

Формула стеклопакета для зданий повышенной этажности

Директор А. Ю. Куренкова,

НИУПЦ «МИО»;

магистрант А. В. Кузьменко;

магистрант О. М. Куренкова;*

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: светопрозрачные конструкции; формула стеклопакета; здания повышенной этажности; толщина наружного стекла; эксплуатационная нагрузка; монтажная нагрузка; ветровая нагрузка; оконные блоки; дверные блоки; гармонизация норм

В городах нашей страны все больше строится домов высотой более 16 этажей. С переходом на массовое применение стеклопакетов в оконных блоках становится актуальным расчет формулы стеклопакета для новых высотных зданий.

Почему проблема расчёта формулы стеклопакета не рассматривалась ранее? На начальном этапе производства (в советский период) расчёт производился по СН-481-75 «Инструкция по проектированию, монтажу и эксплуатации», но на оборудовании того времени не могли изготавливаться стеклопакеты больших размеров, поэтому особой актуальности таких расчётов не было. Кроме того, методика расчёта прочностных свойств стеклопакета, изложенная в данной инструкции, довольно сложна и крайне редко применялась при проектировании.

В 90-х годах XX века, с приходом в нашу страну новых технологий изготовления стеклопакетов, появилась возможность значительно увеличить их габаритные размеры. Но стеклопакеты монтировали главным образом на высотах до 40 м, что также не вызывало потребности в расчётах толщины наружного стекла или величины межстекольного расстояния в стеклопакете.

Однако увеличение доли светопрозрачных конструкций на фасадах и повышение этажности жилых домов поставили новые задачи и потребовали учитывать в расчёте формулы стеклопакета не только ветровые нагрузки, указанные в СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия», но и конкретные условия их эксплуатации.

Европейские нормативные документы включают в себя DIN 1055-4-2005 [1], DIN1249 [2], DIN 18516 [3] и позволяют произвести достаточно обоснованный расчёт прочности стеклопакетов с учетом всех видов нагрузок. Но в отличие от европейских, в российских климатических условиях стеклопакет испытывает гораздо большие температурные перепады, особенно в весенний период. В течение года температура меняется от -50°C до $+80^{\circ}\text{C}$ на южных фасадах, а весной в течение суток изменение температуры может быть до 40°C . Такие температурные воздействия требуют увеличения толщины стекла для обеспечения нормальной эксплуатации при резких изменениях нагрузок. Кроме того, продолжительность строительства высотных объектов в России превышает один год, что ставит стеклопакет в период производства строительных работ в условия эксплуатации, отличные от проектных. Эти особенности описаны в работах Борискиной И.В. [4, 5, 6], Кондратьева Н. [7], Лаутер К. [8], Микова В.Л. [9], Милькова В.Г. [10], Щурова А.Н. [11, 12].

Для объектов многоэтажного и высотного строительства определение ветровых нагрузок, действующих на стеклопакет, играет важную роль. Кроме того, разрушение стеклопакетов может быть обусловлено воздействием перепадов температур и атмосферного давления на стадии зимнего монтажа, а также в период эксплуатации стеклопакетов, особенно в период незавершённого или приостановленного строительства.

Компенсация повышенных нагрузок и воздействий увеличением толщины стекла влечёт за собой рост цены не только стеклопакета, но и всего окна в целом, т.к. увеличение веса может потребовать дополнительных затрат как на фурнитуру, так и на элементы несущей конструкции оконного блока. Поэтому расчёт формулы стеклопакета является также финансовым инструментом.

Постановка задачи

Целью данной статьи является адаптация методики расчета формулы стеклопакета с учётом кратковременных монтажных нагрузок в период возведения и нагрузок, возникающих на стадии эксплуатации здания. Учитывая тот факт, что сегодня предстоит гармонизация российских нормативов с европейскими, в методике были взяты за основу и адаптированы к российским климатическим условиям нормы, применяемые в Европейском Союзе.

Прочностные расчёты стеклопакетов по данной методике должны выполняться после теплотехнического расчёта оконного блока по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» и СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». Затем происходит уточнение и корректировка его формулы с учётом монтажных и эксплуатационных нагрузок в соответствии с требованиями к стеклу ГОСТ 111-2001 «Стекло листовое. Технические условия». Прочностные расчёты стеклопакетов производятся из условия совместного воздействия ветровой и климатической нагрузок (перепады температур и давления во внутренней полости стеклопакета) и сводятся к определению необходимой толщины стёкол и величины межстекольного расстояния для стеклопакета в соответствии с его габаритными размерами и высотной отметкой установки.

Предлагаемая методика включает в себя учёт нагрузки на стеклопакет и расчет прогиба стекла как оценочной характеристики разрушения стекла.

Расчет нагрузки на стеклопакет

При расчёте принимаем, что наибольшую нагрузку испытывает наружное стекло стеклопакета. Цилиндрическую жесткость стекла считаем не зависящей от температуры, атмосферное давление в период производства и давление при эксплуатации одинаковы.

По европейской методике полная нагрузка, действующая на наружное стекло, определена как:

$$P = P_{\delta} + W_m + \Delta P, \quad (1)$$

где P_{δ} – собственный вес стекла и снега на единицу площади [кН/м²];

W_m – ветровая нагрузка [кН/м²];

ΔP – климатическая нагрузка от перепадов атмосферного давления и температуры, [кН/м²].

Для стеклопакета, установленного вертикально, $P_{\delta}=0$ (оконные и фасадные конструкции), соответственно, формула (1) запишется в виде:

$$P = W_m + \Delta P. \quad (1.1)$$

Аналогично статическим расчётам профильных элементов, расчётное значение ветрового давления принимается согласно DIN EN 12210-2003 [13].

Значение климатической нагрузки ΔP определяется согласно DIN 1055 [1] по формуле:

$$P_0 = 0,34\Delta T - \Delta P_{мет} + 0,012\Delta h, \quad (2)$$

где $\Delta T = T_t - T_{пр}$ – разница температур эксплуатации и производства стеклопакета (разница температур в воздушной полости стеклопакета во время производства и в данный момент эксплуатационного периода), [°K];

$\Delta P_{мет} = P_t - P_{пр}$ – разница атмосферных давлений во время эксплуатации и во время производства стеклопакета, [кН/м²];

$\Delta h = h_t - h$ – разница геодезических высот места эксплуатации и места производства стеклопакета, [м] (не более 500 м).

При условии производства и эксплуатации стеклопакетов в одном климатическом регионе и при относительно постоянном атмосферном давлении уравнение (2) запишется в виде:

$$P_0 = 0,34\Delta T. \quad (2.1)$$

При этом расчётное значение климатической нагрузки может быть приближённо определено из соотношения:

$$P_0 = 0,34\alpha\Delta T, \quad (3)$$

где α – коэффициент, определяющий жёсткость стеклопакета и зависящий от его габаритных размеров и толщины стёкол и воздушной прослойки [5].

Куренкова А.Ю., Кузьменко А.В., Куренкова О.М. Формула стеклопакета для зданий повышенной этажности

Прогиб стекол

Возможность разрушения стеклопакета под действием неблагоприятного сочетания климатических и ветровых нагрузок оценивается величиной максимально допустимого прогиба в центральной зоне, зависящего от величины расчётного сопротивления листового стекла растяжению при изгибе. Согласно рекомендациям ГОСТ 24866-99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения», эту величину рекомендуется принимать $\sigma_{из} = 15 \text{ МПа} = 150 \text{ кгс/см}^2 = 0,15 \text{ кН/м}^2 = 15 \text{ Н/мм}^2$. В европейских документах это значение намного выше российских нормативов. Так, согласно DIN 1249-10 [2], расчётное сопротивление листового стекла растяжению при изгибе принимается равным $\sigma_{из} = 30 \text{ Н/мм}^2$, закалённого стекла – 50 Н/мм^2 .

Согласно рекомендациям [13], величину максимально допустимого прогиба при изгибе принимаем равной $f_{изг} \leq L/100$, где L – длинная сторона стеклопакета [мм].

Фактический прогиб стёкол в реальных условиях эксплуатации не является постоянным и зависит как от температуры воздуха в воздушной прослойке стеклопакета в текущий момент времени, так и от жёсткости стёкол, определяемой их толщиной и габаритами.

Пример расчета формулы стеклопакета

Рассчитаем с использованием данной методики формулу стеклопакета для здания, имеющего следующие характеристики:

- место строительства – Санкт-Петербург;
- район строительства – II согласно СНиП 2.01.07-85*;
- тип местности – С: согласно п. 6.5 СНиП 2.01.07-85*;
- высота здания $H = 81 \text{ м}$;
- аэродинамический коэффициент $c = 1,2$ (определён генеральным проектировщиком).

Приведём расчёт стеклопакета размером $637 \times 1290 \text{ мм}$.

На основании теплофизических требований для Санкт-Петербурга (согласно СНиП 23-01-99) задаётся предварительная формула стеклопакета 4М1-16-И4. Из того же СНиП интервал эксплуатационных температур задаётся от -30°C до $+22^\circ\text{C}$.

Максимальная высота отметки фасада 81 м от поверхности земли.

$$W_m = 1,435 \text{ кН/м}^2$$

Наихудшие условия для стеклопакета создаются в крайней зимней температурной точке (-30°C):

$$t_{расч} = \frac{t_в + t_n}{2} = \frac{+20 - 30}{2} = -5^\circ\text{C}, \quad (4)$$

где $t_в$ – температура воздуха помещения ($+20^\circ\text{C}$);

t_n – температура наружного воздуха (-30°C).

Эксплуатационная климатическая нагрузка:

$$P_0 = 0,34\Delta T = 0,34(T_t - T_{np}) = 0,34((-5 + 273) - (+18 + 273)) = -7,82. \quad (2.1)$$

Монтажная климатическая нагрузка:

$$P_0 = 0,34\Delta T = 0,34(T_t - T_{np}) = 0,34((-30 + 273) - (+18 + 273)) = -16,32. \quad (2.1)$$

Коэффициент жёсткости стеклопакета:

$$\alpha = \frac{1}{1 + (K/K^*)^4}, \quad (5)$$

где K – короткая сторона стеклопакета, [мм];

K^* – «характеристическая длина» стеклопакета, [мм], определяемая как:

$$K^* = \sqrt[4]{\frac{SD_1 D_2}{Pn(D_1 + D_2)Av}} \quad (6)$$

Для стеклопакета с одинаковыми стёклами уравнение (6) запишется в виде:

$$K^* = \sqrt[4]{\frac{SD^2}{2D Pn Av}} = \sqrt[4]{\frac{SD}{2 Pn Av}} \quad (6.1)$$

где S – ширина межстекольного пространства (воздушной прослойки) стеклопакета, [мм];
Pn – нормальное атмосферное давление, принимаемое равным Pn=0,1Н/мм²;
D₁, D₂ – цилиндрические жесткости стёкол, определяемые как

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} \quad (7)$$

где E – модуль упругости стекла E=70000 [Н/мм²];
δ – толщина стекла, [мм];
μ – коэффициент Пуассона (для стекла μ=0,23).

Следовательно:

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-0,23^2)} = \frac{70000\delta^3}{11,37} = 6156\delta^3.$$

Av – безразмерная величина, зависящая от соотношения короткой и длинной сторон стеклопакета. Для стеклопакета 637x1290 это соотношение составит K/L=637/1290=0,49. Методом интерполяции по данным табл. 1 получаем Av = 0,00447.

Таблица 1. Зависимость значения Av от сторон стеклопакета [4]

Соотношение сторон (K/L)	Av
1:2	0,0044
0,45	0,00478

Для δ = 4 мм (предварительная толщина стекла):

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} = 6156 \times 4^3 = 393984.$$

Предварительная величина воздушной прослойки 16 мм:

$$K^* = \sqrt[4]{\frac{SD}{D Pn Av}} = \sqrt[4]{\frac{16 \times 393984}{2 \times 0,1 \times 0,0047}} = 286, \quad (6.1)$$

тогда

$$\alpha = \frac{1}{1 + (K/K^*)^4} = \frac{1}{1 + (637/286)^4} = 0,039. \quad (5)$$

При учёте коэффициента жёсткости стеклопакета расчётные климатические нагрузки составят:

- эксплуатационная нагрузка

$$\Delta P = \alpha P_0 = 0,039 \times 7,82 = 0,3 \text{ кН/м}^2; \quad (8.1)$$

- монтажная нагрузка

$$\Delta P = \alpha P_0 = 0,039 \times 16,32 = 0,64 \text{ кН/м}^2. \quad (8.2)$$

Суммарные расчётные нагрузки на наружное стекло:

- эксплуатационная нагрузка

$$P = W_m + \Delta P = 1,435 + 0,3 = 1,735 \text{ кН/м}^2; \quad (1.1)$$

- монтажная нагрузка

$$P = W_m + \Delta P = 1,435 + 0,64 = 2,075 \text{ кН/м}^2. \quad (1.1)$$

Требуемая толщина наружного стекла δ , необходимая для восприятия расчётных нагрузок, определяется согласно [2] по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{\varphi P (K/2)^2 \times 10^3}{\sigma_{из}}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{из}$ – прочность стекла при изгибе [Н/мм²], принимается согласно ГОСТ 24866-99 $\sigma_{из} = 15 \text{ Н/мм}^2$.

$$\delta = \sqrt{\frac{2,45 \times 1,735 (0,637/2)^2 \times 10^3}{15}} = 5,36.$$

Таким образом, **необходимая толщина наружного стекла по расчету 6 мм.**

Эксплуатационный прогиб наружного стекла равен:

$$f = \frac{\psi P (K/2)^4 \times 10^9}{E \delta^2} \leq f_{из2}. \quad (10)$$

Здесь φ , ψ определяются из соотношения L/K по табл. 2 методом интерполяции.

Таблица 2. Зависимость расчётных коэффициентов от отношения сторон стеклопакета [4]

L/K	φ	ψ
1,36	1,76	1,19
1,38	1,79	1,22

Отсюда получаем для наружного стекла:

$$f = \frac{1,78 \times 2,075 \times (0,637/2)^4 \times 10^9}{70000 \times 6^2} = 2,51 \text{ мм},$$

эксплуатационный прогиб внутреннего стекла определяем аналогично:

$$f = \frac{1,78 \times 2,075 \times (0,637/2)^4 \times 10^9}{70000 \times 4^2} = 8,48 \text{ мм}.$$

Тогда суммарный «встречный» расчетный прогиб обоих стёкол составит $8,48 + 2,51 = 10,99 \text{ мм}$.

Таким образом, воздушная прослойка между стеклами для рассчитываемых условий должна быть не менее 11 мм, что исключает применение в стеклопакетах наиболее распространенной межстекольной рамки 10 мм. Кроме того, прогиб внутреннего стекла превышает действующие нормативы, что потребует также увеличения его толщины.

Выводы

1. Предлагаемая методика позволяет в расчете формулы стеклопакета учесть не только ветровые нагрузки, но и температурные климатические воздействия для конкретного места установки оконного блока.

2. Расчёты свидетельствуют о необходимости использования данной методики, в первую очередь, для зданий повышенной этажности. Обязательность таких расчётов повысит безопасность эксплуатации стеклопакетов и практически исключит вероятность растрескивания стекла. Расчёт позволяет получить наиболее точную формулу стеклопакета, рассчитать не только толщину наружного и внутреннего стекла, но и величину межстекольного расстояния, что ранее не практиковалось.

3. Для конкретных условий расчёта при высоте установки оконного блока более 80 метров максимальный расчетный «встречный» прогиб обоих стёкол с учетом всех нагрузок и воздействий составил 11 мм, что исключает применение для данной и большей высоты наиболее распространенной межстекольной рамки толщиной 10 мм. Кроме того, толщина внутреннего стекла по результатам расчета должна быть увеличена до 5 мм для обеспечения требований ГОСТ 24866-99.

4. Для минимизации растрескивания стекла в стеклопакете и получения графика зависимости соотношения сторон и толщины стёкол в дальнейшем необходимо проведение лабораторных исследований.

Литература

1. DIN 1055-4-2005. Action on structures – Part 4: Wind loads.
2. DIN 1249. Glass for use in building construction; chemical and physical properties.
3. DIN 18516. Cladding for external walls, ventilated at rear – Part 1: Requirements, principles of testing.
4. Борискина И. В., Щуров А. Н., Плотников А. А. Окна для индивидуального строительства. Техническое руководство по проектированию современных окон из ПВХ для объектов коттеджного строительства и зданий малоэтажной застройки / ООО «Функе Рус», ООО «Кристалл Гласс», «ЗИГЕНИЯ-АУБИ КГ». М., 2010. 320 с.
5. Борискина И. В., Шведов Н. В., Плотников А. А. Современные светопрозрачные конструкции гражданских зданий. Справочник проектировщика. Том II Оконные системы из ПВХ / НИУПЦ «Межрегиональный институт окна». СПб., 2005. 320 с.
6. Борискина И. В., Плотников А. А., Захаров А. В. Проектирование оконных систем гражданских зданий: Учебное пособие. СПб.: ВЫБОР, 2008. 360с.
7. Кондратьева Н. В. Прочность листового стекла в фасадных системах, покрытиях и перекрытиях зданий и сооружений // Стекло и бизнес. 2010. №2. С. 40-42.
8. Лаутер К., Веер Ф. Экспериментальное исследование армированной стеклянной балки длиной 18 м в масштабе 1:4. Часть I // Стекло и бизнес. 2009. №3. С. 40-45.
9. Миков В. Л. Внимание высота // Светопрозрачные конструкции. 2003. №6(32). С. 51-52.
10. Мильков В. Г., Успенский А. А. Создание стеклопакетов для зданий повышенной этажности // Стройпрофиль. 2006. №3(49). С. 72-74.
11. Щуров А. Н. Прочностные расчёты стёкол в стеклопакете // Светопрозрачные конструкции. 2005. №6(44). 2005. С. 33.
12. Щуров А. Н. Прочностные расчёты стёкол в стеклопакете // Светопрозрачные конструкции. 2006. №1(45). С. 48-49.
13. DIN EN 12210-2003: Windows and doors – Resistance to wind load – Classification (includes Corrigendum AC: 2002). Publication Date: Aug 1, 2003.

** Ольга Мирославовна Куренкова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(904)639-28-32; эл. почта: kurenkova.om@mail.ru*