This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Research Article
ISSN 2304-6295
Received: April 30, 2025 *Accepted: June 8, 2025* *Published: July 11, 2025*

Gel-filled structures: the influence of frame size on fire resistance

Gravit, Marina Viktorovna[1]
Atroshchenko, Grigory Nikolaevich[2]
Filonenko, Ivan Andreevich[2]
Chugunov, Vladimir Alexandrovich[2]
Zinevich, Pavel Pavlovich[2]
Kotlyarskaya, Irina Leonidovna[1*]
Antonov, Maksim Dmitrievich[1]

[1] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; marina.gravit@mail.ru (G.M.V.); iravassilek@mail.ru (K.I.L.); antomaxnov2019@yandex.ru (A.M.D.)
[2]Phototech LLC, Moscow, Russian Federation; g.atroschenko@phototech.ru (A.G.N.); filonenko@phototech.ru (F.I.A); v.chugunov@phototech.ru (Ch.V.A.); p.zinevich@phototech.ru (Z.P.P.)
Correspondence:* email iravassilek@mail.ru; contact phone +79095863919

Keywords:

Translucent structures, Glass structures, Gel-filled glass units, Fire resistance limit, Scale factor

Abstract:

The object of the research is the influence of frame size on fire resistance of gel-filled structures. **The research method** consisted of determining the time it takes for gel-filled glass unit samples to reach the ultimate limit state (EIW) during a standard fire test in a furnace under standard temperature conditions. **Research results.** The scale factor has a significant impact on the fire resistance of the structure. Square shapes of gel-filled glass units have better fire resistance results compared to rectangular ones. For the tested rectangular glasses, the actual fire resistance limit is EI/EW30 and EI/EW45, while for small-sized glasses and square samples it is EI/EW60. Poor adhesion of the gel to the glass reduces its fire resistance. The use of FT-1 glasses prevents cracks on the unheated surface, which is especially important for large-sized samples. Increasing the gel thickness by 2-4 mm increases the fire resistance limit to 15 minutes. Compliance with technological standards for storage and installation is critically important for achieving the declared fire resistance indicators.

1 Introduction

В зданиях все чаще используется стекло в качестве ключевого конструкционного материала. Применение стекла обусловлено рядом факторов, включая высокие показатели светопропускания, эстетическую привлекательность и возможность создания энергоэффективных зданий [1]. Для создания визуально легких и лаконичных зданий используются стеклянные панели разных размеров и форм [2], но в тоже время их применение осложняет соблюдение требований пожарной безопасности. Пожары, происходящие в остекленных сооружениях, развиваются по иной динамике, чем в зданиях, где большую площадь ограждающих конструкций занимают такие материалы, как кирпич, строительные блоки (пенобетон, газобетон и др.), монолит (бетон) или железобетонные панели. В работе [3] выделены характерные особенности пожаров в зданиях со светопрозрачными ограждающими конструкциями. Основными особенностями являются быстрое распространение пожара по элементам светопрозрачных фасадов зданий, обрушение элементов светопрозрачных фасадов зданий, способствующих распространению пожара на нижележащие этажи, и большой радиус разлёта элементов светопрозрачных фасадов. В отличие от кирпича, строительных блоков, монолита или железобетонных панелей, стекло имеет повышенную чувствительность к

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

термическим и механическим нагрузкам. Под воздействием высоких температур или резкого охлаждения в стекле формируются термические напряжения, обусловленные перепадом температур. Экспериментальные данные свидетельствуют, что для обычного флоат-стекла критическим является перепад температур, достигающий 40°C [4]. При таких условиях растягивающие напряжения в стекле превышают предел прочности стекла, что провоцирует его разрушение [5], [6].

Для повышения огнестойкости светопрозрачных конструкций применяются три метода:

- защита светопрозрачной конструкции от пожара путем расположения по всей ее протяжённости противопожарных штор [7] или водяных завес [8];
- устройство козырьков и выступов из негорючих материалов для изменения направления пламени в целях ограничения воздействия теплового потока на светопрозрачную конструкцию [9];
- конструктивное улучшение огнестойкости светопрозрачной конструкции путем установки огнестойкого стекла, способного сохранить целостность и воспрепятствовать проникновению огня, тепла и дыма в помещения в случае пожара [10].

Огнестойкое стекло согласно [11] разделяют на две большие группы: монолитное огнестойкое стекло и композитное огнестойкое стекло с огнезащитным покрытием.

В качестве монолитных стекол используются боросиликатные стекла, различные виды стеклокерамики и т.д. После физической, химической обработки, а также серии производственных процессов из обычного флоат-стекла получается специальное силикатное безопасное стекло с высокой прочностью, высокой огнестойкостью и высокой устойчивостью к резким изменениям температуры и тепловым ударам различной интенсивности [12].

Примером композитного огнестойкого стекла является армированное стекло. В статье [12] уточняется, что применение проволочной сетки не только повышает общую ударопрочность противопожарного стекла, но и позволяет подключать его к системам электрообогрева и охранной сигнализации. Однако проволочная сетка снижает прозрачность противопожарного стекла, и его реже используют в ограждающих конструкциях.

Композитное огнестойкое стекло, состоящее из двух или более монолитных слоев (толщина 2-3 мм), соединенных вместе полимерными прослойками (толщина 1-2 мм), называется многослойным или ламинированным. В качестве прослоек используются гидрогели [13],[14]. Наиболее распространенными прослойками являются этиленвинилацетат (ЭВА) и поливинилбутираль (ПВБ). Полимерная прослойка позволяет элементу деформироваться и перераспределять нагрузку через стеклянные панели, что помогает избежать распространения трещин и внезапного разрушения многослойного стекла [15]. В работе [16] изучалась реакция многослойного стекла на огонь с учётом различной толщины стекла, тепловых потоков и типов промежуточных материалов. Промежуточные материалы (ПВБ, ЭВА) не оказали влияние на время воспламенения многослойного стекла, в двух случаях при тепловом потоке 50 кВт/м² время воспламенения составило 225 с. Пиковая скорость тепловыделения (pHRR) у многослойного стекла с ПВБ (313,5 кВт/м²) в три раза выше, чем у многослойного стекла с ЭВА (105 кВт/м²). Среднее общее тепловыделение ламинированного стекла с полимерной прослойкой ЭВА значительно ниже (10,26 МДж/м²) по сравнению со стеклами с ПВБ (42,28 МДж/м²).

Наиболее популярными производителями многослойного стекла являются компании Pilkington (Англия), AGC (Бельгия) и Glas Trösch (Швейцария). Многослойные стекла перечисленных производителей обеспечивают огнестойкость до EI/EW 60-120 в зависимости от конфигурации (где буквами E, I, W обозначаются пределы огнестойкости по целостности, изоляции и излучению [17]). Однако решения данного типа имеют ряд ограничений, например, зависимость от дополнительных УФ-фильтров для предотвращения деградации геля под солнечным излучением, низкая морозостойкость до -10 °C, что затрудняет применение в регионах с экстремальным климатом, и необходимость специального оборудования для полимеризации, такого как вакуумные камеры, автоклавы или термопечи [18]. Перечисленные факторы подчеркивают необходимость разработки более универсальных и экономически эффективных решений огнестойких материалов.

Композитным огнестойким стеклом также является гелезаливной стеклопакет. Гелезаливной стеклопакет состоит из двух закаленных стекол или флоат-стекол, образующих широкую внутреннюю полость, заполненную огнестойким гелем. Фотоотверждаемые гели, такие как ФОТОГЕЛЬ™ (Патент RU 2 844 C1 [19]), используются как основное решение в производстве

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

гелезаливных стекол и стеклопакетов. Для создания гелезалевных стеклопакетов также используются термочувствительные гели, изменяющие свою прозрачность в ответ на изменения температуры, тем самым регулируя пропускание солнечного света, что критически важно для энергосберегающих зданий [20], [21].

Несмотря на активное развитие противопожарного остекления, важной задачей остаётся учет масштабного фактора, а именно влияние размеров стеклянных элементов и условий их установки на результаты огневых испытаний.

Результаты исследования [22] подтверждают, что размер и форма стеклянной конструкции влияют на ее огнестойкие качества: при увеличении площади стеклянной панели ее огнестойкость уменьшалась. Прямоугольные панели имели худшие результаты по сравнению с квадратными или треугольными. В ходе FEM-моделирования и лабораторных экспериментов было установлено, что разрушение чаще всего начинается в углах из-за ограничений в деформации и скопления напряжений.

Результаты, полученные при помощи электронной микроскопии [23], выявили дефекты и микроизъяны, распределенные по поверхности стекла. Чем больше площадь стекла, тем выше вероятность, что дефект или микроизъян приведёт к разрушению конструкции. Теория слабейшего звена подтверждает, что масштабный фактор необходимо учитывать при проектировании [24].

На предел огнестойкости стекла может влиять не только его размер, но и материал рамы, в которую вставлен стеклопакет. В работе [17] экспериментальные исследования проводились на крупногабаритных и малогабаритных образцах закаленного огнестойкого стекла в составе стеклопакетов. Образцы вставлялись в стальные и алюминиевые рамы и подвергались воздействию стандартного режима пожара. Установлено, что стекло, вставленное в алюминиевую раму, имело более высокий предел огнестойкости (несмотря на то, что коэффициент температурных деформаций в алюминии в два раза выше, чем в стали), поскольку алюминиевые рамы являются полыми и тонкостенными. Результаты моделирования также подтвердили, что стальные рамы деформировались более чем в два раза относительно алюминиевой рамы при воздействии огня. Отмечается расхождение между результатами испытаний в печах малого масштаба и полноразмерных конструкциях. Разрушение стекла на крупных образцах происходит быстрее, разница в достижении предела огнестойкости достигает 29 %.

Результаты практических испытаний подтверждают, что центр стекла нагревается быстрее, чем стекло, находящееся ближе к раме. Разница в температуре вызывает напряжение, приводящее к трещинам, разрушение происходит именно по краям [25].

В исследовании [26] был проведен численный анализ для оценки тепловых характеристик фасадов из флоат-стекла различных типов и геометрических конфигураций под воздействием пожара с использованием программного обеспечения ABAQUS. В одинарных стеклянных панелях температура поверхности менялась в зависимости от толщины; она уменьшалась примерно на 13,5% при увеличении толщины на 2 мм. Температура возникновения трещин и время возникновения трещин зависели от формы стекла, и наихудшей формой для данного фиксированного граничного условия стала прямоугольная форма (соотношения сторон для прямоугольной и треугольной форм использовались 1 и 2,25 соответственно).

Испытания гелезаливных стеклопакетов выявили ряд технологических и эксплуатационных уязвимостей [27]. Нарушение температурного режима в локальных точках и, как следствие, прогар стеклопакета может быть вызвано скрытыми производственными дефектами, такими как отсутствие адгезии геля к стеклу, нарушение рецептуры или условий хранения. Перечисленные дефекты вполне могут быть визуально не различимы, за исключением нарушения условий хранения, так как гель может помутнеть. Соответственно, контроль качества партии изделий лучше всего производить с помощью огневых испытаний [27]. Пример плохой адгезии геля ФОТОГЕЛЬ™, выявленный в процессе испытаний, представлен на рисунке 1. Типичные примеры прогара, полученные в результате геля ФОТОГЕЛЬ™ представлены на рисунке 2.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

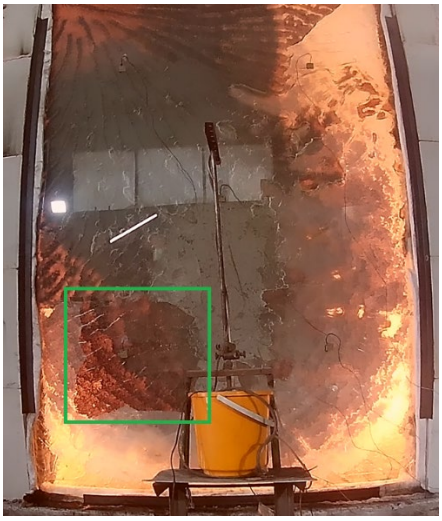

Рис. 1 – Пример плохой адгезии геля: выделена область, в которой полностью отсутствует контакт геля со стеклом
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 1 – An example of poor gel adhesion: an area is highlighted where there is no contact between the gel and the glass at all
Image by the author of the article

Рис. 2 – Точки прогара стеклопакета, вызванные плохой адгезией геля к стеклу
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 2 – Burnout points of the glass unit caused by poor adhesion of the gel to the glass
Image by the author of the article

Использование в стеклопакете обычных сырых стекол М1 вместо специально закаленных также приводит к значительному уменьшению предела огнестойкости. Сырые стекла трескаются из-за температурного градиента в первые минуты испытания, либо начинают приподниматься, отрывая за собой гель, либо падают, отрезая области геля, что приводит к быстрому прогару стеклопакета [28].

Другим дефектом, выявленным при огневых испытаниях, является ошибка монтажа стеклопакета в конструкцию. Незначительные изменения в точках крепления стекла, зазоры, неравномерный прижим, прерывистость вспучивающейся ленты или смена её производителя без огневых испытаний может привести к неблагоприятным последствиям, а именно к прогоранию конструкции. Типичный пример неправильного монтажа конструкции, полученный в результате испытаний компании «Фототех» показан на рисунке 3.

Рис. 3 – Прогар элементов конструкции в результате неправильного монтажа
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 3 – Burnout of structural elements due to improper installation
Image by the author of the article

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

В основном все недостатки могут быть выявлены только при огневых испытаниях.

Таким образом, несмотря на возрастающую актуальность применения светопрозрачных конструкций в строительстве, анализ научной литературы выявил дефицит исследований, посвященных огнестойкости светопрозрачных конструкций. Особую проблему представляет недостаток экспериментальных данных об огневых испытаниях гелезаливных стеклопакетов. Соответственно, целью работы является систематизация данных об огнестойкости гелезаливных стеклопакетов на основе экспериментальных исследований с учетом масштабного фактора, состава стеклопакета, геометрии изделия, а также толщины гелевой прослойки. Объектом исследования является изучение влияния размера каркаса на огнестойкость гелезаливных конструкций. Задачи исследования:

– Провести огневые испытания гелезаливных стеклопакетов прямоугольной, квадратной и треугольной формы;

– Провести огневые испытания гелезаливных стеклопакетов, в состав которых входят обычные стекла и стекла закаленные по технологии ФТ (технология, разработанная компанией ФОТОТЕХ);

– Провести огневые испытания гелезаливных стеклопакетов с различной толщиной прослойки из геля (6 мм, 8 мм, 12 мм и 16 мм).

2 Materials and Methods

Исследованию подлежали образцы гелезаливных стеклопакетов. Все образцы содержали гелевую прослойку стандартной толщины (16 мм), распределённую равномерно по межстекольному пространству. Образцы были разделены на три типа со стандартными формулами (6М1-16гель-6М1, 8М1-16гель-8М1 8ФТ-1-16гель-8ФТ-1) и на три типа со стандартными размерами 1000х1200 мм с разной толщиной геля. Характеристики образцов представлены в таблице 1.

Значения в формуле стеклопакетов указываются в миллиметрах и идут от внешнего стекла (со стороны улицы) к внутреннему. Под «М1» понимается стекло листовое бесцветное. Цифра перед «М1» указывает на толщину стекла. Толщина стекла всегда чередуется с толщиной межстекольного пространства.

Таблица 1. Характеристики образцов для испытаний
Table 1. Characteristics of test samples

Образец	Размеры, мм	Форм-фактор	Формула стеклопакета	Расположение в печи
1.1	2400х800	прямоугольник	6М1-16гель-6М1	вертикально
1.2	2400х800	прямоугольник	6М1-16гель-6М1	повернуто на 90°
1.3	2000х2000	треугольник	6М1-16гель-6М1	вертикально
1.4	3600х1800	прямоугольник	8М1-16гель-8М1	повернуто на 90°
1.5	2000х2000	квадрат	6М1-16гель-6М1	вертикально
1.6	1000х1200	прямоугольник	6М1-16гель-6М1	вертикально
2.1	4600х2100	прямоугольник	8ФТ-1-16гель-8ФТ-1	вертикально
3.1	1000х1200	прямоугольник	6М1-12гель-6М1	вертикально
3.2	1000х1200	прямоугольник	6М1-8гель-6М1	вертикально
3.3	1000х1200	прямоугольник	6М1-6гель-6М1	вертикально

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 33000–2014 «Стекло и изделия из него. Метод испытания на огнестойкость» [29], ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Метод испытаний на огнестойкость. Общие требования» (ИСО 834-75) [30] и ГОСТ 30247.4-2022 «Конструкции строительные. Светопрозрачные ограждающие конструкции и заполнения проемов. Метод испытания на огнестойкость» [31]. Сущность метода заключается в том, что образец подвергают тепловому воздействию, имитирующему условия пожара, и по времени достижения образцом предельного состояния определяют предел огнестойкости стекла. В печи был создан нормативный температурный режим, характеризующийся зависимостью (1):

$$T = 345 \cdot \lg(8 \cdot t + 1) + T_0$$

где T – средняя температура в печи, °С;

T_0 – начальная температура в печи, °С;

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

t – время, прошедшее с начала испытания, мин.

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) [17]. Достижение предельного состояния стекла по критерию R считается, если оно разрушилось или выпало из испытательной рамы. Критерий по достижению предельного состояния R не рассматривают при условии, если образцы при испытании находятся в вертикальном состоянии согласно [22]. В Европейской классификации критерий (W) интегрирован в требования к теплоизоляции (I), тогда как в российских нормах для многослойных стеклянных панелей и противопожарных перегородок предусмотрен отдельный параметр EIW. Например, стеклопакеты класса EI/EW60 сохраняют функциональность в течение 60 минут, блокируя распространение огня и избыточного теплового излучения [32].

Испытания проводились по проверке критерия EIW60+. Образцы фиксировались в испытательные рамки с теплоизоляционными прокладками по периметру. Установку образцов производили в соответствии с рисунком 4. В огневой камере располагались термопары ТЭП в количестве 6 штук, размещенные на расстоянии 100 мм от поверхности образца. Для измерения температуры на необогреваемой поверхности стекла устанавливались ТЭП в количестве 5 штук. Одну термопару устанавливают в центре, а остальные – в середине прямых, соединяющих центр и углы проема печи.

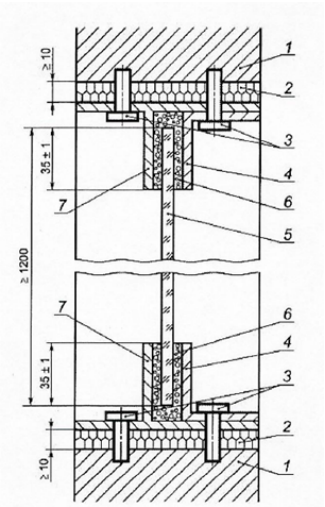

Рис. 4 – Схема крепления образца: 1 – печь; 2 – плита из минерального волокна; 3 – крепления; 4, 7 – стальная испытательная рама; 5 – испытуемый образец; 6 – асбестовая прокладка
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 4 – Sample mounting diagram: 1 – furnace; 2 – mineral fiber plate; 3 – fasteners; 4, 7 – steel test frame; 5 – test sample; 6 – asbestos gasket
Image by the author of the article

Дополнительно использовался термограф, масштабный калориметр и камера сгорания с подачей топлива.

Испытания проводились до разрушения или выпадения образца из рамы, появления устойчивого пламени на не подвергаемой огневому воздействию поверхности, появления в образце сквозных отверстий, превышения предельных значений температуры, превышения предельного значения плотности потока теплового излучения.

3 Results and Discussion

В ходе испытаний образца № 1.1 было установлено, что предел огнестойкости, испытанный в стандартных условиях, был достигнут на 43 минуте из-за появления трещины и очагов прогара на не нагреваемой стороне стекла (рисунок 5).

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Рис. 5 – Образец №1.1 на 7 минуте (слева) и 24 минуте (справа) испытания
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 5 – Sample No. 1.1 at 7 minutes (on the left in the figure) and 24 minutes (on the right in the figure) of testing
Image by the author of the article

В ходе испытаний образца № 1.2 было установлено, что предел огнестойкости, испытанный в стандартных условиях, был достигнут на 47 минуте из-за появления трещины со сквозным отверстием на не нагреваемой стороне стекла (рисунок 6).

Рис. 6 – Образец №1.2 на 25 минуте испытаний
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 6 – Sample No. 1.2 at 25 minutes of testing
Image by the author of the article

В ходе испытаний образца № 1.3 было установлено, что предел огнестойкости, испытанный в стандартных условиях, был достигнут на 30 минуте из-за появления очагов прогара на не нагреваемой стороне стекла (рисунок 7). Очаги прогара были вызваны плохой адгезией геля к стеклу.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Рис. 7 – Образец №1.3 во время (слева) и после (справа) испытаний
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 7 – Sample No. 1.3 during (left in the figure) and after (right in the figure) testing
Image by the author of the article

Образец № 1.4 был изготовлен на стеклах 8М1 в связи с требованиями по напряжениям в стеклопакете. В ходе испытаний, было установлено, что предел огнестойкости образца № 1.4 был достигнут на 25 минуте из-за выпадения стеклопакета из испытательной рамы (рисунок 8), что не соответствует требуемому пределу огнестойкости. Данная ситуация возникла по причине неправильного изготовления проема печи и монтажа стеклопакета в раму.

Рис. 8 – Результаты испытаний образца №1.4
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 8 – Test results of sample No. 1.4
Image by the author of the article

Как было описано в п.1, при обзоре существующих проблем, монтаж стеклопакета и рамы, в которую он крепится, оказывает огромное значение на реальную эксплуатацию огнестойких конструкций.

В ходе испытаний образца № 1.5 было установлено, что предел огнестойкости, испытанный в стандартных условиях, был достигнут на 61 минуте из-за того, что лопнуло внешнее стекло по

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

всей площади образца. Фактический предел огнестойкости образца № 1.5 соответствует пределу огнестойкости EIW60 (рисунок 9).

Рис. 9 – Образец №1.5 на 15 минуте (слева) и 57 минуте (справа) испытаний
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 9 – Sample No. 1.5 at 15 minutes (on the left in the figure) and 57 minutes (on the right in the figure) of testing
Image by the author of the article

В ходе испытаний образца № 1.6 было установлено, что предел огнестойкости, испытанный в стандартных условиях, был достигнут на 67 минуте из-за того, что лопнуло внешнее стекло по всей площади образца. Этот результат доказывает факт, что уменьшение размеров ведет к увеличению огнестойкости, а прямоугольные формы имеют худшие результаты, по сравнению с квадратными. А также в ходе эксперимента сделан вывод – чем больше соотношение сторон в прямоугольной форме, тем хуже результат. Такой результат объясняется тем, что на поверхностях стеклопакета больших образцов наблюдалось резкое изменение температурного режима от центральной части не нагреваемого стекла к краю, что вызвало его разрушение, а разрушение наружного стекла приводило к очагам прогара и выходу пламени наружу, а значит к прекращению испытаний.

Образец № 2.1 был изготовлен на стеклах толщиной 8 мм, закаленных по режиму ФТ-1 (специальная закалка по технологии компании ФОТОТЕХ [33]). Толщина стекол отличается от толщин для остальных образцов по причине большого размера 4600x2100 мм, стекла толщиной 6 мм не выдержали бы из-за напряжений. Кроме того, известно [17], что стекла, закаленные по режиму ФТ-1 [33] в процессе огневых испытаний, не трескаются, а только изгибаются и плавятся. Данное свойство стекол, закалённых по режиму ФТ-1, позволяет проверить результат, полученный при испытаниях образцов №№ 1.1, 1.2, 1.5, в которых появление трещины на не обогреваемой стороне стекла приводило к появлению точек прогара. В ходе испытаний образца № 2.1 было установлено, что предел огнестойкости, испытанный в стандартных условиях, был достигнут на 62 минуте по причине повышения средней температуры, не подвергаемой огневому воздействию поверхности, стекла более чем на 140℃ по сравнению с её начальной средней температурой (рисунок 10). Результат показывает, что использование стекол ФТ-1, хоть и существенно удорожает продукт, позволяет избежать образование трещин на не обогреваемой поверхности стекла, приводящие к прогару.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Рис. 10 – Образец №2.1 на 5 минуте (слева) и 15 минуте (справа) испытаний
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 10 – Sample No. 2.1 at 5 minutes (on the left in the figure) and 15 minutes (on the right in the figure) of testing
Image by the author of the article

Так же были проведены испытания образцов №№ 3.1-3.3 и № 1.6 с разными толщинами геля. В ходе испытаний была установлена почти линейная зависимость (Таблица 2, Рисунок 11), показывающая, что при росте толщины геля увеличивается и предел огнестойкости.

Таблица 2. Результаты испытаний образцов №№3.1-3.3 и №1.6
Table 2. Test results for samples No. 3.1-3.3 and No. 1.6

Образец	Размеры, мм	Формула стеклопакета	Предел огнестойкости по испытаниям, EIW	Фактический предел огнестойкости, EIW
1.6	1000x1200	6М1-16гель-6М1	67	60
3.1	1000x1200	6М1-12гель-6М1	48	45
3.2	1000x1200	6М1-8гель-6М1	33	30
3.3	1000x1200	6М1-6гель-6М1	22	15

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

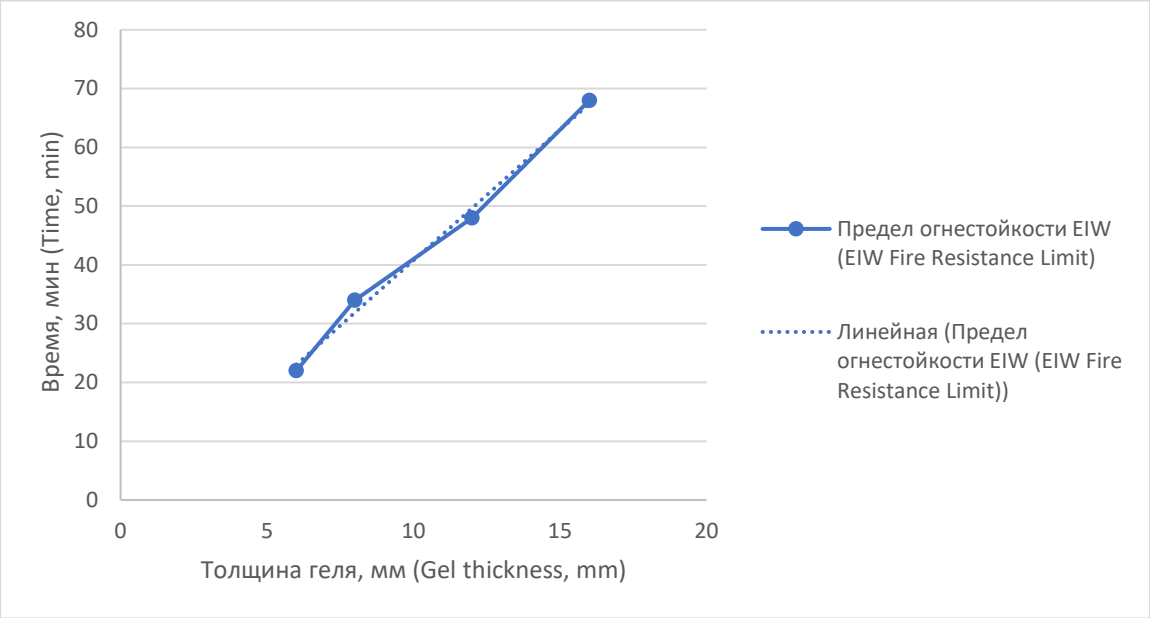

Рис. 11 – График зависимости предела огнестойкости стеклопакета от толщины геля Изображение выполнено автором статьи
Fig. 11 – Dependence of the fire resistance limit of a glass unit on the thickness of the gel Image by the author of the article

Коэффициент корреляции, рассчитанный в программе Excel, составляет 0.9963. Коэффициент корреляции близок к 1, соответственно, между переменными (Предел огнестойости и Толщина геля) наблюдается положительная корреляция, то есть высокая степень связи. При возрастании значения толщины геля увеличивается и предел огнестойкости конструкции.

Таким образом, огнестойкость гелезаливных стеклопакетов представляет собой сложную задачу, требующую комплексного подхода с обязательным учетом масштабного фактора. Важно обеспечить контроль качества гелевого заполнения и герметизации стеклопакетов, поскольку даже небольшие дефекты могут существенно снизить огнестойкость. Необходимо разработать специализированные методы испытаний, учитывающие специфику гелезаливных изделий и влияние масштабного фактора.

4 Conclusions

Обеспечение огнестойкости гелезаливных стеклопакетов является многоаспектной задачей, требующая интегрированного решения. По результатам исследования образцов гелезаливных стеклопакетов с различной толщиной геля и форм фактором было выявлено:

1. Масштабный фактор оказывает значительное влияние на огнестойкость конструкции. Как правило, при увеличении размеров или увеличении соотношения сторон стекла снижается его устойчивость к температурному воздействию. Эта закономерность объясняется тем, что при большей площади конструкции более высокая вероятность наличия дефектов, способных инициировать разрушение. При этом квадратные и малогабаритные формы имеют более равномерное распределение температур и меньшее число дефектов, приводящих к прогару.

2. Предел огнестойкости по EIW крупногабаритных образцов ниже предела огнестойкости малогабаритного образца с одинаковой толщиной геля и на сырых стеклах на 9-31% в зависимости от соотношения сторон и форм-фактора. Прямоугольные формы дали худшие показатели огнестойкости по сравнению с квадратными. Также в ходе испытания выявлено, что чем больше соотношение сторон в прямоугольной форме, тем хуже результат. Данная закономерность объясняется тем, что на поверхностях стеклопакета больших образцов наблюдалось резкое изменение температурного режима от центральной части не нагреваемого стекла к краю, что вызвало его разрушение, а разрушение наружного стекла приводило к очагам прогара и выходу пламени наружу, а значит к прекращению испытаний. Кроме того, вытянутая прямоугольная форма приводила к тому, что гелевая прослойка грелась неравномерно. В случае вертикально и горизонтально расположенных образцов одинакового размера горизонтальный

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

образец отстоял дольше на 10%, что тоже может быть вызвано неравномерным прогревом в печи. Для испытанных прямоугольных стекол фактический предел огнестойкости составляет EI/EW30 и EI/EW45, тогда как для малогабаритных стекол и квадратных образцов составляет EI/EW60.

3. Испытания треугольного образца с плохой адгезией подтвердили её непосредственное влияние на огнестойкость. Плохая адгезия геля к стеклу приводит к отрыву геля от стекла и появлению в местах отрывов очагов прогара.

4. Использование стекол ФТ-1, хоть и значительно увеличивает стоимость изделия, позволяет избежать образования трещин на не обогреваемой поверхности стекла, которые могут привести к прогару. В случае пожара стеклопакет со стеклами ФТ-1 сможет сохранить свою целостность и предотвратить распространение огня и продуктов горения в течение всего заявленного времени, вне зависимости от различных факторов. Такое решение стоит применять только в случае изготовления стеклопакетов больших размеров. Потому что малогабаритные образцы обеспечивают такие же или более высокие показатели благодаря меньшей неравномерности нагрева и меньшему влиянию дефектов.

5. Толщина слоя геля прямо влияет на продолжительность огнестойкости. По результатам предварительных испытаний, увеличение толщины геля на 2-4 мм способно добавить до 15 минут по пределу огнестойкости.

6. Гелезаливные стеклопакеты обладают высокой потенциальной огнестойкостью, но требуют строгого соблюдения технологических норм. Качество хранения, монтажа и подготовки образцов непосредственно влияет на результат испытания.

5 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest.

References

1 Nemova, D.V., Vasileva, I.L., 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.

2 Pérez-Grande, I., Meseguer, J., Alonso, G. (2005) Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades. *Applied Thermal Engineering*, Pergamon, **25**, 3163–3175. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2005.04.004.

3 Bezborodov, V. Vagenleytner, E., Kaziev, M., Zubkova, E. (2017) Pecularities of providing fire resistance for outside translusent walls. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2–17.

4 Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. (2008) Structural use of glass. International Association for Bridge and Structural Engineering, 210. https://books.google.com/books/about/Structural_Use_of_Glass.html?hl=ru&id=zIjQw1ghHxAC.

5 Bedon, C. (2017) Structural Glass Systems under Fire: Overview of Design Issues, Experimental Research, and Developments. *Advances in Civil Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, **2017**, 2120570. https://doi.org/10.1155/2017/2120570.

6 Wang, Y., Wang, Q., Shao, G., Chen, H., Sun, J., He, L., Liew, K.M. (2014) Experimental study on critical breaking stress of float glass under elevated temperature. *Materials & Design*, Elsevier, **60**, 41–49. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2014.03.038.

7 Gravit, M., Kotlyarskaya, I., Abdulova, D. (2024) Non-combustible composite materials for fire curtains: thermal analysis and microscopy. *Magazine of Civil Engineering*, **127**, 12705–12705. https://doi.org/10.34910/MCE.127.5.

8 Zhong, H., Chen, G., Jiang, S. (2016) A novel method for evaluation of fire prevention by using water curtain with large droplets. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, **43**, 585–592. https://doi.org/10.1016/J.JLP.2016.07.026.

9 Giraldo, M.P., Rodríguez-Trujillo, V., Burgos, C. (2012) Computer-Simulation Research on Building-Façade Geometry for Fire-Spread Control in Buildings with Wood Claddings. The 2012 World Conference on Timber Engineering, 1–2. https://www.researchgate.net/publication/283726675_Computer-Simulation_Research_on_Building-Facade_Geometry_for_Fire-Spread_Control_in_Buildings_with_Wood_Claddings.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

10 Kotlyarskaya, I.L., Vatin, N.I., Gravit, M.V., Shinkareva, M.K. (2023) Fire-resistant glass and translucent structures. A review. *AlfaBuild*, **29**, 2905–2905. https://doi.org/10.57728/ALF.29.5.

11 Wang, F., Cai, M., Yan, L. (2021) Effect of Poly(acrylamide-acrylic acid) on the Fire Resistance and Anti-Aging Properties of Transparent Flame-Retardant Hydrogel Applied in Fireproof Glass. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3668*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 3668. https://doi.org/10.3390/POLYM13213668.

12 Zhou, B.X. (2014) Application and Design Requirements of Fire Windows in Buildings. *Procedia Engineering*, No longer published by Elsevier, **71**, 286–290. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2014.04.041.

13 Grigoriev D.V., Sivtsov E.V., Uspenskaya M.V. (2023) Study of the Mechanical Characteristics of Polymer Composite Materials Based on Acrylic Hydrogels and Inorganic Nanoparticles Using Oscillation Rheometry, *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University) | Bulletin of St PbSIT(TU) 2023*, **65**, 42–46. https://doi.org/ 10.36807/1998-9849-2023-65-91-42-46

14 Nosenko T.N., Sitnikova V.E., Uspenskaya M.V. (2019) Composite Materials Based on Acrylic Hydrogel and Sodium Hyaluronate, *Chemical industry today 2019*, **6**, 46-50

15 Martín, M., Centelles, X., Solé, A., Barreneche, C., Fernández, A.I., Cabeza, L.F. (2020) Polymeric interlayer materials for laminated glass: A review. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **230**, 116897. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.116897.

16 Hassan, M.K., Hasnat, M.R., Loh, K.P., Hossain, M.D., Rahnamayiezekavat, P., Douglas, G., Saha, S. (2023) Effect of Interlayer Materials on Fire Performance of Laminated Glass Used in High-Rise Building: Cone Calorimeter Testing. *Fire 2023, Vol. 6, Page 84*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **6**, 84. https://doi.org/10.3390/FIRE6030084.

17 Gravit, M., Shabunina, D., Stratiy, P., Kotlyarskaya, I.L., 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.

18 Klimin, N. (2015) Modern trends in the development of fire-resistant glazing. *Translucent structures*, **3–4**, 28–31.

19 Atroshchenko, G., Filonenko, A., Filonenko, I., Garibian, P., Zinevich, P., Filonenko, N. (2024) Patent RU 2 844 111 C1. Photocurable fire-resistant transparent composition. https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2844111&TypeFile=html.

20 Zheng, C., Chen, X., Chen, Y. (2025) Enhancing the cost-efficiency of hydrogels for thermochromic smart windows through optimization of raw materials and preparation methods. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **519**, 165570. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2025.165570.

21 Sivalingam, S., Balaji, D., Mahendran, R., Sathishkumar, M., Rajeshkumar, L. (2025) An overview of thermosensitive hydrogel based nanocomposites for high temperature and fire resistance applications. *iScience*, Elsevier, **28**, 112810. https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2025.112810.

22 Wang, Y., Zhang, Y., Wang, Q., Yang, Y.,Sun, J. (2018) The effect of glass panel dimension on the fire response of glass façades. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **181**, 588–597. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.088.

23 Pomeroy, M.J. (2021) Scanning Electron Microscopy for Ceramics and Glasses. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses: Volume 1-3*, Elsevier, **1**, 651–661. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818542-1.00093-X.

24 Dai, W.Q., Zhu, S.P., He, J.C., Taddesse, A.T., Wang, Q. (2022) Probabilistic notch fatigue assessment under size effect using weakest link theory. *Engineering Fracture Mechanics*, Pergamon, **276**, 108935. https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2022.108935.

25 Hassani, S.K.., Shields, T.J., Silcock, G.W. (2001) The Behaviour of Double Glazing in an Enclosure Fire | Request PDF. The Beaviour of Glass and Other Materials, 212. https://www.researchgate.net/publication/259998625_The_Behaviour_of_Double_Glazing_in_an_Enclosure_Fire.

26 Perera, R.G.S.S., Ruwanmali, J.H.A., Thevega, T., Jayasinghe, J.A.S.C., Bandara, C.S., Dammika, A.J. (2024) Thermal performance of glass facade under fire loading: a numerical approach. *Sri Lanka Journal of Social Sciences*, National Science Foundation, **52**, 229–241. https://doi.org/10.4038/JNSFSR.V52I2.11732.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

27 Kinowski, J., Sulik, P., Sędłak, B. (2019) Impact of improper storage and installation of glazed fire rated walls on their performance. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, **284**, 02003. https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201928402003.
28 Wang, Y., Zhou, L., Rush, D., Bisby, L. (2025) Interaction between glass thermal breakage and interlayer combustion in laminated glass with different thicknesses of glass panels and interlayers. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **103**, 112132. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.112132.
29 Russian state standard GOST 33000-2014. (2015) Glass and products from it. Fire-resistance test method.
30 Russian State Standard GOST 30247.0-94 "Elements of building constructions fire-resistance test methods. General requlrements ". https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=100081.
31 Russian State Standard GOST 30247.4— 2022 „Building structures. Translucent enclosing structures and fillings of openings. Fire resistance test method“. https://internet-law.ru/gosts/gost/82959/.
32 Klimin, N. (2012) Classification of fire-resistant glass of European manufacturers. *Translucent structures*, **3**, 1–6.
33 Monolithic fire-resistant glass FT-1. https://www.phototech.ru/spetsialnye-styekla/pozharostoykie/monolitnoe-pozharostoykoe-steklo-ft-1/?ysclid=mejvlopy6k269277670.