

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.311>

УДК 614.841.332:[693.98:691.615.1]

ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВЫХ СТЕКОЛ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ПОЖАРОСТОЙКИХ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Бирюк В.А., Давыдик М.А., Кравчук А.П.

Цель. Исследование термомеханических свойств листового стекла, используемого для светопрозрачных ограждающих конструкций, с разработкой мероприятий по повышению уровня пожарной безопасности высотных зданий.

Методы. Применены теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретический метод основан на решении задач теплового режима твердых тел и анализе критериев разрушения светопрозрачных конструкций при пожаре. Экспериментальный метод основан на выявлении зависимостей между параметрами пожара и критериями разрушения светопрозрачного фасада на этаже пожара и вышележащих этажах.

Результаты. Выполнен обзор состояния проблемы в области обеспечения пожарной безопасности высотных зданий с фасадным остеклением. Установлено, что применяемые в настоящее время светопрозрачные ограждающие конструкции выполнены в основном из многослойного или закаленного стекла, вызывающего повышенную нагрузку на фундамент, имеющего высокую стоимость и не всегда сохраняющего целостность конструкции в случае возникновения пожара. Проведены экспериментальные исследования упрочнения листового стекла разных номиналов методом химической закалки, дана оценка возможности применения данного метода для создания пожаробезопасных стекол.

Область применения исследований. Пожарная безопасность в строительстве высотных зданий, светопрозрачные ограждающие конструкции.

Ключевые слова: пожарная безопасность, светопрозрачные конструкции, огнестойкость, термостойкость, химическая закалка.

(Поступила в редакцию 20 июля 2021 г.)

Введение

Пожары в высотных зданиях отличаются сложностью и длительностью проведения аварийно-спасательных работ и действий по их тушению. С увеличением темпов строительства высотных зданий растет и количество пожаров в них. Пожары в зданиях жилого назначения представляют наибольшую опасность для людей, т.к. происходят наиболее часто (около 70 % от общего числа пожаров). С каждым годом темпы роста высотного строительства увеличиваются, при этом все чаще фасады высотных зданий выполняются из светопрозрачных конструкций¹. Стекло из-за воздействия высоких температур во время пожара разрушается, предоставляя возможность выходу пожара на внешний фасад и дальнейшему его распространению на вышележащие этажи.

Конструирование высотных зданий имеет особую специфику, ведь нужно учитывать не только устойчивость, но и пожарную безопасность объекта. В строительстве высотных зданий преимущество отдается закаленному стеклу, которое в случае возникновения пожара будет орошаться огнетушащим веществом, поступающим из спринклерной системы. Пожаростойкие стеклопакеты при строительстве высотных зданий не применяются, т.к. они отличаются большим весом и увеличивают стоимость строительства, не гарантируя при этом дей-

¹ ГОСТ 33079-2014. Конструкции фасадные светопрозрачные навесные. Классификация. Термины и определения: государственный стандарт // Консорциум КОДЕКС: электронный фонд правовой и нормативно-технической литературы. – Электрон. дан. – М., 2015. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118287>. – Дата доступа: 15.12.2019.

ствительной безопасности при возникновении пожара. Поэтому исследование динамики разрушения светопрозрачных ограждающих конструкций из неорганических силикатных материалов и разработка технологии получения противопожарных стекол для светопрозрачных ограждающих конструкций приобретает исключительно важное теоретическое и практическое значение и являются актуальным направлением исследования, что подтверждается серьезными последствиями и сложностью ведения боевых действий по тушению пожара в высотных зданиях.

Основная часть

Существующие теории разрушения стекла, а также критерии оценки устойчивости стекла при пожаре основаны на результатах лабораторных экспериментов. Так, было установлено, что главным критерием, способствующим разрушению стекла, является скорость нарастания температурного воздействия на него [1]. В условиях реальных пожаров при разрушении светопрозрачного заполнения происходит выход пламени на фасад здания, реализуется максимально быстрый прирост температуры вдоль плоскости фасада. На сегодня отсутствуют сведения о поведении стекол, в том числе из неорганических силикатных материалов, при внешнем воздействии пожара, а также методика расчета устойчивости при пожаре светопрозрачных конструкций.

Нормативными документами в области пожарной безопасности определено, что для высотных зданий следует предусматривать мероприятия по ограничению распространения пожара по внешнему фасаду здания, при этом степень эффективности этих мероприятий не приведена.

Мероприятия по ограничению распространения пожара по фасаду здания представляют собой активные и пассивные меры противопожарной защиты зданий. К активным мерам относятся установки автоматического пожаротушения или водяного орошения светопрозрачных фасадов зданий. К пассивным – конструктивные решения фасадов, а также самих зданий, локализирующие размеры пожара в пределах помещения и препятствующие выходу пламени на фасад.

Пассивные методы противопожарной защиты считаются наиболее надежными и эффективными, на их работу не оказывают влияния внешние факторы окружающей среды. Научные исследования находят отражение в критериях безопасности, методах их определения или сформулированных требованиях нормативных правовых актов в области пожарной безопасности. Только на основании результатов исследований можно произвести оценку эффективности применения тех или иных способов защиты светопрозрачных фасадов зданий.

Стекло является негорючим материалом. Несмотря на то что стекло не способствует распространению пожара по фасаду, оно обладает низкой устойчивостью к воздействию высоких температур [1], что может послужить причиной распространения пожара по фасаду здания в его начальной стадии вследствие выхода пламени наружу через разрушенное остекление оконного проема [2].

Основными факторами, обуславливающими способность листовых стекол сопротивляться воздействию значительных перепадов температур, возникающих при развитии пожара, ветровым и динамическим нагрузкам, попаданию влаги на нагретую поверхность при пожаротушении, являются предел прочности стекла, его термостойкость и толщина. Существенное влияние на пожаростойкость стекол также оказывают площадь стеклоконструкции, условия закрепления стекла и его дистанция в пространстве относительно источника горения [3].

Согласно данным литературы причиной разрушения стекла под воздействием пожара являются механические напряжения, возникающие в результате неравномерного прогрева краевых и центральных зон листового стекла [4].

В связи с этим для повышения жаростойкости листовых стекол целесообразно использовать методы термической или химической закалки, которые позволяют повысить механическую прочность и термостойкость стекол.

Преимуществами метода химической закалки в сравнении с термической являются: возможность закалки стекол тонких номиналов и крупногабаритных изделий, исключение саморазрушения при транспортировке, что позволяет рекомендовать его для получения жаростойких листовых стекол.

В качестве сред для химической закалки могут использоваться различные расплавы солей или их композиций, например KNO_3 , $K_2Cr_2O_7$, Li_2CO_3 , KNO_3+3KCl , $KNO_3+3K_2CO_3$ и др.

Высокотемпературный ионный обмен, предполагающий использование солей лития, несмотря на многочисленные исследования, не нашел практической реализации. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

- необходимость нагрева стекла до высоких температур выше температуры стеклования, что приводит к искажению его геометрических размеров и оптических свойств;
- требуется использование дорогостоящих солей лития;
- достигаемый уровень прочности не превышает 150–250 МПа.

Наибольшее распространение для улучшения механических свойств и термостойкости стекол получил метод низкотемпературного ионного обмена в расплаве KNO_3 или расплава смеси KNO_3 с другими компонентами. Поэтому для проведения исследований в области получения жаростойких стекол был выбран этот метод.

На первом этапе исследований были изучены механические и термические характеристики исходных листовых стекол различных номиналов, которые в дальнейшем подвергались химической закалке в расплаве KNO_3 при различных температурах и времени выдержки.

Для проведения исследований свойств микротвердости, механической прочности, термостойкости светопропускания использовались образцы листового флоат-стекла ОАО «Гомельстекло» с различной толщиной – 2, 3, 4 и 6 мм.

Проведены измерения микротвердости образцов стекла различной толщины методом вдавливания алмазной пирамиды.

Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Микротвердость листовых стекол различной толщины

Толщина стекла, мм	Среднее значение микротвердости, МПа
2	5215
3	5180
4	5525
6	5309

Полученные значения микротвердости варьируются в пределах от 5180 до 5525 МПа, что вполне характерно для листовых стекол.

Для жаростойких стекол большое значение имеет такой показатель, как механическая прочность. Это обуславливается тем, что механическая прочность положительно коррелирует с термостойкостью, а значит, с жаростойкостью.

Для определения механической прочности листового стекла проведены испытания на изгиб методом нагружения образца сосредоточенной силой 3 образцов стекол каждой толщины. Испытания проводились на универсальной электромеханической испытательной машине Galdabini Quasar 100.

Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Механическая прочность

Толщина стекла, мм	Среднее значение механической прочности, МПа
2	60
3	78
4	82
6	70

Кривые нагружения листовых стекол различной толщины, представленные на рисунке 1, соответствуют кривым нагружения хрупкого материала.

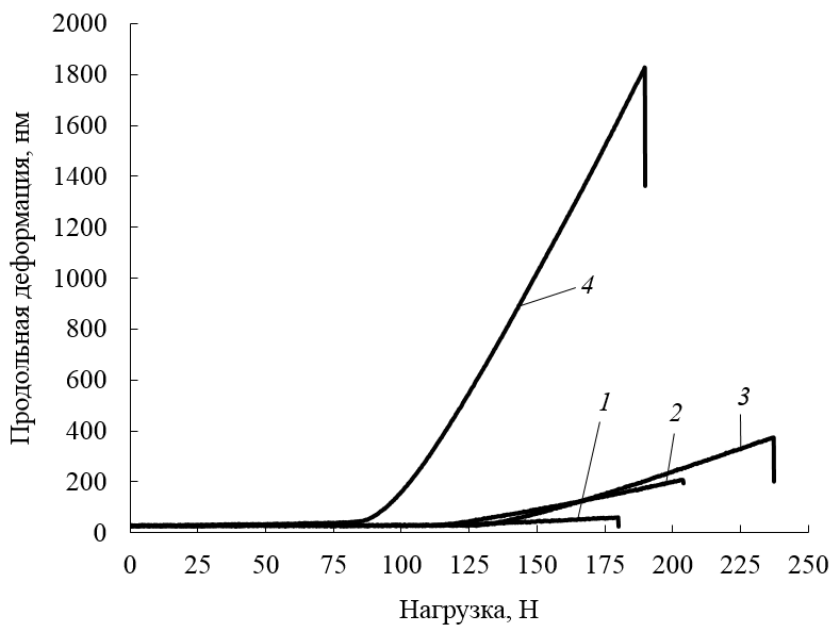


Рисунок 1. – Кривые нагружения листовых стекол различной толщины: 1 – 2 мм; 2 – 3 мм; 3 – 4 мм; 4 – 6 мм

По мере роста внешних усилий внутренние напряжения также растут и достигают предела прочности, после чего материал разрушается.

Хрупкое разрушение – наиболее опасный вид разрушения, т.к. оно идет с большой скоростью и при относительно небольшой деформации, предшествующей ему.

Согласно полученным данным с увеличением толщины листового стекла механическая прочность увеличивается, однако при этом следует учитывать, что увеличивается и вес изделий.

Термостойкость характеризует способность материала выдерживать резкие перепады температур без разрушения. Поскольку изделия из стекла обладают более высокой прочностью при сжатии, термостойкость изделий из стекла к резкому нагреву оказывается более высокой, чем к резкому охлаждению. В связи с этим термостойкость стекла определяется максимальной разностью температур, которую оно выдерживает при быстром охлаждении.

Наибольшее влияние на термостойкость оказывают такие факторы, как механическая прочность, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), толщина образца, а также большое значение имеет состояние поверхности стекла, т.к. при наличии дефектов в поверхностных слоях термостойкость снижается.

Пожаростойкость листовых стекол положительно коррелирует с их термостойкостью, т.е. при увеличении термостойкости пожаростойкость листового стекла возрастает. В связи с этим проведены исследования термостойкости исходных листовых стекол.

Определение термостойкости листовых стекол осуществлялось методом разрушающего температурного перепада. Результаты измерения термостойкости приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Термостойкость листовых стекол различной толщины

Толщина стекла, мм	Термостойкость ΔT , °С
2	145
3	125
4	110
6	85

По данным, отображенным в таблице 3, можно сделать вывод, что при увеличении толщины стекла его термостойкость закономерно снижается. Таким образом, листовое стекло толщиной 6 мм обладает максимальной термостойкостью 85 °С, а листовое стекло толщиной 2 мм – термостойкостью 145 °С.

При охлаждении стекла его наружные слои стремятся уменьшиться в объеме. Этому препятствуют внутренние слои, остывающие медленно из-за малой теплопроводности стекла. Образующиеся напряжения между наружными и внутренними слоями приводят к разрушению стекла. Те же процессы протекают и при резком нагревании стекла. Разница заключается в том, что при охлаждении в стекле образуются напряжения растяжения, а при нагревании – напряжения сжатия.

Наблюдаемое поведение листовых стекол разной толщины обусловлено масштабным эффектом, согласно которому увеличение размеров образцов приводит к большей величине перепада температур по толщине стекла, а значит, и увеличению напряжений, возникающих в объеме стекла при его охлаждении. Это вызывает разрушение при перепадах температур на 20–60 °С ниже для образцов толщиной 3–6 мм, в сравнении с листовыми стеклами толщиной 2 мм.

Выбран интервал варьирования температуры и времени обработки листовых стекол в расплаве KNO_3 . Для температуры он составлял 440–500 °С и обусловлен тем, что, с одной стороны, ее значение должно обеспечивать получение расплава, с другой – температура расплава не должна быть выше, чем температура стеклования листового стекла, чтобы не вызывать релаксацию напряжений, возникающих в результате диффузии ионов калия в поверхностный слой стекла.

Время выдержки листового стекла в расплаве KNO_3 составляло 1 ч. Обработка проводилась в сушильном шкафу при различных температурах – 440, 470 и 500 °С.

Температурно-временной режим обработки образцов листовых стекол приведен в таблице 4.

Таблица 4. – Температурно-временной режим обработки

Условия обработки в расплаве KNO_3		
Время выдержки, ч	Толщина стекла, мм	Температура обработки, °С
1	2	440
		470
		500
1	3	440
		470
		500

Перед обработкой стекла дополнительно подогревались, чтобы при помещении в расплав для обработки не имело место явление термоудара и образцы не разрушились. Образцы помещались в кювету из проволоки и затем в расплав. Длительность обработки составила 1 ч. Температура обработки измерялась хромель-алюмелевой термопарой в пределах ± 5 °С. После обработки кювета с образцами извлекалась из расплава и помещалась в сушильный шкаф для последующего медленного охлаждения. После охлаждения образцов и извлечения из кюветы производились измерения их свойств.

Микротвердость. Результаты измерения микротвердости образцов листового стекла толщиной 2 и 3 мм представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Микротвердость стекол до и после обработки в расплаве KNO_3

Толщина, мм	Микротвердость, МПа			
	до обработки	после обработки при температурах, °С		
		440	470	500
2	5212	6159	6039	5403
3	5180	6102	5890	5413

По представленным данным в таблице 5 можно сделать вывод, что в результате обработки в расплаве KNO_3 наблюдается увеличение микротвердости опытных образцов листовых стекол на 190–950 МПа для образцов толщиной 2 мм и 230–920 МПа для 3 мм.

Механическая прочность. Результаты измерения механической прочности образцов толщиной 2 и 3 мм представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Механическая прочность листовых стекол до и после обработки в расплаве KNO_3

Толщина, мм	Механическая прочность, МПа			
	до обработки	после обработки при температурах, °С		
		440	470	500
2	60	136,4	126,7	75,4
3	78	144,4	127,3	80,8

В результате обработки в расплаве KNO_3 произошло увеличение механической прочности опытных образцов листового стекла на 15–75 МПа для образцов толщиной 2 мм и 10–75 МПа для 3 мм, что обусловлено образованием напряжений сжатия в поверхностном слое в результате диффузии ионов K^+ .

Наибольший эффект повышения прочности стекол достигается при температуре обработки 440 °С, дальнейшее увеличение температуры выдержки в расплаве KNO_3 также обеспечивает увеличение прочности стекол, но в меньшей степени.

Обработка стекол при более высоких температурах 470 и 500 °С позволяет интенсифицировать процесс диффузионного обмена ионов Na^+ на K^+ в поверхностном слое стекла, что обеспечивает быстрое увеличение концентрации ионов K^+ в стекле, а значит, и рост напряжений сжатия. Однако, по-видимому, возникающие напряжения сжатия частично релаксируют.

Термостойкость. Результаты измерения термостойкости образцов листового стекла толщиной 2 и 3 мм представлены в таблице 7.

Таблица 7. – Термостойкость листовых стекол до и после обработки в расплаве KNO_3

Толщина, мм	Термостойкость ΔT , °С			
	до обработки	после обработки при температурах, °С		
		440	470	500
2	145	165	160	150
3	125	135	130	130

После термообработки в расплаве KNO_3 термостойкость листовых стекол увеличилась до 130–165 °С. Изменение термостойкости опытных образцов листового стекла толщиной 2 мм составило 5–20 °С и для 3 мм 5–10 °С. Это вполне закономерно с учетом увеличения механической прочности у образцов листового стекла, которая положительно коррелирует с термостойкостью.

Анализ полученных данных показывает, что при обработке образцов листового стекла номиналами 2 и 3 мм в расплаве соли KNO_3 наибольшее положительное влияние оказала обработка при температуре 440 °С: значение микротвердости увеличилось на 150 МПа для образцов толщиной 2 мм, для образцов толщиной 3 мм – на 230 МПа; значение механической прочности увеличилось на 75 МПа для обоих номиналов образцов листового стекла; значение термостойкости увеличилось на 20 °С для образцов листового стекла толщиной 2 мм, для образцов толщиной 3 мм – на 10 °С.

Для дальнейших исследований было выбрано листовое стекло толщиной 2 мм, поскольку для него был достигнут больший эффект в повышении механической прочности и термостойкости, чем для листового стекла толщиной 3 мм. Следует отметить, что положительным фактором, указывающим на целесообразность применения стекла толщиной 2 мм, является его меньший вес, что позволит снизить трудо- и энергозатраты при его транспортировке и установке.

При выполнении экспериментальных исследований порядок опытов в матрице планирования был рандомизирован. Каждый опыт повторялся несколько раз для оценки дисперсии воспроизводимости.

Проведены исследования микротвердости, прочности при изгибе и термостойкости обработанных образцов. Результаты исследований представлены в таблице 8.

Таблица 8. – Усредненные значения свойств обработанных стекол

№ опыта	T, °C	τ, ч	Микротвердость, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Термостойкость, °C
1	470	2	6419	157,40	170
2	500	2	5635	94,10	160
3	440	2	6483	162,60	175
4	470	3	6597	171,73	175
5	500	3	6374	153,73	170
6	440	3	6672	258,50	200
7	470	1	6039	126,70	160
8	500	1	5403	75,40	150
9	440	1	6159	136,40	165

Примечание. Значения свойств исходного стекла: микротвердость – 5215 МПа; прочность при изгибе – 60 МПа; термостойкость – 145 °C.

Заключение

В данной работе исследованы исходные свойства листовых стекол различной толщины (2, 3, 4 и 6 мм). Показано, что с увеличением толщины стекла снижается значение термостойкости. Наибольшей термостойкостью обладают стекла толщиной 2 и 3 мм, которые в дальнейшем были подвергнуты ионообменной обработке.

Использование упрочняющего реагента KNO_3 в интервале температур 440–500 °C в течение 1 ч для стекол толщиной 2 и 3 мм показало, что свойства (микротвердость, механическая прочность и термостойкость) листового стекла толщиной 2 мм значительно улучшаются. Механическая прочность возрастает в 2–2,5 раза, термостойкость на 20–30 °C. Использование листовых стекол толщиной 2 мм позволяет снизить вес светопрозрачных конструкций. Уменьшить расходы на транспортировку листового стекла, упростить процесс их установки. В связи с этим в дальнейшем исследования выполнялись на образцах стекол толщиной 2 мм.

Для оптимизации температурно-временного режима обработки листовых стекол использован метод математического планирования. Получены регрессионные зависимости свойств образцов стекол от режима обработки в расплаве KNO_3 .

Установлено, что определяющим фактором, влияющим на термостойкость и механические свойства (микротвердость и механическая прочность) стекла толщиной 2 мм при низкотемпературной ионообменной обработке в расплаве KNO_3 является время выдержки образцов в расплаве KNO_3 при максимальной температуре обработки. Определен оптимальный температурно-временной режим обработки листового стекла толщиной 2 мм: температура обработки – 440 °C и время выдержки – 3 ч. Обработанное стекло характеризуется высокими показателями механических свойств и термостойкости: микротвердость – 6672 МПа; механическая прочность – 258,5 МПа; термостойкость – 200 °C при сохранении оптических свойств.

Полученные данные можно использовать для создания пожаростойких светопрозрачных ограждающих конструкций, прошедших химическую закалку и обладающих повышенными термомеханическими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казиев, М.М. Разрушение светопрозрачных строительных конструкций при тепловом воздействии в условиях пожара / М.М. Казиев, А.В. Подгрушный, А.В. Дудунов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 2. – С. 5–10.
2. Liu, W. Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study / W. Liu, Z. Lian, Q. Deng, Y. Liu // Building and Environment. – 2011. – Vol. 46, Iss. 2. – P. 478–488. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.08.011.
3. Дудунов, А.В. Пожароустойчивость светопрозрачного заполнения оконных строительных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / А.В. Дудунов. – М., 2010. – 128 с.
4. Святкин, Г.К. Расчетная модель разрушения остекления при тепловом воздействии пожара / Г.К. Святкин // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – № 4. – С. 54–57.

Повышение термомеханических свойств листовых стекол с целью создания пожаростойких светопрозрачных ограждающих конструкций высотных зданий
Increasing the thermomechanical properties of sheet glasses for the purpose of creation of fire-resistant light-transparent enclosures of high buildings

Бирюк Виктор Алексеевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра промышленной безопасности, заведующий кафедрой
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: vik_biruk@tut.by
ORCID: 0000-0002-3110-9557

Viktor A. Biryuk

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety, Head of the Chair
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
e-mail: vik_biruk@tut.by
ORCID: 0000-0002-3110-9557

Давыдик Максим Анатольевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра промышленной безопасности, адъюнкт
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: maximdavidik@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9451-9513

Maksim A. Davydik

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety, Adjunct
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
e-mail: maximdavidik@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9451-9513

Кравчук Александр Петрович

кандидат технических наук, доцент
Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», кафедра технологии стекла и керамики, доцент
Адрес: ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь
e-mail: kravchuk@belstu.by
ORCID: 0000-0002-6951-0717

Kravchuk A. Petrovich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Belarusian State Technological University,
Chair of Glass and Ceramics Technology,
Associate Professor
Address: Sverdlova str., 13a, 220006, Minsk, Belarus
e-mail: kravchuk@belstu.by
ORCID: 0000-0002-6951-0717

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.311>

INCREASING THE THERMOMECHANICAL PROPERTIES OF SHEET GLASSES FOR THE PURPOSE OF CREATION OF FIRE-RESISTANT LIGHT-TRANSPARENT ENCLOSURES OF HIGH BUILDINGS

Biryuk V.A., Davydik M.A., Kravchuk A.P.

Purpose. Investigation of the thermomechanical properties of sheet glass used for translucent enclosing structures with the development of measures to increase the level of fire safety of high-rise buildings.

Methods. To solve the set tasks, theoretical and experimental research methods are used. The theoretical method is based on solving the problems of the thermal regime of solids and analyzing the criteria for the destruction of translucent structures in a fire. The experimental method is based on the identification of the relationship between the parameters of the fire and the criteria for the destruction of the translucent facade on the fire floor and upper lying floors.

Findings. The review of the state of the problem in the field of fire safety of high-rise buildings with facade glazing is carried out. It is established that the currently used translucent enclosing structures are made mainly of multilayer or tempered glass, which causes an increased load on the foundation, high cost and does not always preserve the integrity of the structure in the event of a fire. Experimental studies of the hardening of sheet glass of different denominations by chemical quenching were carried out, the possibility of using this method to create fireproof glasses was evaluated.

Application field of research. Fire safety in construction, translucent building envelopes.

Keywords: fire safety, translucent structures, fire resistance, heat resistance, chemical hardening.

(The date of submitting: July 20, 2021)

REFERENCES

1. Kaziev M.M., Podgrushnyi A.V., Dudunov A.V. Razrushenie svetoprozrachnykh stroitel'nykh konstruksiy pri teplovom vozdeystvii v usloviyakh pozhara [Destruction of translucent building structures during heat exposure in fire]. *Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2009. No. 2. Pp. 5–10. (rus)
2. Liu W., Lian Z., Deng Q., Liu Y. Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study. *Building and Environment*, 2011. Vol. 46, Iss. 2. Pp. 478–488. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.08.011.
3. Dudunov A.V. *Pozharoustoychivost' svetoprozrachnogo zapolneniya okonnykh stroitel'nykh konstruksiy* [Fire resistance of translucent window building structure]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Moscow, 2010. 128 p. (rus)
4. Sviatkin G.K. Raschetnaya model' razrusheniya ostekleniya pri teplovom vozdeystvii pozhara [Computational model of the destruction of glazing under the thermal effect of a fire]. *Fire and Explosion Safety*, 1993. No 4. Pp. 54–57. (rus)