



Review Article

Received: August 18, 2023

Accepted: August 21, 2023

Published: September 23, 2023

ISSN 2658-5553

Fire-resistant glass and translucent structures. A review

Kotlyarskaya, Irina Leonidovna^{1*} Vatin, Nikolai Ivanovich¹ Gravit, Marina Victorovna¹ Shinkareva, Maria Konstantinovna¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; iravassilek@mail.ru (K.I.L.); vatin@mail.ru (V.N.I.); marina.gravit@mail.ru (G.M.V.); shinkareva_mk@spbstu.ru (S.M.K.)

Correspondence:* email iravassilek@mail.ru; contact phone [+79095863919](tel:+79095863919)

Keywords:

Fire Resistance; Fire-Resistant Glass; Monolithic Glass; Laminated Glass; Tempered Glass; Translucent Structures; Glass Structures; Glazing; Glass Façade; Aerogel Glazing

Abstract:

The object of research is fire-resistant glass. **Method.** The research method consists of analyzing and synthesizing information, applying the general scientific classification method, and using scientometric analysis tools. **Results.** A scientometric analysis of articles on “Fire-resistant glass” in the scientific database The Lens revealed an annual increase in articles in this area. The volume of work on this topic is 1-1.3% (November 2023) of the number of works devoted to glass structures. A review of fire-resistant glass research has revealed a lack of fire load testing of large-scale glass specimens. It was also revealed that there is a lack of work on fire tests with aerogel glazing, although this innovative material has proven non-flammable.

1 Introduction / Введение

Благодаря своим превосходным оптическим, химическим и термическим свойствам неорганические стекла [1] широко используются в промышленности, в электронном приборостроении и машиностроении [2] в космической отрасли [3], в строительстве [4], в искусстве [5] и в других потребительских целях [6]. Стекла стойки к воздействию агрессивных сред, поэтому их также используют для вплавления в них ядерных отходов [7].

Стекло обладает очень богатой историей, ему более 4500 лет [8]. За этот временной период процесс создания стекла претерпевал много изменений, начиная от литья, вдвки вплоть до пластичной резки в 1970-х годах [9] и, заканчивая флоат методом [10] и аддитивным производством [11]. Успешное использование стекла в перечисленных областях является результатом десятилетий активных фундаментальных и прикладных исследований стекла. По запросу “Стекланные конструкции” (“glass structures”) в научной базе The Lens находится 439.473 статьи, единственный установленный фильтр был “Статьи в журналах”. На Рис.1 представлено распределение количества научных работ по заданной теме по годам.

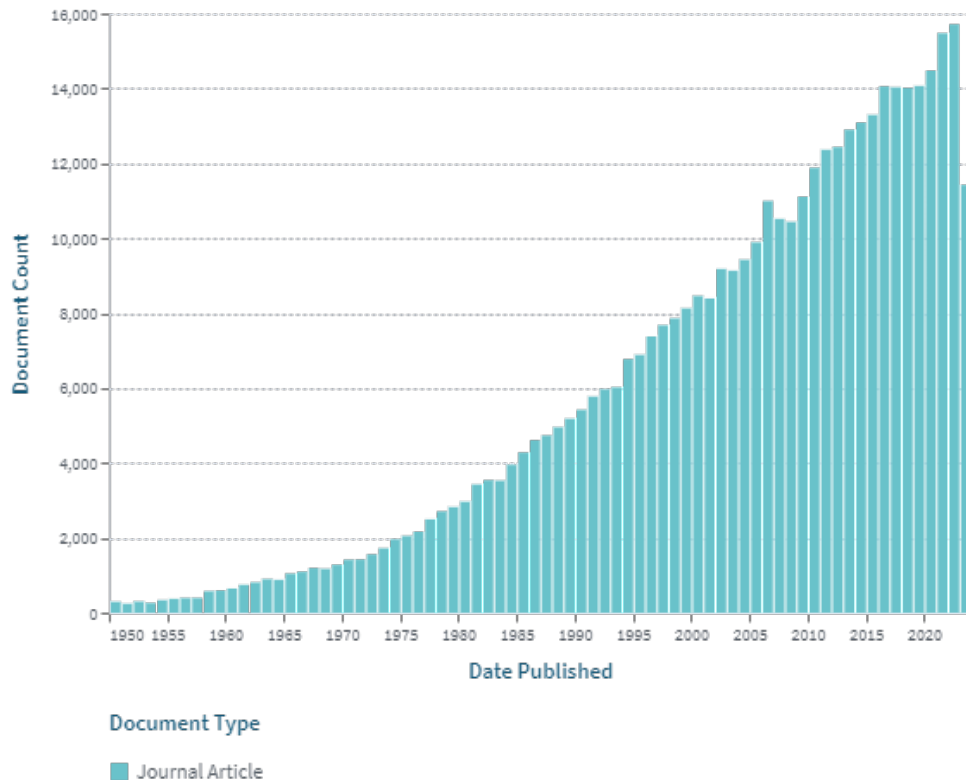


Рис. 1- Научные труды на протяжении времени
Fig. 1 - Scholarly works over time

Согласно графику (Рис.1), наблюдается плавный рост количества научных работ в области стеклянных конструкций. В 2022 году было опубликовано 15.717 работ по выбранной теме.

С начала двухтысячных стекло стало активно применяться в строительной области на фасадах, кровле [12], а также внутри здания в качестве перегородок [13], полов [14], лифтов [15]. Стекло является незаменимым строительным материалом благодаря своей прозрачности и гладкой, отражающей поверхности, которая придает строительным конструкциям визуальную легкость и аккуратность [16].

Элементы остекления кроме своей аккуратности и архитектурной эстетики обладают особыми свойствами, повышающими комфорт и улучшающими безопасность людей [17]. Появление электрохромных стекол с переменной прозрачностью [18]; низкоэмиссионных энергоэффективных стекол Low-E [19]; самоочищающихся и водоотталкивающих стекол [20]; стекол, меняющих цвет (дихроичные) [20]; стекол, снижающих шум [21]; появление аэрогелевого остекления [22] и инновационных систем остекления (структурное, полуструктурное, модульное и спайдерное) дало шанс на воплощение самых неординарных архитектурных идей [23].

Однако, по сравнению с бетонными или стальными конструкциями, стеклянные конструкции более подвержены разрушению и потере целостности при пожаре. Среди всех типов стекла наиболее распространенным является натриево-известково-кремнеземное стекло, его типичный состав: 70% SiO₂, 10% CaO и 15% Na₂O [24]. Однако стеклянные компоненты из такого состава хрупки и уязвимы к ударам [25]. Во время нагревания такие стекла обычно ломаются из-за деформаций, возникающих при неравномерном и очень быстром нагреве. Растрескивание стеклянных панелей создает отверстия для поступления свежего воздуха и быстрого распространения огня.

При использовании стекла в качестве конструктивного компонента, его прочность и твердость становятся важными факторами для обеспечения безопасности. Чтобы не допустить разрушение стекла и последующего распространения огня, создаются огнестойкие стекла, которые широко начали применяться в строительстве с тех времен, когда стала расти тенденция к остеклению фасадов и широкому применению стеклянных конструкций внутри зданий. Например, в Китае в 2007 году было применено около 400000 м² огнеупорного стекла, а уже в 2008 году число увеличилось до 500000 м², т.е. рост составил более 20 процентов за год [26].

При обращении к научной базе The Lens с поиском статей по теме “Fire-resistant glass” (Огнестойкие стекла) находится 5843 статьи (Рис. 2а), по запросу “Fire-resistant glass structures” (огнестойкие стеклянные конструкции) находится 4299 штуки (Рис. 2б).



Рис. 2- Научные труды на протяжении времени по теме (а) Огнестойкие стекла (б) Огнестойкие стеклянные конструкции

Fig. 2 - Scientific papers over time on the topic (a) Fire-resistant glass (b) Fire-resistant glass structures

Таким образом, научные работы по огнестойким стеклам составляют примерно 1–1.3% от всего количества научных работ по стеклянным конструкциям. Согласно графикам, заметен растущий интерес научного сообщества к этой теме. В этом обзоре будут обобщены достижения в области огнестойких стекол за 2010-2020-е. В первой части будет приведена классификация огнестойких стекол. Особое внимание будет уделено научным исследованиям монолитных и ламинированных стекол. Анализ научных работ закончится на текущих проблемах, а также на потенциальных будущих направлениях в области огнестойких стеклянных конструкций.

2 Classification of fire-resistant glasses / Классификация огнестойких стекол

В отличие от других строительных материалов, стекло, в зависимости от толщины, прочности на растяжение и качества поверхности, имеет тенденцию трескаться под воздействием тепла или быстро остывать. Из-за температурного градиента между отапливаемыми и неотапливаемыми участками и относительно низкого теплового расширения стекла возникают термические напряжения. Если разница температур за короткое время достигает определенного уровня (для обычного флоат-стекла перепад составляет до 40 °C [20]), растягивающее напряжение превышает предел прочности, что приводит к поломке стекла [16]. В работе [27] рассматривается зависимость между образованием первой трещины в стекле и толщиной стеклянного полотна. Время, которое понадобится для того, чтобы образовалась первая трещина в стекле толщиной 19 мм больше, чем у более тонкого стекла, время растрескивания стекла толщиной 6 мм, 10 мм и 12 мм практически одно и то же. Одна лишь целостность стекла не обеспечивает защиту от проникновения огня в соседнее помещение. Причина в том, что через прозрачное стекло проникает тепловое излучение.

Огнеупорное стекло способно временно защищать от дыма, пламени и обеспечивать временную теплоизоляцию. Как правило, огнестойкость конструкции должна быть подтверждена испытаниями в печи в соответствии со стандартной кривой огнестойкости без потери какого-либо из требуемых критериев (целостность (E), изоляция (I), излучение (W) или несущая способность (R)) в течение определенного времени.

Потеря целостности (E) проявляется в образовании сквозных отверстий или трещин в конструкции, через которые на обратную (необогреваемую) поверхность проникают продукты горения и/или открытое пламя. Потеря теплоизолирующей способности характеризуется повышением температуры на необогреваемой поверхности конструкции до предельных значений



(I) или достижением предельной величины плотности теплового потока на нормируемом расстоянии от необогреваемой поверхности конструкции (W).

Для обеспечения полной защиты от пожара используется пожаростойкое изолирующее стекло, объединяющее свойства целостности E и теплоизоляции I. В европейской классификации критерий ограничения передачи теплового излучения W включается в требования обеспечения критерия I, но в российских нормативных документах такого включения нет, и для многослойного защитного стекла и противопожарных перегородок пользуются критерием EIW, а для противопожарных дверей пользуются критерием EI [28]. Например, стекла класса EIW60 устойчивы к механическим повреждениям, способны задерживать жар и рост температуры до критического значения на протяжении 60 минут.

Противопожарные светопрозрачные конструкции можно разделить на несколько видов, которые отличаются по составу и технологии изготовления: [29]:

1. Закаленное монолитное стекло (Стекло, которое прошло обработку огнем в заводских условиях.)

2. Армированное противопожарное стекло (Стекло, состоящее из двух листов и проволочной сеткой между ними, которая удерживает всю конструкцию внутри рамы во время пожара.)

3. Многослойный пакет из закаленного стекла (С заполнением между листами огнезащитными лаками, аналогичными по свойствам материалам, используемым при пассивной защите строительных конструкций, вспучивающимися, коксующимися под воздействием высоких температур. Становясь непрозрачными, эти чередующиеся слои один за одним препятствуют распространению огня.)

4. Многослойное закаленное стекло (С пространством между листами, заполненным прозрачным полимерным многокомпонентным гелем на водной основе, вспенивающимся, поглощая тепло от воздействия огня, а затем кристаллизующимся в огнеупорную теплоизоляционную массу.)

5. Стеклокерамика (Стекло с практически нулевым показателем температурного расширения, что обеспечивает ему целостность при пожаре [30]).

3 Research of fire-resistant glass structures / Исследование огнестойких конструкций из стекла

3.1 Tempered monolithic glass / Закаленное монолитное стекло

Научная группа под руководством Yu Wang провели большой объем исследований характеристик одинарных закаленных стекол при пожаре, исследовали влияние условий крепления на разрушение стекла и другие параметры. Были исследованы время возникновения трещины, характер распространения трещины, скорость тепловыделения, температура поверхности стекла и потеря целостности остекления в сборе. На основе экспериментальных результатов обсуждается взаимосвязь между формой крепления и поведением трещин. Результаты показывают, что все трещины начинались в точке опоры и быстро пересекались, вызывая выпадение стекла. В статье [31] описаны огневые испытания стекол размером $1200 \times 1200 \times 6 \text{ мм}^3$ с четырехточечным креплением (спайдерное [32]), варьировалось расстояние от края панели до крепления. Лучше всего зарекомендовали себя стеклопакеты, опорные точки которых были расположены на расстоянии 10 см или 5 см от краев: такое расположение опор рекомендуется к проектированию из-за хорошей огнестойкости и структурной красоты таких стекол. В работе [33] рассматривались стекла того же размера (флоат-стекло и закаленное) с четырехточечным креплением и креплением в раму по краям. Был сделан вывод, что фасад из четырехточечного несъемного стекла обладает лучшей огнестойкостью, чем фасад со стеклами с закрытыми краями; и это может быть дополнительно улучшено за счет использования закаленных стекол. Было обнаружено, что испытанное закаленное стекло с точечной фиксацией выдержало центральную температуру $633 \text{ }^\circ\text{C}$ на открытой стороне без растрескивания. В исследовании [34] моделировались девять различных видов фасадов из низкоэмиссионного стекла с использованием трехмерного метода конечных элементов, чтобы исследовать влияние различных методов монтажа на поведение при разрушении при пожаре. Из девяти случаев панели, установленные в рамы с закрытыми краями, проще разбираются. Научная группа также изучила влияние места возгорания на тепловую реакцию стекла [35]. Из-за больших размеров и



различных форм установки стеклянные фасады работают по-разному при изменении местоположения пожара. Стеклянные фасады на каркасной основе более подвержены разрушению, если огонь локализован в центре стекла. Если очаг возгорания расположен близко к точкам крепления, стеклянные фасады с точечной опорой будут более подвержены разрушению.

Научная группа [36] сравнивала огнестойкость закаленных стекол разной толщины в ходе огневых испытаний. Результаты испытаний закаленного стекла толщиной 6 и 10 мм свидетельствуют о том, что при разрушении любого участка стекла весь кусок закаленного стекла трескается и полностью выпадает из рамы. Экспериментальные результаты также показывают, что критическая разница температур разрушения для закаленного стекла толщиной 6 мм составляет около 330-380°C, тогда как соответствующие значения для закаленного стекла толщиной 10 мм составляют приблизительно 470-590°C. Было отмечено, что как для закаленного стекла толщиной 6, так и для 10 мм, горизонтальное разделение окон на несколько небольших стекол с рамами может предотвратить полное выпадение всего закаленного стекла при пожаре.

Обычная высота бескаркасного остекления у всех основных мировых производителей ограничена 3.8 метрами [16], [37]. Группа ученых [16] провела эксперимент с остеклением огнестойкого стекла высотой 4.57 м и шириной 3.475 м, которое было протестировано в печи в Пожарной испытательной лаборатории, г. Весели-над-Лужници, Чехия. Образец состоял из трех стеклянных панелей, вертикальные зазоры между листами были заполнены с обеих сторон огнеупорной лентой и шпаклевкой для стекла. Термический отклик на неэкспонированной стороне образца измеряли термомпарами и анализировали с помощью термографической камеры. Уникальный противопожарный эксперимент, сосредоточенный на безрамном остеклении высотой более 4.5 м, был завершен за 49 минут из-за потери критерия целостности, соответственно, достигнута огнестойкость EI 45.

В работе [38] также проводились огневые испытания и исследовались малогабаритные и крупногабаритные монолитные однослойные стеклянные панели на примере огнестойкого стекла марки [39]. Образцы были вставлены в стальные и алюминиевые рамы и помещены под воздействие стандартного противопожарного режима. Было установлено, что стекло, вставленное в алюминиевую раму, имело более высокий предел огнестойкости (несмотря на то, что коэффициент температурных деформаций у алюминия в два раза выше, чем у стали), поскольку алюминиевые рамы полые и тонкостенные. Результаты моделирования также подтвердили, что стальные рамы деформировались более чем в два раза сильнее, чем алюминиевые, при воздействии огня. По результатам этого экспериментального исследования было выявлено, что предел огнестойкости при потере целостности малогабаритных образцов со стальным каркасом выше предела огнестойкости крупногабаритных образцов на 29%.

Китайские ученые [26] описали ряд проблем по использованию монолитных однослойных стекол. Зафиксированы случаи неправильного подбора рамы для такого стекла. Проектировщики и строители часто используют рамные конструкции с хорошим внешним видом и привлекательной ценой, но не рамы, указанные в отчете об испытаниях стекла на огнестойкость. Чтобы конструкция обладала заявленной проектной огнестойкостью важно, чтобы в стандартах было четко указано, как использовать огнестойкое стекло и какую конкретно применять к нему раму. Таким образом будет гарантирована правильная эксплуатация. Также исследователями было отмечено, что много проблем возникает из-за того, что в процессе создания огнестойкой ограждающей конструкции фигурирует много участников, субподрядчиков. Такое стекло нельзя разрезать прямо в здании, соответственно, его необходимо транспортировать на завод, а потом дополнительно обработать и транспортировать обратно. Из-за большого количества участвующих специалистов и транспортировок качество получаемого на выходе продукта очень трудно контролировать.

3.2 Laminated laminated glass / Ламинированное многослойное стекло

Многослойные огнестойкие стекла в научной литературе получили название ламинированных или триплекс [40], [41].

Ламинированное стекло представляет собой конструкцию стекла с очень высоким модулем упругости и эластомерного полимера под названием поливинилбутираль, который обладает очень низким модулем сдвига. Многослойное стекло образовано путем соединения двух слоев стекла очень тонким слоем мягкого полимера, как показано на Рис.3

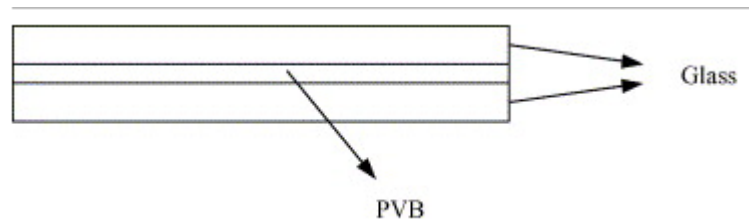


Рис.3 - Ламинированное стекло

Fig.3 - Laminated glass

По мере развития трещин в стекле соседние стекла способны перекрывать развивающиеся трещины за счет взаимодействия при сдвиге через полимерную прослойку, позволяя элементу деформироваться и перераспределять нагрузку через соседние стекла [42].

Модуль сдвига промежуточного слоя из полимера сильно меняется в зависимости от температуры, увеличиваясь с понижением температуры и уменьшаясь с повышением температуры. Температура, при которой скорость изменения свойств полимера претерпевает большие изменения, называют температурой стеклования, T_g . Полимеры являются твердыми, негибкими, стекловидными материалами при температурах значительно ниже T_g , тогда как они становятся эластичными при температурах значительно выше T_g [41].

Температура перехода чистого поливинилбутирала составляет от 49°C до 70°C [43]. Следовательно, при комнатной температуре (25 °C) это твердый, негибкий и стекловидный материал, который делает ламинированное стекло слишком хрупким и твердым. По этой причине в полимер добавляют пластификаторы для размягчения промежуточного слоя. Более мягкий промежуточный слой способствует ударопрочности. Поскольку пластификаторы имеют температуру перехода от -150 °C до -50 °C, добавление пластификаторов в промежуточный слой как понизит температуру перехода, так и увеличит диапазон перехода [41].

Многослойное противопожарное стекло, полученное методом воздушной сушки или in-situ с использованием $K_2O \cdot nSiO_2$, описанное в [44], [45], обеспечивает огневую и теплоизоляционную защиту людей, имущества и зданий при пожарах при минимизации потерь. Активно морфологией многослойных стекол на основе $K_2O \cdot nSiO_2$ занимается китайская научная группа под руководством Y. Mu [46–49]. Авторы [50] занимались определением рецептуры огнеупорного клея и полимера, обеспечивающего стабильность многослойного огнеупорного стекла с сохранением целостности и изоляции, в то же время сохраняющее прозрачность и стабильность при температуре окружающей среды от -40 °C до 60 °C.

Многослойное стекло исследовалось в сочетании со стеклом Low-E [51], которое стало очень популярным в 2010-е. Такое комбинированное двойное остекление дополнительно обладает эффектом уменьшения лучистого тепла [52].

В работе [53] многослойное стекло рассматривалось на предмет применения в качестве балюстрады балкона путем углубленного анализа эмпирических данных прошлых возгораний, произошедших в Канаде, Австралии, Англии. Было выявлено, что использование многослойного стекла не представляет опасности с точки зрения внешнего распространения огня. Ученые [54] подтверждают такой вывод, проведя дополнительные испытания по влиянию радиационного излучения на многослойное стекло, что характерно для ситуации с застекленным балконом и солнцем.

Группа европейских ученых [55] с помощью численного моделирования методом конечных элементов исследовала отклик многослойных стеклянных балок при комбинированном воздействии огня и постоянной нагрузки. Элементы могут выдерживать нагрузки в плоскости в течение 34–51 мин при огневой нагрузке до разрушения в соответствии с предельной скоростью прогиба, определенной в [40]. В работе [56] рассмотрены балки, которые состоят из стекла, а также других материалов (бетон, полимеры, металл, дерево).

3.3 Огнестойкие стеклопакеты / Fire-resistant double-glazed windows

В работе [57] ставилась задача найти наиболее бюджетное решение в отношении огнестойкости фасадов в случае, когда здания располагаются вблизи маршрутов транспортировки опасной продукции (например, нефтехимической), и существует возможность происхождения аварии. Рассматриваются высотные дома Роттердан Тауэр на полуострове



Роттердан, Нидерланды. Был рассмотрен сценарий возникновения пожара при столкновении двух судов внутреннего плавания, согласно местным правилам [58], это может привести к разливу 75 тонн легковоспламеняющейся жидкости, что в свою очередь создаст бассейн возгорания диаметром 25 м и высотой пламени почти 40 м. Огневому испытанию подвергались классические стеклопакеты с одинарными стеклами с изоляцией, Insulated Glass Unit, IGU. Блоки IGU с низкоэмиссионным покрытием в правильном положении смогли выдерживать тепловой поток в 41 кВт/м² в течение 27 минут и снизили уровень излучения на расстоянии 1 метра за стеклом до 2 кВт/м². Конфигурация с термоупрочненными стеклами не выходила из строя в течение 60 минут. Блок IGU испытывался повторно с модифицированными под европейские стандарты условия, он выдерживал воздействие в течение 40 минут. Блок IGU получил классификацию EUR30-ef в соответствии с EN 13501–2 “Fire classification of construction products and building elements” [59] и, следовательно, может эксплуатироваться в соответствии с маркировкой CE (соответствует основным требованиям директив Евросоюза).

В исследовании [60] рассматривается влияние 3-миллиметрового монолитного аэрогеля в зазоре маломасштабных прототипных систем остекления (двойное остекление) на оптические, тепловые характеристики и цветопередачу. Огнестойкие свойства стеклопакета с аэрогелевой изоляцией не были проверены, хотя аэрогель зарекомендовал себя как огнестойкий и негорючий материал [61] и уже эффективно применяется в стеклопакетах [62], так как в естественном виде он является прозрачным материалом [63].

3.4 Совершенствование программного обеспечения в области огнестойких стекол / Improvement of software in the field of fire-resistant glass

Полномасштабные огневые эксперименты являются дорогостоящими и требуют многих мер предосторожности, поэтому существует потребность в разработке эффективной вычислительной платформы для моделирования и прогнозирования режимов нагрева и охлаждения стеклянных фасадов.

Авторы статьи [64] предложили трехмерный метод конечных разностей (three-dimensional finite difference method (3DFDM)) для точного моделирования процессов нагрева и охлаждения фасадов из многослойного стекла, подверженных воздействию огня. 3DFDM продемонстрировал высокую вычислительную эффективность и точность при точном моделировании фаз нагрева и охлаждения, которые происходят в реальных сценариях пожара. Предложенный метод моделирования был применен для исследования влияния толщины полимера на характеристики нагрева и охлаждения многослойного стекла, при этом особый интерес вызвала температура второго слоя стекла (окружающей поверхности). Результаты моделирования показывают, что каждое увеличение толщины полимера на 0.38 мм снижает температуру во втором слое стекла примерно на 7°C. Кроме того, охлаждение второго слоя стекла задерживается примерно на 4 с.

Ученые [65] протестировали программное обеспечение FEM EASY, чтобы исследовать эффекты, возникающие при воздействии огня на стекло. Приложение было разработано авторами [66]. Температурные нагрузки были рассчитаны таким образом, чтобы достаточно точно соответствовать реальным сценариям пожара. Путем моделирования были получены поле напряжений и развитие трещин, вызванные переменными перепадами температур t . Сделан вывод, что программное обеспечение FEM EASY может помочь смоделировать тепловую реакцию стекла и распространение трещин при пожаре, но также необходимы дополнительные исследования для улучшения программного обеспечения.

4 Торговые марки огнестойких стекол / Trademarks of fire-resistant glasses

Результатом активной научной деятельности в области огнестойкости светопрозрачных конструкций стало появление на строительном рынке множества видов стекол, марок и брендов. Лидирующие представители перечислены в Таблице 1 с описанием их продукции.

Таблица 1. Торговые марки огнестойких стекол
Table 1. Trademarks of fire-resistant glass

№	Компания	Торговая марка	Характеристика
---	----------	----------------	----------------



1	Glaverbel (Бельгия)	Стекло Pyrobel	Многослойные пожаробезопасные стекла, отвечают критериям целостности и теплоизоляции (EI) и имеют пределы огнестойкости 15, 30, 45, 60, 90 или 120 минут (толщина 7-52 мм) [67–69]
2	Saint-Gobain (Франция)	Fivestar Pyroswiss Vetroflam Swissflame lite Conraflam	Fivestar монолитное стекло толщиной 5 мм с огнестойкостью 30 минут. Используется внутри здания. Pyroswiss (6-19 мм) - огнестойкое стекло, которое можно использовать в стеклопакете или в качестве составляющего в ламинированном стекле. Vetroflam - монолитное стекло класса EW с огнестойкостью до 60 мин. Swissflame lite (9 мм и более) обеспечивает огнестойкость в пределах 30 до 60 мин и состоит из 2-х или более листов. Conraflam - стекло класса EI, состоящее из двух закаленных стекол. Огнезащита 30 мин при толщине 16 мм, 90 мин при толщине 31 мм [70].
3	Pilkington (Великобритания)	Стекло Pyrostop	Огнестойкое ламинированное стекло (до 129 минут) для использования во внутренних и наружных помещениях, ударопрочное, пулепрочное [71]. Можно комбинировать со встроенными жалюзи Vision [72].
4	Schott (Германия)	Pyran S	Закаленное боросиликатное стекло E60 [28]
5	Promat (Чехия)	System Glass	Многослойное вспенивающееся EIW (EIW-30, EIW-60, EIW-90) [28].
6	Фототех (Россия)	ФТ-1	Монолитное (однослойное) стекло собственной разработки, которое подвергается специальной закалке и особой механической обработке, что обеспечивает огнестойкость и позволяет применять его в конструкциях огнестойкостью E15, E30 и E60 [39].
7	Техно Euroglass (Россия)	FireClass	Огнестойкие стекла E 60 (6,8,10 мм) применяются в окнах и фасадах. Стекла класса EIW 15- EIW 45 используются в составе стеклопакета (двери, люки, перегородки) [73].

Перечисленные компании активно занимаются научной деятельностью и создают инновационные огнестойкие продукты. В основе созданных инноваций, как правило, лежат объекты патентного права, такие, как изобретения, полезные модели, промышленные образцы. Например, Vetrotech Saint-Gobain International Ag в 2002 выдан патент US 6479155 B1 “Fire-resistant laminated glass pane assembly” [74]. Ученые разработали узел огнестойкого многослойного стеклопакета со стеклокерамическим стеклом, устойчивым к высоким температурам. Указанное стекло соединено на каждой из двух своих граней с силикатным стеклом посредством прозрачных промежуточных слоев из термопластичного полимера, обладающего высоким эффектом фиксации осколков. Силикатные стекла состоят из закаленного флоат-стекла. Огнезащитные стекла этого типа не только обладают высоким огнезащитным эффектом, но и выдерживают так называемое испытание водой для тушения. Также они разработали EP 0970930 B1 “Fire-resistant glass” (2006) [75], EP 1161343 B1 “Fire Protection Glass” (2006) [76], EP 0890431 B1 “Fireproof laminated glazing” (2006) [77], а один из последних является патент EP 2132393 B1 “Fire-Protection Composite Glass for Construction Elements Such as Doors, Walls, or Windows” (2017) [78].

5 Discussion / Обсуждение

Полномасштабные огневые эксперименты являются дорогостоящими и требуют многих мер предосторожности, поэтому в большинстве работ по пожарной безопасности в качестве метода исследования применяют метод моделирования [79]–[81], который не всегда способен до конца



отразить происходящую ситуацию. Изучение любых огнестойких конструкций по возможности следует проводить в ходе огневых испытаний, так как от этих результатов напрямую зависит жизнь и безопасность людей. Важно также учитывать масштабный фактор. На практике в высотных строительных комплексах используется сплошное остекление по всей высоте здания, которое составляет около 3–4 м, но лишь малое количество научных работ посвящено крупногабаритным образцам, это отмечается в работе [16]. В работе [38] исследованы стеклянные образцы одного и того же состава, но разных размеров и результаты отличаются, т.е. размер и масштаб сказываются на итоговых результатах, и это нужно учитывать.

В качестве огнестойких светопрозрачных конструкций рассмотрены стеклопакеты с аэрогелевой изоляцией [60], подобные стеклопакеты уже используются на практике [62], однако, научных работ, посвященных огневому испытанию инновационных стеклопакетов не обнаружено. Аэрогель ранее зарекомендовал себя как эффективное средство против пожара. Например, ученые предложили аэрогелевое огнетушащее вещество со специальным механизмом вспенивания при воздействии тепла [82], которое на практике смогло эффективно справиться с поставленной задачей. В работе [83] было описано приготовление аэрогеля с превосходной огнестойкостью, прочностью и гидрофобностью с помощью общей стратегии ограниченного золь-гель перехода. Аэрогели обладают хорошей термостойкостью, задерживая распространение тепла [84]. Ученые [85] обнаружили, что аэрогель может эффективно снижать скорость выделения тепла, а модифицированный аэрогель (например, [86]) обладает огнестойкостью, что указывает на возможность применения аэрогеля для огнезащитных материалов. Аэрогель исследуется на огнестойкость, но преимущественно его рассматривают как энергоэффективный материал в качестве инновационного утеплителя [87], [88] или в виде остекления [89], [90]. Исследований стеклопакетов с аэрогелем на огневую нагрузку не найдено.

В данном обзоре был проведен всесторонний анализ только огнестойких стекол и огнестойких стеклянных конструкций. В дальнейшем можно провести обобщающий обзор огнестойких конструкций, в которых будет сочетаться стекло с другими строительными материалами, которые могут привнести в конструкцию другие полезные свойства.

6 Conclusions / Выводы

1. Наукометрический анализ статей по теме «Огнестойкие стекла» в научной базе The Lens выявил ежегодный прирост статей в этой области, что позволяет сделать вывод, что тема является востребованной и популярной. Объем работ по данной теме составляет 1–1.3% (ноябрь 2023г.) от количества работ, посвященных стеклянным конструкциям.

2. Рассмотрены научные работы по монолитным и ламинированным стеклам на предмет влияния условий крепления на разрушение стекла и другие параметры при пожаре. Анализ исследований огнестойких стекол выявил недостаток испытаний крупномасштабных стеклянных образцов огневой нагрузкой.

3. Рассмотрены инновационные стеклопакеты с аэрогелевой изоляцией, так как аэрогель является огнестойким материалом и такие стеклопакеты уже применяются на практике. Однако, масштабных исследований стеклопакетов с аэрогелем на огневую нагрузку не обнаружено.

4. Лидерами в производстве огнестойких стекол являются компании Glaverbel, Saint-Gobain, Pilkington, Schott, Promat, Фототех и Техно Euroglass. Эти компании производят монолитные и многослойные стекла с различными показателями целостности (E), изоляции (I) и излучения (W). Также компании создают объекты патентного права, такие, как изобретения, полезные модели, промышленные образцы.

References

- 1 Liu, X., Yang, Y. and Qiu, J. (2022) Emerging Techniques for Customized Fabrication of Glass. *Journal of Non-Crystalline Solids: X*, Elsevier, **15**, 100114. <https://doi.org/10.1016/J.NOCX.2022.100114>.
- 2 Ozeki, Y., Takabayashi, T. and Tanabe, S. ichi. (2005) Effects of Spectral Properties of Glass on the Thermal Comfort of Car Occupants. *Elsevier Ergonomics Book Series*, Elsevier, **3**, 289–297. [https://doi.org/10.1016/S1572-347X\(05\)80047-3](https://doi.org/10.1016/S1572-347X(05)80047-3).



- 3 Ray, C.S., Ramachandran, N. and Rogers, J. (2005) Developing Glassy Magnets from Simulated Composition of Moon/Mars Regolith for Exploration Applications. *MRS Proceedings*, **851**, 487–496. <https://doi.org/10.1557/proc-851-nn10.5>.
- 4 Chao, L., Sun, C., Peng, L., Li, J., Sun, M., Bao, L., Liu, J. and Ma, Y. (2023) Passive Energy-Saving Buildings Realized by the Combination of Transparent Heat-Shielding Glass and Energy Storage Cement. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **365**, 130023. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130023>.
- 5 Quagliarini, E. and D’Orazio, M. (2010) Light Vaults With Frescoes or Stuccoes Strengthened by Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) — the Role of the Reinforcement on Intrados Strains: First Experimental Data. *International Journal of Architectural Heritage*, Routledge, **4**, 320–336. <https://doi.org/10.1080/15583050903115069>.
- 6 Du, J., Youngman, R., Qiu, J. and Almeida, R.M. (2022) A Window to the Future: Frontiers of Glass Research from a World Perspective. *Journal of Non-Crystalline Solids: X*, Elsevier, **16**, 100127. <https://doi.org/10.1016/J.NOCX.2022.100127>.
- 7 Soudani, S., Gars, L. Le, Morizet, Y., Deniard, P., Gautron, E. and Grolleau, S. (2023) High-Pressure Glass-Ceramics for Iodine Nuclear Waste Immobilization: Preliminary Experimental Results. *Ceramics International*, Elsevier, **49**, 30029–30038. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2023.06.260>.
- 8 Youngman, R.E. (2022) Silicate Glasses and Their Impact on Humanity. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, GeoScienceWorld, **87**, 1015–1038. <https://doi.org/10.2138/RMG.2022.87.22>.
- 9 Luo, H., Zhang, Y., Yu, J., Dong, X. and Zhou, T. (2023) Additive, Subtractive and Formative Manufacturing of Glass-Based Functional Micro/Nanostructures: A Comprehensive Review. *Materials & Design*, Elsevier, **233**, 112285. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2023.112285>.
- 10 Lazauskas, A. and Grigaliunas, V. (2012) Float Glass Surface Preparation Methods for Improved Chromium Film Adhesive Bonding. *Medziagotyra*, **18**, 181–186. <https://doi.org/10.5755/J01.MS.18.2.1924>.
- 11 Hong, Z., Ye, P., Loy, D.A., Loy, D.A., Loy, D.A. and Liang, R. (2021) Three-Dimensional Printing of Glass Micro-Optics. *Optica*, Vol. 8, Issue 6, pp. 904-910, Optica Publishing Group, **8**, 904–910. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.422955>.
- 12 Yu, F. and Leng, J. (2020) Multivariable Interactions in Simulation-Based Energy-Saving Glass Roof Designs. *Solar Energy*, Pergamon, **201**, 760–772. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.02.095>.
- 13 El-Shami, M.M. and Kandeel, K.S. (2011) Structural Behaviour of Glass Folded Plate Curtain Walls. *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*, **4**, 69–78. <https://doi.org/10.1080/19373260.2011.555498>.
- 14 Dodd, G. (2004) Structural Glass Walls, Floors and Roofs. *Structural Engineering International*, Taylor & Francis, **14**, 88–91. <https://doi.org/10.2749/101686604777963955>.
- 15 Turkmen, B. and Eskin Bacaksiz, F. (2021) Does the Glass Elevator Still Work: A Descriptive and Cross-Sectional Study in the Context of Gender in Turkey. *Journal of Nursing Management*, John Wiley & Sons, Ltd, **29**, 1275–1283. <https://doi.org/10.1111/JONM.13266>.
- 16 Machalická, K., Charvátová, M., Eliášová, M. and Kuklík, P. (2016) The Behaviour of Fire Resistant Glass under Fire. *Structures and Architecture - Proceedings of the 3rd International Conference on Structures and Architecture, ICSA 2016*, CRC Press/Balkema, 991–997. <https://doi.org/10.1201/B20891-137/BEHAVIOUR-FIRE-RESISTANT-GLASS-FIRE-MACHALICK>.
- 17 Bedon, C. (2017) Structural Glass Systems under Fire: Overview of Design Issues, Experimental Research, and Developments. *Advances in Civil Engineering*, Hindawi Limited, **2017**. <https://doi.org/10.1155/2017/2120570>.
- 18 Cong, S., Yongjun, Z., Yanqing, Z., Weina, S., Xiudi, X., Gang, X. and Runqiang, C. (2019) Preparation of Smart Glass with Superhydrophobic and Thermochromic Properties. *Chemical Physics Letters*, North-Holland, **723**, 65–68. <https://doi.org/10.1016/J.CPLETT.2019.03.031>.
- 19 Bocchese, F., Brown, I., Cornil, D., Moskovkin, P., Muller, J., Kenny, S.D., Smith, R. and Lucas, S. (2023) Low-E Glass Improvement by the Understanding and Control of the Ag Growth. *Applied Surface Science*, North-Holland, **611**, 155600. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2022.155600>.
- 20 Structural Use of Glass - Matthias Haldimann, Andreas Luible, Mauro Overend - Google Книги. https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=zljQw1ghHxAC&oi=fnd&pg=PA1&ots=4FOoqqhNAw&sig=Gu1Azj2mdc3Mdl8lkizpt85G8F0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.



- 21 Hrbáček, P. and Vašina, M. (2022) Study of Light Transmission and Noise Attenuation Properties of Light Active Glass Materials. <http://journalmt.com/doi/10.21062/mft.2022.062.html>, *Manufacturing Technology*, **22**, 542–549. <https://doi.org/10.21062/MFT.2022.062>.
- 22 Fiorini, C.V., Merli, F., Belloni, E., Anderson, A.M., Carroll, M.K. and Buratti, C. (2023) Glazing Systems with Thin Monolithic Aerogel: Optical, Thermal, and Color Rendering Performance. *Energy and Buildings*, Elsevier, **288**, 113009. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113009>.
- 23 Nemova, D.V., Vasileva, I.L. and Vatin, N.I. (2019) Introduction of Double-Skin Facades in the Russian Federation. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **84**, 51–62. <https://doi.org/10.18720/CUBS.84.4>.
- 24 Materials for Engineering - J Martin - Google Книги. https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=ALxQAAWAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=aF5OvPhKPy&sig=3z9G1WNjw1tHQdAabbBLz7CWwxQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- 25 Chen, X., Chen, X., Chan, A., Cheng, Y. and Wang, H. (2022) A FDEM Parametric Investigation on the Impact Fracture of Monolithic Glass. *Buildings 2022, Vol. 12, Page 271*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **12**, 271. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12030271>.
- 26 Yang, Z., Zhao, X., Wu, X. and Li, H.L. (2011) Application and Integrity Evaluation of Monolithic Fire-Resistant Glass. *Procedia Engineering*, No longer published by Elsevier, **11**, 603–607. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.04.702>.
- 27 Zhang, Y., Wang, Q.S., Zhu, X. Bin, Huang, X.J. and Sun, J.H. (2011) Experimental Study on Crack of Float Glass with Different Thicknesses Exposed to Radiant Heating. *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, **11**, 710–718. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.04.717>.
- 28 Klimin, N. (2012) Classification of Fire-Resistant Glass of European Manufacturers. *Translucent structures*, **3**, 28-31. https://www.brandglas.ru/upload/3-2012_Klimin_article_02_180712.pdf.
- 29 Fire-Resistant Glass: Types, Testing, Application. <https://fireman.club/statyi-polzovateley/protivopozharnyie-ognestoykie-stekla-tipyi-ispyitanie-primenenie/>.
- 30 Nakane, S. (2022) Recent Research on Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ Glass-Ceramics for Expansion of Applications. *Journal of Non-Crystalline Solids: X*, Elsevier, **16**, 100121. <https://doi.org/10.1016/J.NOCX.2022.100121>.
- 31 Wang, Y., Wang, Q., Shao, G., Chen, H., Su, Y., Sun, J., He, L. and Liew, K.M. (2014) Fracture Behavior of a Four-Point Fixed Glass Curtain Wall under Fire Conditions. *Fire Safety Journal*, Pergamon Press, **67**, 24–34. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2014.05.002>.
- 32 Wang, Y., Yuan, H., Shi, Y. and Zou, Y. (2012) Bearing Capacity of Non-Linear Metallic Spiders Used in Point Supported Glass Facades. *International Journal of Steel Structures*, Springer, **12**, 191–204. <https://doi.org/10.1007/S13296-012-2004-Z/METRICS>.
- 33 Wang, Y., Wang, Q., Shao, G., Chen, H., Su, Y., Sun, J., He, L., Wen, J.X., Zong, R. and Liew, K.M. (2014) Experimental Study on Thermal Breakage of Four-Point Fixed Glass Façade. *Fire Safety Science*, International Association for Fire Safety Science, 666–676. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-666>.
- 34 Wang, Y., Wu, Y., Wang, Q., Liew, K.M., Chen, H., Sun, J. and He, L. (2014) Numerical Study on Fire Response of Glass Facades in Different Installation Forms. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **61**, 172–180. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.03.012>.
- 35 Wang, Y., Wang, Q., Sun, J., He, L. and Liew, K.M. (2016) Influence of Fire Location on the Thermal Performance of Glass Façades. *Applied Thermal Engineering*, Pergamon, **106**, 438–442. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.06.057>.
- 36 Xie, Q., Zhang, H., Wan, Y., Zhang, Q. and Cheng, X. (2008) Full-Scale Experimental Study on Crack and Fallout of Toughened Glass with Different Thicknesses. *Fire and Materials*, **32**, 293–306. <https://doi.org/10.1002/FAM.968>.
- 37 Požární Zkouška s Rekordními Výsledky - TZB-Info. <https://stavba.tzb-info.cz/zaskleni/11429-pozarni-zkouska-s-rekordnimi-vysledky>.
- 38 Gravit, M., Shabunina, D., Stratiy, P., Kotlyarskaya, I.L. and Sychov, M. (2023) The Effects of the Large-Scale Factor on the Integrity Parameters of Monolithic Fire-Resistant Glass. *Fire 2023, Vol. 6, Page 114*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **6**, 114. <https://doi.org/10.3390/FIRE6030114>.
- 39 Smirnov, G.V. (2003) The Market of Translucent Fire-Fighting Structures. *Ognezashita*, **4**, 56–61. <https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-svetoprozrachnyh-protivopozharnyh-konstruktsiy/viewer>.
- 40 European committee for Standardization. (2005) ISO - ISO 12543-1:2011 - Glass in Building - Laminated Glass and Laminated Safety Glass - Evaluation of Conformity/Product Standard. 1–52.



- 41 Aşık, M.Z. and Tezcan, S. (2006) Laminated Glass Beams: Strength Factor and Temperature Effect. *Computers & Structures*, Pergamon, **84**, 364–373. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2005.09.025>.
- 42 Debuyser, M., Sjöström, J., Lange, D., Honfi, D., Sonck, D. and Belis, J. (2017) Behaviour of Monolithic and Laminated Glass Exposed to Radiant Heating. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **130**, 212–229. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.09.139>.
- 43 Su, R., Zhang, Z., Love, B.J. and Shih, A.J. (2023) Fused Filament Fabrication of Nylon beyond the Glass Transition Temperature in a Thermally-Insulated Machine. *Manufacturing Letters*, Elsevier, **35**, 797–804. <https://doi.org/10.1016/J.MFGLET.2023.08.120>.
- 44 Kovářik, T., Křenek, T., Rieger, D., Pola, M., Říha, J., Svoboda, M., Beneš, J., Šutta, P., Bělský, P. and Kadlec, J. (2017) Synthesis of Open-Cell Ceramic Foam Derived from Geopolymer Precursor via Replica Technique. *Materials Letters*, North-Holland, **209**, 497–500. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2017.08.081>.
- 45 Chen, J., Ao, Y., Lin, T., Yang, X., Peng, J., Huang, W., Li, J. and Zhai, M. (2016) High-Toughness Polyacrylamide Gel Containing Hydrophobic Crosslinking and Its Double Network Gel. *Polymer*, Elsevier, **87**, 73–80. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2016.01.069>.
- 46 Mu, Y., Yang, Y., Xu, L., Zhang, Y., Hu, Y. and Xu, Z. (2021) In-Situ Preparation and Performance of Cold Resistant $K_2O \cdot 5SiO_2$ Based Anti-Fire Glass. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **308**, 125067. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125067>.
- 47 Mu, Y., Han, L., Du, D., Yang, Y. and Li, X. (2022) Reversible Thermochromic and Thermal Insulation Performances of $K_2O \cdot nSiO_2$ Based Fire-Resistant Glass via in-Situ Preparation. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **344**, 128168. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128168>.
- 48 Mu, Y., Meng, T., Lv, S., Liu, C., Chen, F., Xin, L. and Li, X. (2022) Performance of $K_2O \cdot nSiO_2$ Based Laminated Anti-Fire Glass: Influence of Nanoporous Morphology. *Materials Today Communications*, Elsevier, **33**, 104744. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2022.104744>.
- 49 Mu, Y., Xin, L., Liu, H., Lv, S., Chen, W., Meng, T. and Li, X. (2023) Performance of Ultrathin $K_2O \cdot nSiO_2$ Based Laminated Anti-Fire Glass: Influence of Viscosity and Morphology. *Materials Today Communications*, Elsevier, **35**, 105866. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2023.105866>.
- 50 Yang, Z. Research on Laminated Fire-Resistant Glass with High Transparency and No Micro-Bubbles. *Journal of Wuhan University of Technology*. <https://lens.org/161-207-934-582-785>.
- 51 Meng, D.M., Li, B.Q., Zeng, M.Y., Li, C.H. and Dai, R.C. (2014) Study on Optical and Thermal Properties of Low-E Glass. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd, **1035**, 458–463. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.1035.458>.
- 52 Suzuki, K., Hisada, T., Sato, A. and Ohmiya, Y (2018) Experimental study for laminated glass composed of tempered fire resistance glass exposed to standard heating, *Journal of Environmental Engineering*, **83**, 415–424. <https://doi.org/10.3130/aije.83.415>.
- 53 Binte Mohd Faudzi, F., Schulz, J. and Dodd, G. (2021) Qualitative Assessment of Fire Hazard Posed by Laminated Glass Balcony Balustrades on Fire Spread. *Fire Technology*, Springer US, **57**, 1951–1967. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01085-8>.
- 54 Rickard, I., Spearpoint, M. and Lay, S. (2021) The Performance of Laminated Glass Subjected to Constant Heat Fluxes Related to Building Fires. *Fire and Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **45**, 283–295. <https://doi.org/10.1002/FAM.2939>.
- 55 Louter, C., Bedon, C., Kozłowski, M. and Nussbaumer, A. (2021) Structural Response of Fire-Exposed Laminated Glass Beams under Sustained Loads; Exploratory Experiments and FE-Simulations. *Fire Safety Journal*, **123**. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103353>.
- 56 Martens, K., Caspeele, R. and Belis, J. (2015) Development of Composite Glass Beams – A Review. *Engineering Structures*, Elsevier, **101**, 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.07.006>.
- 57 Koudijs, J. and Csoke, C. (2013) Fire Resistance without Fire Resistant Glazing. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, **9**. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/20130902001>.
- 58 Stoffen G., Methods for Calculation of Physical Effects. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. <https://pdf4pro.com/view/methods-for-calculation-of-physical-effects-1518b.html>.
- 59 EN 13501-2:2023 - Fire Classification of Construction Products and Building Elements - Part 2: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6f992261-dd87-44fd-90a0-d52dc526bf0b/en-13501-2-2023>.



- 60 Fiorini, C.V., Merli, F., Belloni, E., Anderson, A.M., Carroll, M.K. and Buratti, C. (2023) Glazing Systems with Thin Monolithic Aerogel: Optical, Thermal, and Color Rendering Performance. *Energy and Buildings*, Elsevier, **288**, 113009. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113009>.
- 61 Vasileva, I.L. and Nemova, D.V. (2018) Prospects of Using Aerogels in Construction. *AlfaBuild*, **6**, 135–145. <https://doi.org/10.34910/ALF.6.12>.
- 62 Kopylov A.B., Liubin N.S., G.V.O. (2019) The Use of Aerogel Glazing Facades of Buildings. *The Eurasian Scientific Journal*, **2**. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-aerogelya-pri-osteklenii-fasadov-zdaniy>.
- 63 Kotlyarskaya, I.L., Iakovlev, N.A., Vatin, N.I. and Nemova, D.V. (2022) Modular Energy-Efficient Enclosing Structures with the Aerogel Thermal Insulation. A Review. *AlfaBuild*, **24**, 2402–2402. <https://doi.org/10.57728/ALF.24.2>.
- 64 Abdoh, D.A., Zhang, Y., Ademiloye, A.S., Kodur, V.K.R. and Liew, K.M. (2023) Modeling of Heating and Cooling Behaviors of Laminated Glass Facades Exposed to Fire with Three-Dimensional Flexibilities. *Composite Structures*, Elsevier, **314**, 116961. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.116961>.
- 65 Wang, Y., Wang, Q., Fan, X. and Sun, J. (2013) Simulating the Thermal Response of Glass under Various Shading Conditions in a Fire. *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, **62**, 702–709. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2013.08.116>.
- 66 Wang, Q., Zhang, Y., Wang, Y., Sun, J. and He, L. (2012) Dynamic Three-Dimensional Stress Prediction of Window Glass under Thermal Loading. *International Journal of Thermal Sciences*, Elsevier Masson s.r.l., **59**, 152–160. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2012.03.018>.
- 67 Hee, W.J., Alghoul, M.A., Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M.A., Alrubaih, M.S. and Sopian, K. (2015) The Role of Window Glazing on Daylighting and Energy Saving in Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Pergamon, **42**, 323–343. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.09.020>.
- 68 Hassouneh, K., Alshboul, A. and Al-Salaymeh, A. (2010) Influence of Windows on the Energy Balance of Apartment Buildings in Amman. *Energy Conversion and Management*, Pergamon, **51**, 1583–1591. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2009.08.037>.
- 69 Inglisa, A. (2022) Stopray Window Panes: Use and Restoration in Various Brussels Buildings. *History of Construction Cultures - Proceedings of the 7th International Congress on Construction History, TICCH 2021*, CRC Press/Balkema, **1**, 329–336. <https://doi.org/10.1201/9781003173359-43/STOPRAY-WINDOW-PANES-USE-RESTORATION-VARIOUS-BRUSSELS-BUILDINGS-INGLISA>.
- 70 Product | Saint-Gobain Glass. <https://www.saint-gobain-glass.com/product?f%5B0%5D=benefit%3A506>.
- 71 La Ferla, G., Acha Román, C.A. and Roset Calzada, J. (2020) Radiant Glass Façade Technology: Thermal and Comfort Performance Based on Experimental Monitoring of Outdoor Test Cells. *Building and Environment*, Pergamon, **182**, 107075. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.107075>.
- 72 Pilkington Pyrostop® - Fire-Rated, Safety-Rated Glass Firewalls. <https://www.fireglass.com/products/glass/pilkington-pyrostop/>.
- 73 Fire-Fighting Glass “FireClass” for Fire-Resistant Translucent Structures. <https://fireclass.pro/glass/>.
- 74 US 6479155 B1 - Fire-Resistant Laminated Glass Pane Assembly | The Lens. <https://www.lens.org/lens/patent/066-579-542-685-105/frontpage?l=en>.
- 75 EP 0970930 B1 - Fire-Resistant Glass | The Lens. <https://www.lens.org/lens/patent/056-241-694-111-812/frontpage?l=en>.
- 76 EP 1161343 B1 - Fire Protection Glass | The Lens. <https://www.lens.org/lens/patent/104-967-139-641-605/frontpage?l=en>.
- 77 EP 0890431 B1 - Fireproof Laminated Glazing | The Lens. <https://www.lens.org/lens/patent/036-774-630-161-665/frontpage?l=en>.
- 78 EP 2132393 B1 - Fire-Protection Composite Glass for Construction Elements Such as Doors, Walls, or Windows | The Lens. <https://www.lens.org/lens/patent/026-086-881-833-583/frontpage?l=en>.
- 79 Tang, C., Zhou, L. and Liu, Z. (2021) Design and Research of Fire Safety Simulation Based on Computer Simulation. *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3501409.3501655>.



- 80 Aimin, H. Fire Simulation Based on Video Sequences. *Journal of Computer Applications*.
<https://lens.org/025-357-104-618-841>.
- 81 Van Hees, P. (2013) Validation and Verification of Fire Models for Fire Safety Engineering.
Procedia Engineering, Elsevier Ltd, **62**, 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.052>.
- 82 Liu, C., Zhu, G., Chen, C., Guo, X., An, C. and Ding, J. (2023) Research on the Fire-Extinguishing
Effectiveness of a New Nano-Scale Aerogel Fire-Extinguishing Agent. *Thermal Science and
Engineering Progress*, Elsevier, **37**, 101625. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2022.101625>.
- 83 Li, X., Dong, G., Liu, Z. and Zhang, X. (2021) Polyimide Aerogel Fibers with Superior Flame
Resistance, Strength, Hydrophobicity, and Flexibility Made via a Universal Sol-Gel Confined
Transition Strategy. *ACS Nano*, American Chemical Society, **15**, 4759–4768.
https://doi.org/10.1021/ACS.NANO.0C09391/SUPPL_FILE/NN0C09391_SI_001.PDF.
- 84 Yang, X., Duan, Y., Feng, X., Chen, T., Xu, C., Rui, X., Ouyang, M., Lu, L., Han, X., Ren, D.,
Zhang, Z., Li, C. and Gao, S. (2020) An Experimental Study on Preventing Thermal Runaway
Propagation in Lithium-Ion Battery Module Using Aerogel and Liquid Cooling Plate Together. *Fire
Technology*, Springer, **56**, 2579–2602. <https://doi.org/10.1007/S10694-020-00995-X/METRICS>.
- 85 Nabipour, H., Nie, S., Wang, X., Song, L. and Hu, Y. (2020) Zeolitic Imidazolate Framework-
8/Polyvinyl Alcohol Hybrid Aerogels with Excellent Flame Retardancy. *Composites Part A: Applied
Science and Manufacturing*, Elsevier, **129**, 105720.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2019.105720>.
- 86 Guo, L., Chen, Z., Lyu, S., Fu, F. and Wang, S. (2018) Highly Flexible Cross-Linked Cellulose
Nanofibril Sponge-like Aerogels with Improved Mechanical Property and Enhanced Flame
Retardancy. *Carbohydrate Polymers*, Elsevier, **179**, 333–340.
<https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2017.09.084>.
- 87 Golder, S., Narayanan, R., Hossain, M.R. and Islam, M.R. (2021) Experimental and CFD
Investigation on the Application for Aerogel Insulation in Buildings. *Energies 2021, Vol. 14, Page
3310*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 3310. <https://doi.org/10.3390/EN14113310>.
- 88 Balaji, D., Sivalingam, S., Bhuvaneshwari, V., Amarnath, V., Adithya, J., Balavignesh, V. and
Ganesh surya, R. (2022) Aerogels as Alternatives for Thermal Insulation in Buildings – A
Comparative Teeny Review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **62**, 5371–5377.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.03.541>.
- 89 Leung, C.K., Lu, L., Liu, Y., Cheng, H.S. and Tse, J.H. (2020) Optical and Thermal Performance
Analysis of Aerogel Glazing Technology in a Commercial Building of Hong Kong. *Energy and Built
Environment*, Elsevier, **1**, 215–223. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2020.02.001>.
- 90 Liu, Y., Chen, Y., Lu, L., Peng, J., Zheng, D. and Lu, B. (2023) Optical Path Model and Energy
Performance Optimization of Aerogel Glazing System Filled with Aerogel Granules. *Applied
Energy*, Elsevier, **334**, 120623. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.120623>.