

М.М. Казиев, А.В. Дудунов
РАЗРУШЕНИЕ ОСТЕКЛЕНИЯ ОКОН

В данной статье даётся анализ существующих теорий разрушения остекления окон при пожаре. Приведены значения предела прочности листового стекла толщиной 4, 5 и 6 мм размером 370×270 мм при стандартном температурном воздействии на установке "малая огневая печь". Также получены значения коэффициента, учитывающего изменение предела прочности от толщины стекла при стандартном температурном режиме.

Ключевые слова: огнестойкость, термостойкость, коэффициент линейного теплового расширения, предел прочности, модуль упругости, фактор масштабности, листовое стекло.

Окна являются важным элементом, влияющим на развитие пожара. Это обусловлено тем, что при разрушении остеклений пожар, из-за притока воздуха в зону горения, начинает бурно развиваться и распространяться по всему зданию. При определенных условиях комната может быть мгновенно охвачена пламенем (так называемая объемная вспышка). Поскольку длительность начального этапа пожара до полного охвата помещения пламенем имеет непосредственное отношение к обеспечению безопасности людей, существенное внимание уделяется знанию параметров горючей нагрузки и условий вентиляции, которые влияют на скорость нарастания пожара. Таким образом, точное предсказание момента разрушения стекла, является важным элементом при моделировании развития пожара.

Разнообразие конструктивных решений требует разработки научно-обоснованного метода расчета предела огнестойкости стеклоконструкций. Разработка такого метода позволила бы проводить расчёт противопожарной преграды, которая оптимально, с экономической и технической точки зрения, сочетала бы в себе требуемые характеристики в зависимости от назначения и предполагаемой области применения [1].

Термостойкость остекления

Термостойкость – способность стекла выдерживать резкие перепады температур без разрушения. Изменение температуры, будь то равномерный нагрев всего стекла или различных его участков до разных температур, оказывает влияние в той же степени, что и механическая нагрузка от ветра, скопления людей и собственного веса. Стекло разрушается, когда напряжения при термической нагрузке достигают разрушающих значений [2].

Связь термостойкости с другими свойствами стекла выражается формулой:

$$\Delta T = \frac{\sigma_{пч}}{\alpha E}, \quad (1)$$

где $\sigma_{пч}$ – предел прочности при изгибе или разрыве;

α – коэффициент линейного теплового расширения стекла, $85 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ (соответствует диапазону нагрева стекла от 20 до 400 $^\circ\text{C}$);

E – модуль упругости стекла, $70 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

Главное влияние на термостойкость оказывает коэффициент линейного расширения α [3].

Величина допустимых напряжений не является величиной постоянной, а изменяется в зависимости от:

- длительности действия нагрузки;
- схемы и жёсткости закрепления стекла;
- соотношения длины и ширины стекла.

Способность сохранять целостность стекла изменяется в зависимости от температуры. В начальной стадии пожара устойчивость стекла (до начала растрескивания) снижается и достигает своего минимума при +200 $^\circ\text{C}$, а в дальнейшем устойчивость начинает увеличиваться и достигает максимума при +500 $^\circ\text{C}$. Увеличение устойчивости и сохранение целостности при высоких температурах (до +500 $^\circ\text{C}$) объясняется повышением пластичности и "самозалечиванием" дефектов [4].

Существующие теории в области прогнозирования разрушения остекления окон при пожаре

Теорию разрушения остекления в условиях пожара предложили в 1994 г. американские учёные А.А. Joshi и Р.Ж. Pagni [5]. Теория основана на учёте разности концентрации внутренних напряжений в плоскости и по краям (кромкам) листа из-за разности температур между средней частью стекла и закрытыми рамой краями. Исследователями была предложена методика расчета разрушения стекла при тепловом нагреве:

$$\beta \Delta T = \sigma_b / E, \quad (2)$$

где ΔT – разница температуры между краями и центром стекла;

β – коэффициент линейного теплового расширения;

σ_b – предел прочности стекла на растяжение;

E – модуль Юнга.

Skelli M.J. экспериментально изучил разрушение стекла при нагреве [6]. Горючей нагрузкой была горючая жидкость в поддонах. Эти эксперименты показали, что зависимость (2) справедлива для теплового разрушения стекла.

В статье американских учёных Bernard R. Cuzzillo и Patrick J. Pagni [7] предложен метод расчёта огнестойкости оконного остекления. Они описывают разрушение как одинарного, так и двойного стекла. Показано, что разрушение стекла вызывает механическое напряжение, которое возникает вследствие неравномерности прогрева стекла по площади и по толщине.

В статье была рассмотрена схема прогрева стекла, где показано, что температура стекла быстрее повышается в середине окна, чем около рамы. Следовательно, центральная часть стекла расширяется быстрее, чем более холодные края, защищенные рамой. Проведенные испытания [8] могут подтвердить, что разрушение остекления окон при пожаре происходит на краях стекла. Стекло разрушается, когда средняя температура центральной части – Tm_b достигает критической температуры:

$$Tm_b - T_i = f Tc, \quad (3)$$

где $f = 2[\tanh(s/L) + \ln(\cosh(H/L)/\cosh(s/L))L/(s+H)]^{-1}$;

$$Tc = \sigma_b / E\beta;$$

s – ширина стекла, закрытая рамой;

L – толщина стекла;

H – половина ширины окна;

σ_b – предел прочности стекла на растяжение;

β – коэффициент линейного теплового расширения;

E – модуль Юнга;

T_i – начальная температура.

Проанализировав существующие методики можно выявить направления дальнейших научных исследований:

1. Фактор масштабности f , приведенный в методике [7], не в полной мере учитывает размеры стеклоконструкции, это доказывают проведенные испытания на малой огневой печи [9].

2. Так как геометрические размеры остекления влияют на предел прочности, необходимо выявить зависимость их влияния на время разрушения стекла при тепловом воздействии.

Определение предела прочности листового стекла

В своем исследовании американские ученые [11] поставили целью определение предела прочности методом сгибания. Испытания проводились на 59 одинаковых образцах. Результаты показали, что есть большой разброс в значениях предела прочности почти идентичных экземпляров. Самая низкая величина предела прочности – 36,5 МПа и самая высокая – 128 МПа.

Как известно [4], прочность стекла зависит от температуры (рис. 2).

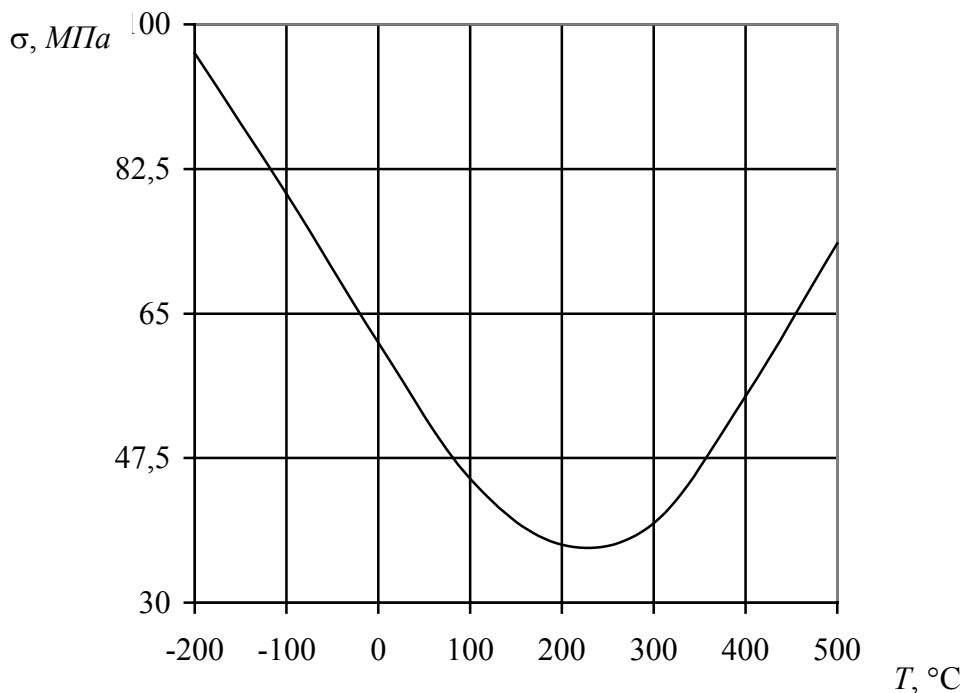


Рис. 2. Зависимость предела прочности стекла от температуры по Станварту

Поэтому для прогнозирования времени разрушения оконного остекления необходимо знать предел прочности стекла при тепловом воздействии.

Результаты экспериментального исследования

Для определения предела прочности листового стекла при тепловом воздействии нами был проведён ряд испытаний обычного стекла различных толщин с краями, закрытыми рамой, на установке "малая огневая печь". В результате проведенных испытаний была получена разность температур между открытой и закрытой рамой частями стекла. Зная значения модуля упругости для стекла ($E = 70000 \text{ МПа}$), коэффициента линейного теплового расширения ($\alpha = 85 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [2]), разности температуры обогреваемой и необогреваемой частей стекла (4 мм – 34 °С, 5 мм – 71 °С, 6 мм – 115 °С) при растрескивании образца и подставив их в (1), было установлено значение предела прочности для листового стекла различной толщины при температурном воздействии.

Таблица 1

Значение предела прочности листового стекла толщиной 4, 5 и 6 мм размером 370×270 мм при стандартном температурном воздействии

Толщина стекла, мм	4	5	6
Предел прочности, МПа	21	42	70

В соответствии с полученными данными в выражение (1) необходимо добавить коэффициент, учитывающий толщину стекла.

$$\Delta T = k \frac{\sigma_{пч}}{\alpha E},$$

где k – коэффициент, учитывающий изменение предела прочности от толщины стекла при стандартном температурном режиме.

Таблица 2

Значение коэффициента, учитывающего изменение предела прочности от толщины стекла при стандартном температурном режиме

Толщина стекла, мм	4	5	6
Коэффициент k	0,44	0,8	1,48

Значение предела прочности $\sigma_{пч}$ принимается средним и составляет 50 МПа [10].

Также нами были проведены крупномасштабные испытания оконного остекления в испытательной лаборатории в г. Ардатов Нижегородской области. Было установлено время разрушения первого остекления толщиной 4 мм и размером 1630×1040 мм, которое в среднем составляет 35 с.

По результатам проведённых исследований были сформулированы следующие выводы

1. Для листового стекла толщиной 4, 5 и 6 мм и размерами 370×270 мм значения коэффициента, учитывающего изменение предела прочности листового стекла при тепловом воздействии, составляет, соответственно, 0,44; 0,80 и 1,48. Значение коэффициента существенно зависит от толщины стекла и его геометрических размеров.

2. Время разрушения стекла на маломасштабной установке превышало время разрушения на крупномасштабной установке на 10 %.

3. Предел прочности стекла при изгибе в нормальных условиях [11] выше, чем предел прочности стекла в раме, на 40 %, что обусловлено разностью температур между открытой и закрытой частью стекла.

Литература

1. Казиев М.М. Некоторые аспекты пожаробезопасного применения светопрозрачных строительных конструкций в зданиях и сооружениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – №4. – С. 38-41.
2. Клинд Л., Клейн В. Стекло в строительстве. Свойства. Применение. Расчеты / Перевод с немецкого Глазунова П.И., Гусевой Т.Ф., Липкинда З.А. Под ред. Трохимовской И.П., Шехтера Ф.Л. – М.: Стройиздат, 1981.
3. Христофоров А.И., Христофорова И.А. Расчет физико-химических свойств стекол: Учеб. пособие. – Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2004.
4. Бондарев К.Т. Стекло в строительстве. – Киев, 1969.
5. Joshi A.A., Pagni P.J. Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass. I-Theori // Fire

Safety Journal, 1994. – P. 25-43.

6. Skelly M.J., Roby R.J., Beyler C.L. Window breakage in compartment fires // Journal of Fire Protection Engineering, 1991. – P. 25.

7. Cuzzillo B.R., Pagni P.J. Thermal breakage of double-pane glazing by fire // Journal of Fire Protection Engineering. – 1998. – vol. 9. – No. 1. – P. 1-11.

8. Shields T.J., Silcock G.W., Hassani S.K.S. The behavior of double glazing in an enclosure fire // Journal of Applied Fire Science. – 1997-98. – Vol. 7(3). – P. 267-286.

9. Казиев М.М., Дудунов А.В. Огнестойкие светопрозрачные конструкции // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – №2. – С. 53-55.

10. Подстригач Я.С., Осадчук В.А., Марголин А.М. Остаточные напряжения, длительная прочность и надёжность стеклоконструкций. – Киев: Наукова думка, 1991.

11. Joshi A.A., Pagni P.J. Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass. II - Experiments // Fire Safety Journal, 1994. – P. 45-63.