильность: пленку предыдущих поколений требовалось ламинировать в стекло триплекс, в то время как современную пленку можно просто наклеить на стекло, используя специальный оптический клей или обычный скотч [23]. Таким образом, упрощается способ хранения и монтажа материала. Наконец, смарт-стекло последнего поколения имеет более низкий уровень замутнения по сравнению с предшествующими и может управляться низковольтным питанием от 12 до 36 Вольт.

«Умное стекло» имеет широкие возможности по применению в различных областях: к примеру, оно может быть использовано в интерьере для визуального разделения пространства, создания приватности. «Умное стекло» используется в остеклении автомобилей и самолетов, во внутреннем и внешнем остеклении помещений.

Основные недостатки смарт-стекла — это относительно высокая стоимость, необходимость использования электрического напряжения и связанные с этим сложности, а также высокое энергопотребление. Однако, почти все проблемы в перспективе будут разрешены.

Как пример можно рассмотреть вопрос высокой цены на «умное стекло». Известно, что в последнее время наметилась тенденция к строительству зданий из стекла. В теплое время года обычные стекла пропускают значительное количество солнечного света внутрь помещения, за счет чего оно сильно нагревается, увеличивая расход электроэнергии на кондиционирование воздуха. Это особенно актуально для солнечных регионов. Известно, что проблема излишнего нагревания помещений не решается в рамках конструктивных возможностей остекления. Причиной этому служит непредсказуемость и высокая уязвимость стеклянных пластин под действием температурных напряжений, а также закономерности передачи различных видов излучения через светопрозрачные конструкции. Простые солнцезащитные стекла не способны играть роль средств защиты помещений от избыточного воздействия солнечной радиации [24]. Применение смарт-стекла позволяет решить эту проблему, а экономия на кондиционировании может покрыть затраты на установку умных стекол [25].

Проблема высокого энергопотребления, в свою очередь, была частично решена студентом Технологического университета Делфта (Нидерланды). Он запатентовал технологию, согласно которой стекло способно самостоятельно производить электроэнергию из солнечного света и изменять степень прозрачности. В основе технологии лежит люминесцентный солнечный концентратор (ЛСК) — конструкция, состоящая из пленок полимера, склеенных со стеклом и фотоэлементами, прикрепляемых по периметру стекла. Толщина пленки, которую получают путем растворения специально синтезированных люминофоров в полимерной композиции, составляет 250 мкм. Она улавливает часть солнечного спектра, после чего фотогальванические элементы преобразуют солнечную энергию в электрическую. Следует заметить, что ученые России и Франции разработали ЛСК с более высоким коэффициентом концентрации и «нулевым» самопоглощением энергии, по сравнению с аналогами. Кроме собственного энергообеспечения, одно окно способно создать небольшую внешнюю мощность (порядка нескольких десятков Вт) и обеспечить электричеством другие устройства. Это инновационное свойство стекла позволит электроэнергетике выйти на новый уровень развития и снизить потребность человечества в сырьевых ресурсах.

У каждого из видов смарт-стекла также есть свои недостатки. Смарт-стекло на взвешенных частицах требует для блокировки ультрафиолета использование специальных покрытий. Минусом электрохромного стекла является скорость переключения между состояниями: процесс затемнения в нем может занимать до нескольких минут в отличие от SPD-стекла, в котором смена прозрачности происходит моментально. Пленки на

жидких кристаллах, в свою очередь, не позволяют создавать градацию прозрачности стекла: они дают не эффект прозрачной тонировки, а эффект «молочной мутности».

Расширение областей применения стекла с управляемой прозрачностью с течением времени

Прогресс в науке и практике стеклоизделия в последние десятилетия XX в. позволил реализовать специфические свойства стекла как ни с чем несравнимого по эстетической выразительности конструкционного материала, а также привел к созданию новейших эффективных изделий на его основе. В связи с этим изменились взгляды на возможности применения стекла в строительстве. Стекло заняло исключительное положение среди строительных материалов для ограждающих конструкций. Стекланные поверхности стали одним из основных выразительных средств в современной архитектуре — светопрозрачные ограждения в современных зданиях достигают 80 и более процентов площади фасада

[26].

Первые смарт-стекла появились на рынке благодаря С. Абади в 1984 году под названием «LC Glass». Но в это время они не были оценены по достоинству в связи с уровнем развития стекольной промышленности. В 2003 году стекла с управляемой прозрачностью появились с торговой маркой E-Glass от компании Innovative Glass Corporation, которая была основана С. Абади. Появление смарт-стекол в России связано с 2009 годом, который пришелся на период укрепления производителей оконных производителей и преодоление последствий снижения объемов оконного производства в 2008 году [27]. С этого времени началось совершенствование данного материала и применение его в новых сферах, которое имеет множество преимуществ благодаря выполняемым функциям.

Сначала стекла с управляемой прозрачностью применялись в основном в офисных зданиях. Но с увеличением доступности данной технологии смарт-стекла начали применяться и в жилых зданиях.

Можно выделить два основных применения стекла с управляемой прозрачностью в строительстве зданий: сооружение внутренних перегородок и внешнее остекление. Перегородки из стекла помогают разделить пространство комнаты на несколько связанных между собой зон, не уменьшая при этом помещение визуально и не загромождая площадь. Смарт-стекло в качестве перегородки имеет некоторое преимущество. В обычном состоянии помещения огороженные таким стеклом, являются частью внутреннего пространства, а при необходимости могут служить отдельным помещением. Также стекла с управляемой прозрачностью используются в качестве окон, при этом они могут быть альтернативой жалюзи или шторам. Преимуществом использования смарт-стекла в данном случае является его способность сохранять тепло в комнате в зимний период и не давать нагреваться воздуху в ней - в летний, а также защищать от ультрафиолетовых лучей.

Смарт-стекла имеют широкое применение в автомобильной индустрии для затемнения зеркал заднего вида автомобиля при различном освещении. Также в автомобилях устанавливаются крыши из смарт-стекла. Примером может служить автомобиль Ferrari 575 M Superamerica, оснащенный уникальной съемной крышей с большой площадью остекления с использованием стекла с углеродистыми волокнами, степень прозрачности которого изменяется с помощью регулятора в салоне

Стекла с управляемой прозрачностью используются в рекламной индустрии в качестве витрин для презентации рекламных роликов. В обычном состоянии данные стекла затемнены, но при необходимости стекло можно сделать прозрачным для обзора интерьера помещения или выставочных образцов. Рекламная кампания автомобиля Nissan Micra CC в Лондоне проводилась с использованием четырех панелей из смарт-стекла, которые последовательно изменяли матовость для создания выразительной инсталляции на улицах города. [12].

В настоящее время стекла с управляемой прозрачностью нашли применение и в авиастроительстве. Более 30 различных моделей самолетов имеют иллюминаторы из смарт-стекла, которые уменьшают затраты на техническое обслуживание, блокируют ультрафиолетовые лучи для защиты внутреннего пространства самолета. Примером может служить Boeing 787 Dreamliner, разработанный американской компанией Boeing Commercial Airplanes в 2009 году. Иллюминаторы этого лайнера снабжены регулируемым электрохромным стеклом.

Использование стекла с управляемой прозрачностью в различных сферах отражает современные тенденции развития техники, а также говорит о том, что с постоянным совершенствованием технологии производства стекла увеличивается и доступность его применения.

Анализ перспектив применения объекта исследования

Производство смарт-стекла в крупных масштабах началось в 2003 году, когда Стив Абади основал компанию Innovative Glass Corporation, в которой был председателем и главным исполнительным директором, и во второй раз вывел на рынок электронное стекло с зарегистрированной торговой маркой E-Glass. Начиная с 2009 года рынок смарт-стекла стал активно расти и появился в России.

Увеличение продаж смарт-стекла и расширение сфер его применения можно связать, в первую очередь, с развитием техники. На разработку технологий изготовления смарт-стекол за последние несколько лет было выделено около \$100 млн. В развитии производства «умного стекла» и в понижении его конечной стоимости

заинтересованы, в первую очередь, производители остекления, так как увеличение доступности данного материала повысит спрос на него. К примеру, компания Saint Gobain инвестировала \$80 млн. в SageGlass для разработки смарт-стекла.

Второй важной чертой «умного стекла» является его энергоэффективность. Известно, что в изготовлении светопрозрачных конструкций могут применяться некоторые виды промышленных отходов. Очевидно, что научные разработки в области использования вторичной продукции – крайне перспективное направление в производстве строительных материалов. Подобные изделия будут обладать рядом таких свойств, как эффективность и конкурентоспособность. Применение отходов в производстве может обеспечить решение масштабной современной экологической проблемы [28]. Светопрозрачные фасадные конструкции считаются экологически чистым материалом, и их применение не вредит здоровью человека и безопасности окружающей среды. Основная цель совершенствования конструкций светопрозрачных фасадных панелей – обеспечение естественного воздухообмена в помещении без теплопотерь. Это значительно снизит нагрузку на системы кондиционирования и вентиляции, и, возможно, вообще позволит отказаться от них [29]. По данным Министерства энергетики США, применение смарт-стекла вполне может сократить потребление энергии почти на 40%, поэтому с каждым днем смарт-стекло получает все более активное применение в «зеленом строительстве». В целом, глобальный рынок «умного стекла» значительно развивается, так как растет спрос на энергосберегающие продукты и экологически чистые здания, увеличивается использование различных отходов промышленности в производстве стекла [30]. По данным, представленным американской исследовательской компанией Navigant Research, общий объем рынка «умного стекла» к 2022 году может достичь \$890 млн.

На выставке Glasstec 2016 были представлены новые тенденции в стекольной промышленности, а также отчеты некоторых аналитических компаний, делавших исследования на рынке «умного стекла». По отчету Statistics Market Research Consulting, глобальный рынок смарт-стекла в 2015 году составил более \$32 млрд. и к 2022 году достигнет \$126.7 млрд., увеличивая ежегодные темпы роста на 21.2% в течение прогнозируемого периода (2015-2022). Аналитики TechNavio, в свою очередь, прогнозируют рост глобального производства смарт-стекла в среднем на 19.88% за период 2016-2020 гг. Доклад, представленный TechNavio, охватывает настоящую ситуацию и перспективы роста мирового рынка смартстекла. Аналитики поделили общую площадку на 3 сегмента, основанные на географии: Северная и Южная Америка, страны APAC и регион EMEA (Европа, Россия, Ближний Восток, Африка). Отчет также включает в себя обсуждение ключевых поставщиков смарт-стекла таких, как AGC, Corning, Saint-Gobain, PPG и DuPont.

«Научно Производственное объединение «Адванотех», занимающееся исследованиями и разработкой инновационных материалов и изделий на их основе, уже приобрела лицензию у разработчика уникальной и единственной на сегодняшний день технологии плавного изменения прозрачности стекла, с целью масштабного внедрения данной продукции на архитектурном и автомобильном рынках России.

Препятствие для глобального и интенсивного роста рынка «умных стекол» создает неосведомленность покупателей и пока что недоступно высокая цена на умное-стекло. Для преодоления данной трудности компании-лидеры в этой сфере стремятся сотрудничать друг с другом, а также с компаниями смежных областей, например, с производителями и поставщиками химических продуктов, научно-исследовательскими институтами и т.д. Считается, что со временем смарт-стекла станут доступны широким массам, и это приведет к вытеснению из жизни человека штор и жалюзи.

5. Заключение

Были рассмотрены три вида смарт-стекла, отличающиеся друг от друга оптическими характеристиками, такими, как степень прозрачности и матовость. Эти свойства определяются строением слоя смарт-плёнки, прикрепляемой к стеклу. Было выявлено, что стекло на взвешенных частицах больше подходит для установки на стёкла автомобилей, а стекло с электрохромным слоем – для жилых и офисных помещений, поскольку оно не нуждается в подаче напряжения для поддержания прозрачности.

Недостатками смарт-стекла на сегодняшний день остаются высокая стоимость и энергозатратность. Необходимо учитывать, что данные проблемы находятся на стадии разрешения ввиду развития техники и технологии, а также финансовых вложений в исследуемую сферу. Однако, мы можем смело говорить о таких положительных качествах данного материала, как эстетическая выразительность и многофункциональность, ведь данный материал одновременно сочетает в себе функции обычного стекла, светового затвора и проекционного экрана. Широкий ряд достоинств стекла с управляемой прозрачностью обеспечивает материалу перспективность и обширную сферу использования.

Материалу было найдено применение не только в сфере гражданского строительства, но и в авиастроительной и автомобильной отраслях, а также в рекламной индустрии. Использование стекла с регулируемой прозрачностью отражает уровень развития техники и технологии в современном мире, а также указывает на то, что с течением времени данный тип стекла улучшается, что приводит к увеличению его доступности.

По оценкам экспертов, стекло с регулируемой прозрачностью вызывает интерес спонсоров и потребителей, в связи с чем имеет место рост рынка «умного стекла». Анализ рынка позволяет предположить увеличение ежегодных темпов роста рынка в течение ближайших пяти лет.

6. Благодарности

Авторы выражают признательность сотрудникам инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого за оказанную помощь при проведении данного исследования и при написании данной статьи.

Литература

- [1]. Мартынов С.В., Самарцев В.М., Еремин Б.Г., Еремин Д.Б. Исследование свойств электрохромного стекла // Известия института инженерной физики. 2011. №20. С. 70-75.
- [2]. Низовцев М.И., Терехов В.И. Светопрозрачные конструкции с регулируемыми тепловыми характеристиками // Проблемы региональной энергетики. 2011. №1. С. 60-76.
- [3]. Никитина О.С., Харебин И.И., Кузнецова Ю.В. «Умные стекла» с изменяемой прозрачностью. Технологическая «smart-glass» // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. Т. 12. № 4. С. 115-117.
- [4]. Рудолф С.Е., Диекманн Д., Бродрик Д. Энергосберегающие технологии в производстве «умных» окон // Энергосбережение. 2009. № 7. С. 60-63.
- [5]. Murray J., Ma D.K., Munday J.N. Electrically Controllable Light Trapping for Self-Powered Switchable Solar Windows. ACS Photonics. 2017. Vol. 4. Iss. 1. Pp.1-7.
- [6]. Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. Solar energy materials and solar cells. 2017. Vol. 159. Pp. 26-51.
- [7]. Макарян И.А., Грачев В.П., Алдошин С.М. О перспективах разработки новых энергосберегающих устройств на основе «умного» стекла // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 11. С. 98-112.
- [8]. Макарян И.А., Ефимов О.Н., Куршева В.В., Кондырина Т.Н., Кондрашов С.А. Состояние и перспективы развития энергосберегающих устройств на основе «умного стекла» // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 11. С. 127-141.
- [9]. Тутов Е.А. Перспективы хромогенных композитных покрытий для «умных» окон // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2014. №2(9). С. 18-22.
- [10]. Аноприева И.Л. Использование смарт-панелей в строительстве и дизайне // Студенческая наука XXI века. 2016. №1-2(8). С. 40-41.
- [11]. Отческих К.А. «Умное стекло» в современной архитектуре // Молодой ученый. 2013. № 4. С. 86-88.
- [12]. Саяпина Д.Г., Коробий Е.Б. «Умное» стекло в современном доме // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2013. Т. 2. С. 145-151.
- [13]. Chang-Mook Lee, Jaewu Choi. Polarization and incidence angle-dependent transmittance of transparent nickel electrodes with various thicknesses. Optical Materials. 2011. Vol. 33. Iss. 6. Pp. 859-864.
- [14]. Pattathil, P., Giannuzzi R., Manca M. Self-powered NIR-selective dynamic windows based on broad tuning of the localized surface plasmon resonance in

References

- [1]. Martynov S.V., Samartsev V.M., Eremin B.G., Eremin D.B. Issledovanie svoystv elektrokromnogo stekla [Research of properties of electrochromic glass]. Izvestiya instituta inzhenernoy fiziki. 2011. No. 20. Pp. 70-75. (rus)
- [2]. Nizovtsev M.I., Terekhov V.I. Svetoprozrachnyye konstruksii s reguliruemyimi teplovymi kharakteristikami [Translucent structures with adjustable thermal characteristics]. Problems of the regional energetics. 2011. No. 1. Pp. 60-76. (rus)
- [3]. Nikitina O.S., Kharebin I.I., Kuznetsova Yu.V. «Umnye stekla» s izmenyaemoy prozrachnost'yu. Tekhnologiya «smart-glass» ["Smart glass" with variable transparency. "Smart-glass" technology]. Modern trends of development of science and technology. 2016. Vol. 12. No. 4. Pp. 115-117. (rus)
- [4]. Rudolf S.E., Diekmann D., Brodrik D. Energoberegayushchie tekhnologii v proizvodstve «umnykh» okon [Energy saving technologies in the production of «smart» windows]. Energy saving. 2009. No. 7. Pp. 60-63. (rus)
- [5]. Murray J., Ma D.K., Munday J.N. Electrically Controllable Light Trapping for Self-Powered Switchable Solar Windows. ACS Photonics. 2017. Vol. 4. Iss. 1. Pp.1-7.
- [6]. Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. Solar energy materials and solar cells. 2017. Vol. 159. Pp. 26-51.
- [7]. Makaryan I.A., Grachev V.P., Aldoshin S.M. O perspektivakh razrabotki novykh energoberegayushchikh ustroystv na osnove «umnogo» stekla [Prospects of developing new energy-saving devices based on smart glass]. Alternative energy and ecology. 2012. No. 11. Pp. 98-112. (rus)
- [8]. Makaryan I.A., Efimov O.N., Kursheva V.V., Kondryrina T.N., Kondrashov S.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya energoberegayushchikh ustroystv na osnove «umnogo stekla» [State and prospects of development of energysaving devices based on smart «glass»]. Alternative energy and ecology. 2009. No. 11. Pp. 127-141. (rus)
- [9]. Tutov E.A. Perspektivy khromogennykh kompozitnykh pokrytiy dlya «umnykh» okon [Perspectives of chromogenic composite coatings for "smart" windows]. Scientific herald of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: physical and chemical problems and high technologies of building materials science. 2014. No. 2(9). Pp. 18-22. (rus)
- [10]. Anoprieva I.L. Ispol'zovanie smart-paneley v stroitel'stve i dizayne [Using smart panels in construction and design]. Student science of the XXI century. 2016. No. 1-2(8). Pp. 40-41. (rus)
- [11]. Otcheskikh K.A. «Umnoe steklo» v sovremennoy arkhitekture [«Smart» glass in modern architecture]. Molodoy uchenyy. 2013. No. 4. Pp. 86-88. (rus)
- [12]. Sayapina D.G., Korobiy E.B. «Umnoe» steklo v sovremennom dome ["Smart" glass in a modern house]. The new Ideas of New Century – 2015: The Fifteenth International Scientific Conference Proceedings. 2013. Vol. 2. Pp. 145-151. (rus)
- [13]. Chang-Mook Lee, Jaewu Choi. Polarization and incidence angle-dependent transmittance of transparent nickel electrodes with various thicknesses. Optical Materials. 2011. Vol. 33. Iss. 6. Pp. 859-864.
- [14]. Pattathil, P., Giannuzzi R., Manca M. Self-powered NIR-selective dynamic windows based on broad tuning of the

- mesoporous ITO electrodes. *Nano energy*. 2016. Vol. 30. Pp. 242251.
- [15]. Bogati S., Georg A., Jerg C., Graf W. Tetramethylthiourea (TMTU) as an alternative redox mediator for electrochromic devices. *Solar energy materials and solar cells*. 2016. Vol. 157. Pp. 454-461.
- [16]. Laurie Winkless. Nanocrystalline titania for smart windows. *Materials Today*. 2014. Vol. 17. Iss. 7. Pp. 316-317.
- [17]. Panagopoulou M., Gagaoudak E., Boukos N., Aperathitis E., Kiriakidis G., Tsoukalas D., Raptis Y.S. Thermochromic performance of Mg-doped VO₂ thin films on functional substrates for glazing applications. *Solar energy materials and solar cells*. 2016. Vol. 157. Pp. 1004-1010.
- [18]. Tai-Nan Lin, Yi Han Lin, Chin Tan Lee, Sheng Han, Ko-Wei Weng. Electrochromic properties of bipolar pulsed magnetron sputter deposited tungsten–molybdenum oxide films. *Thin Solid Films*. 2015. Vol. 584. Pp. 341-347.
- [19]. Чудинов Д.М., Сотникова К.Н., Щербаков К.С., Черноухова Ю.А. Разработка новых интеллектуальных светопрозрачных ограждающих конструкций зданий // Инженерные системы и сооружения. 2010 №1. С. 93-97.
- [20]. Ahmed Sherif, Hanan Sabry, Rasha Arafa, Ayman Wagdy. The Impact of Alternative Window Glazing Types and a Shading System on the Daylighting of Hospital Patient Rooms: Simulation Analysis under a Desert Clear Sky. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78. Pp. 1805-1810.
- [21]. Каратаев Л.П. Совершенствование светопрозрачных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2011. №2. С. 45-50
- [22]. Закируллин Р.С. Селективное регулирование светопропускания стекла и стеклянных конструкций // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. №6(125). С. 172180.
- [23]. Садакова В.В., Земцов М.И. Обзор технологий художественной обработки стекла // Наука в центральной России. 2013. № 4. С. 28-32.
- [24]. Плотников А.А. Архитектурно-конструктивные принципы и инновации в строительстве стеклянных зданий // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 7-15.
- [25]. Luigi Giovannini, Valerio R.M. Lo Verso, Boris Karamata, Marilyn Andersen. Lighting and Energy Performance of an Adaptive Shading and Daylighting System for Arid Climates. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78. Pp. 370375.
- [26]. Дербина С.Н., Борискина П.В., Плотников А.А. Эволюция конструктивных решений светопрозрачных фасадов // Вестник МГСУ. 2011. №2-2. С. 26.
- [27]. Спиридонов А.В. Светопрозрачные конструкции в России: вчера и сегодня // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2015. № 1(192). С. 46-51.
- [28]. Лазарева Е.А., Тышлангян Ю.С. Разработка декоративных стекол с применением флотационных хвостов углеобогащения // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 8(163). С. 42-43.
- [29]. Сиявская Д.В. Материалы, используемые для сплошного остекления фасадов // Наука, образование и экспериментальное проектирование. 2014. С. 419-420.
- localized surface plasmon resonance in mesoporous ITO electrodes. *Nano energy*. 2016. Vol. 30. Pp. 242251.
- [15]. Bogati S., Georg A., Jerg C., Graf W. Tetramethylthiourea (TMTU) as an alternative redox mediator for electrochromic devices. *Solar energy materials and solar cells*. 2016. Vol. 157. Pp. 454-461.
- [16]. Laurie Winkless. Nanocrystalline titania for smart windows. *Materials Today*. 2014. Vol. 17. Iss. 7. Pp. 316-317.
- [17]. Panagopoulou M., Gagaoudak E., Boukos N., Aperathitis E., Kiriakidis G., Tsoukalas D., Raptis Y.S. Thermochromic performance of Mg-doped VO₂ thin films on functional substrates for glazing applications. *Solar energy materials and solar cells*. 2016. Vol. 157. Pp. 1004-1010.
- [18]. Tai-Nan Lin, Yi Han Lin, Chin Tan Lee, Sheng Han, Ko-Wei Weng. Electrochromic properties of bipolar pulsed magnetron sputter deposited tungsten–molybdenum oxide films. *Thin Solid Films*. 2015. Vol. 584. Pp. 341-347.
- [19]. Chudinov D.M., Sotnikova K.N., Shcherbakov K.S., Chernoukhova Yu.A. Razrabotka novykh intellektual'nykh svetoprozrachnykh ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy [Working out of new intellectual transparent for light protecting designs of buildings]. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya*. 2010 Vol. 1. Pp. 93-97.
- [20]. Ahmed Sherif, Hanan Sabry, Rasha Arafa, Ayman Wagdy. The Impact of Alternative Window Glazing Types and a Shading System on the Daylighting of Hospital Patient Rooms: Simulation Analysis under a Desert Clear Sky. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78. Pp. 1805-1810.
- [21]. Karataev L.P. Sovershenstvovanie svetoprozrachnykh konstruksiy [Perfection of light transparent designs]. *Bulletin of Civil Engineers*. 2011. Vol. 2. Pp. 45-50.
- [22]. Zakirullin R.S. Selektivnoe regulirovanie svetopropuskaniya stekla i steklyannykh konstruksiy [Selective regulation of light transmittance of glass and glass structures]. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2011. Vol. 6(125). Pp. 172180.
- [23]. Sadakova V.V., Zemtsov M.I. Obzor tekhnologii khudozhestvennoy obrabotki stekla [Technology review of art glass processing]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2013. Vol. 4. Pp. 28-32.
- [24]. Plotnikov A.A. Arkhitekturno-konstruktivnye printsipy i innovatsii v stroitel'stve steklyannykh zdaniy [Architectural and engineering principles and innovations in the construction of glass-facade buildings]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2015. Vol. 11. Pp. 7-15.
- [25]. Luigi Giovannini, Valerio R.M. Lo Verso, Boris Karamata, Marilyn Andersen. Lighting and Energy Performance of an Adaptive Shading and Daylighting System for Arid Climates. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78. Pp. 370375.
- [26]. Derbina S.N., Boriskina P.V., Plotnikov A.A. Evolyutsiya konstruktivnykh resheniy svetoprozrachnykh fasadov [Evolution of translucent facades design solutions]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2011. Vol. 2-2. Pp. 26
- [27]. Spiridonov A.V. Svetoprozrachnye konstruksii v rossii: vchera i segodnya [Translucent constructions in Russia: yesterday and today]. *Construction materials, the equipment, technologies of XXI century*. 2015. Vol. 1(192). Pp. 46-51.
- [28]. Lazareva E.A., Tyshlangyan Yu.S. Razrabotka dekorativnykh stekol s primeneniem flotatsionnykh khvostov ugleobogashcheniya [The development of the decorative glass with the use of flotation tailings coal]. *Construction materials, the equipment, technologies of XXI century*. 2012. Vol. 8(163). Pp. 42-43.
- [29]. Sinyavskaya D.V. Materialy, ispol'zuemye dlya sploshnogo ostekleniya fasadov [Materials used for solid glazing of facades]. *Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie*. 2014. Pp. 419-420.

[30]. Ахмяров Т.А., Спиридонов А.В., Шубин И.Л. Новые решения для светопрозрачных конструкций // Светотехника. 2015. №2. С. 51-56.

Донцова А.Е., Калинина А.В. Стекло с управляемой прозрачностью (smart window) в гражданском строительстве // Alfabuild. 2018. №4 (6). С. 74-82

[30]. Akhmyarov T.A., Spiridonov A.V., Shubin I.L. Novye resheniya dlya svetoprozrachnykh konstruktsiy [New solutions for translucent structures]. Light & Engineering. 2015. Vol. 2. Pp. 51-56.

Dontsova A.E., Kalinina A.V. Smart windows in civil engineering. Alfabuild, 2018, 2 (4), Pp. 74-82(rus)

Smart windows in civil engineering

A.E. Dontsova^{1*}, A.V. Kalinina²

¹⁻² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

Article info

Abstract

Smart glass is an innovative work material for daylighting whose light transmission properties are altered when voltage, light or heat is applied. Such glass can be used both in the construction of office and residential buildings. The purpose of the research was to study prospects of using smart glass in construction.

The general aspects of the main part of the study were to compare different types of smart windows and to identify their main advantages and disadvantages. The research showed that the newest species of glass surfaces are extremely transparent, multifunctional and energy efficient. The basic smart window disadvantages include high cost, energy requirement and high power consumption. All these problems seem to be solved in the nearest future because sponsors invest a lot of money in the development of smart glass optical properties. Moreover, the study investigated the scope of smart windows changes in the smart glass market in recent years. The research showed that the market is growing steadily.

Based on the findings, smart glass is an extremely promising material that is going to spread quickly in the nearest future. Further study requires to figure out the most efficient way of energy consumption and to reduce the price of the material.

Keywords:

construction, civil engineering, energy efficiency, smart windows, daylighting, glass surfaces, optical properties

Corresponding author:

1*. +7 (981) 188-93-00, anne.dontsoova@gmail.com (Anna Dontsova, Student);

2. +7 (981) 831-81-27, kalinina0906@yandex.ru (Aksinya Kalinina, Student).