Construction of Unique Buildings and Structures

journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru`

doi: 10.18720/CUBS.68.1

Несущая способность клеевых соединений в конструкциях навесных фасадных систем

Load-carrying ability of adhesive joints in suspended facade constructions

М.К. Михайлова [1*], А.В. Галямичев [2]

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

M.K. Mikhaylova [1*], A.V. Galyamichev [2]

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

структурное остекление;
силиконовый герметик;
фиксация;
стекло;
фасад;
клеевое соединение;
светопрозрачные конструкции;
навесной фасад;
несущая способность;
строительство;

KEYWORDS

structural glazing;
silicone adhesive;
fixation;
glass;
façade;
adhesive joint;
translucent structures;
suspended facade;
load-carrying ability;
construction;

ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 14.12.2017
Принята: 28.05.2018

ARTICLE HISTORY

Submitted: 14.12.2017
Accepted: 28.05.2018

АННОТАЦИЯ

В рамках данной статьи рассматривается вид крепление светопрозрачных ограждающих конструкций при помощи структурного силиконового герметика. Данный вид остекления называется структурным. Это способ, при котором стекло приклеивается непосредственно металлической раме, которая, в свою очередь крепится к несущим конструкциям здания. Все нагрузки, воздействующие на облицовку, передаются связующее вещество, то есть силиконовый герметик, который должен поддерживать долговечную адгезию и целостность в течении всего срока эксплуатации. В работе рассмотрены основные моменты, которые необходимо учитывать при проектировании данной конструкции, а также представлен ход расчета геометрических параметров клеевого соединения на основании EOTA ETAG002.

ABSTRACT

In this article the type of fastening translucent enclosing structures using a structural silicone sealant is considered. This kind of glazing is called structural glazing. This is the method then glass is glued directly to the metal frame which is attached to the bearing structure of the building. All loads applied to the facing are transferred to the binder, the silicone sealant, which must maintain a long-lasting adhesion and integrity throughout the lifetime of the building. The paper considers the main points that must be taken into account in this type of structure design process and the course of calculation of the geometrical parameters of the adhesive joint based on EOTA ETAG002 is presented.

Содержание

1. Введение 2
2. Методы 3
3. Результаты и обсуждение 4
4. Заключение 12

1. Введение

Фасадные конструкции в мире оценивают по ряду критериев, среди которых можно выделить архитектурную концепцию, качество применяемых материалов, технологичность применяемых решений, сложность исполнения и повторения. На тему фасадных конструкций на данный момент было написано немало трудов, например, А.А. Магай и Н.В. Дубынин в статье [1] рассматривают различные варианты фасадного остекления, а Чесноков А.Г. обращает внимание на проблемы, с которыми связано проектировании подобных конструкций [2]. Савицкий Г.А. и Кук Н. Дж. заостряют внимание на влияние ветровой нагрузки на здания и сооружения [3-5]. Авторы в работах [6-11] рассматривают навесные вентилируемые фасады, включая основные проблемы, связанные с проектированием и конструкцией. В статье [12] заостряется внимание на стоимости реновации фасадов. Рыбаков В.А. и Гамаюнова О.С. рассматривают работу тонкостенных стержней [13]. Авторы работ [14,15] пишут про материалы, применяемые в фасадном строительстве, в том числе и про стекло, а именно светопрозрачные конструкции. Аспекты повышения эксплуатационных показателей и долговечности конструкций навесных фасадных систем затрагиваются авторами в работах [16-18].

При этом немаловажным фактором, влияющим на восприятие объекта, является использование скрытых методов крепления облицовки и декоративных элементов.

В рамках данного исследования объектом изучения является силиконовая клеевая система, определяемая для условий работы в составе навесной фасадной системы. Данный вид остекления называется структурным, оно позволяет отказаться от рам, что выглядит очень эффектно. В данном случае стекло крепится на герметик, который благодаря высокой эластичности может передавать нагрузки более эффективно и равномерно. В остеклении оптимально распределяются температуры, что снижает риск разрушения из-за их перепадов.

В статьях [19-21] рассмотрено скрытое клеевое крепление, описаны проблемы, связанные с его проектированием, лабораторные испытания, которым подвергают крепление, а также представлены их результаты с анализом. Авторы [22-25] заостряют внимание на таком материале как силикон, на характеристиках данного материала и особенностях его применения в качестве крепления для фасадных панелей. В работах [26-28] описаны особенности нанесения клеящего вещества, а также вопросы энергоэффетивности.

Данный тип конструкции подвергается ряду климатических воздействий, которые необходимо учитывать при проектировании, среди них:

1. ветровое воздействие;
2. гололедная нагрузка;
3. температурное воздействие (расширение, сжатие);
4. снеговая нагрузка (при наклонном расположении ограждающей конструкции).

Кроме того, важно учитывать нагрузку от собственного веса облицовки [29-30].

При этом, на сегодняшний день необходимо обращать внимание на характеристики, касающиеся адгезии клеевого состава к конструкции каркаса (алюминиевым сплавам или нержавеющей стали).

В качестве подконструкции для нанесения клеевой системы допустимо применять алюминий (без покрытия, анодированный, с порошковым и PVDF - покрытием) и нержавеющую сталь [31].

Среди объектов, фасады которых выполнены по технологии структурного остекления, можно выделить «Dept. Store P&C» в Кельне, «80 Victoria Street» и «London Bridge Tower» в Лондоне, а также «Federation Tower» в Москва-Сити. Последний объект является первым случаем применения данной технологии на территории России, тем не менее проект фасадной конструкции был разработан американской компанией «Thornton Tomasetti».

Целью исследования является определение различий в расчете по европейским нормам с учетом и без учета требований национальных сводов правил.

В работе будут решены следующие задачи:

1. классификация вариантов фиксации элементов навесных фасадных систем;
2. определение факторов, оказывающих значительное влияние на силу сцепления поверхностей стекла и подконструкции, таких как способы подготовки поверхности;
3. рассмотрение методов расчета по ETAG и ASTM, а также произведение расчета по методике ETAG с учетом требований национальных стандартов «СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*»;
4. приведение различий между расчетами по методике ETAG с учетом и без учета национальных стандартов.

2. Методы

В настоящее время в России не существует собственного стандарта для структурного остекления, поэтому при проектировании данного вида конструкций следует ориентироваться на европейский EOTA ETAG 002 [32] или американские ASTM C 1184 [33] и ASTM C 1401 [34] стандарты.

Кроме вышеперечисленных стандартов для структурного остекления существуют также французские нормы CSTB 3486 и китайские GB 16776.

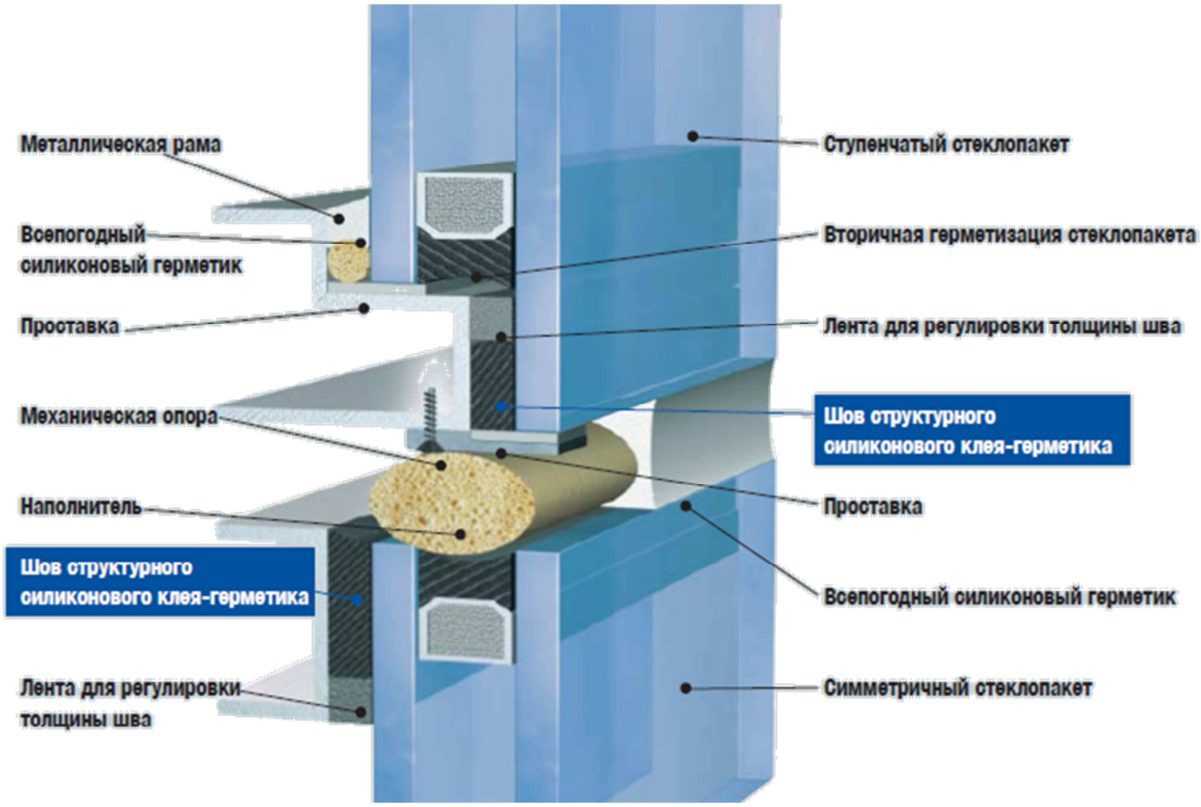


Рисунок 1. Конструкция структурного остекления [31]

Клеевое соединение подвергается значительным сдвиговым нагрузкам, поэтому необходимо рассчитывать толщину шва на их поглощение.

При расчете данного вида крепления принимаются во внимание следующие факторы:

- размеры стекла и конструкции;
- максимальные перепады температур;
- коэффициенты теплового расширения склеиваемых материалов;
- расчетные значения толщины шва: половина ширины шва (минимум 6 мм) [32].

Клеевой шов должен удовлетворять определенным геометрическим характеристикам, приведенным в таблице 1 [32].

Таблица 1. Геометрические характеристики клеевого шва

1	Минимальная толщина шва e	e = 6 мм в соответствии с EOTA ETAG 002, e=5 мм в соответствии с ASTM C 1401
2	Отношение ширины шва к толщине h/e	от 1:1 до 3:1, т.е. $e \leq h \leq 3e$

Кроме того, следует учитывать следующие факторы:

1. Все причины сдвигов:

   - Тепловые сдвиги из-за разных коэффициентов теплового расширения стекла и опорной конструкции. Так как размеры швов должны быть одинаковыми для всего объекта, их необходимо рассчитывать в соответствии с размерами наибольшего листа стекла;
   - Другие причины, такие как усадка, просадка или локальные напряжения.

2. Все допуски, включая допуски на разрезку стекла и/или металла и установку;

3. Температура нанесения клея/герметика (+15 - +140°C)
4. Необходимо предотвращать трехстороннюю адгезию герметика, так как это ограничивает деформацию шва под нагрузками и может привести к его повреждению в период эксплуатации здания в результате температурных воздействий.

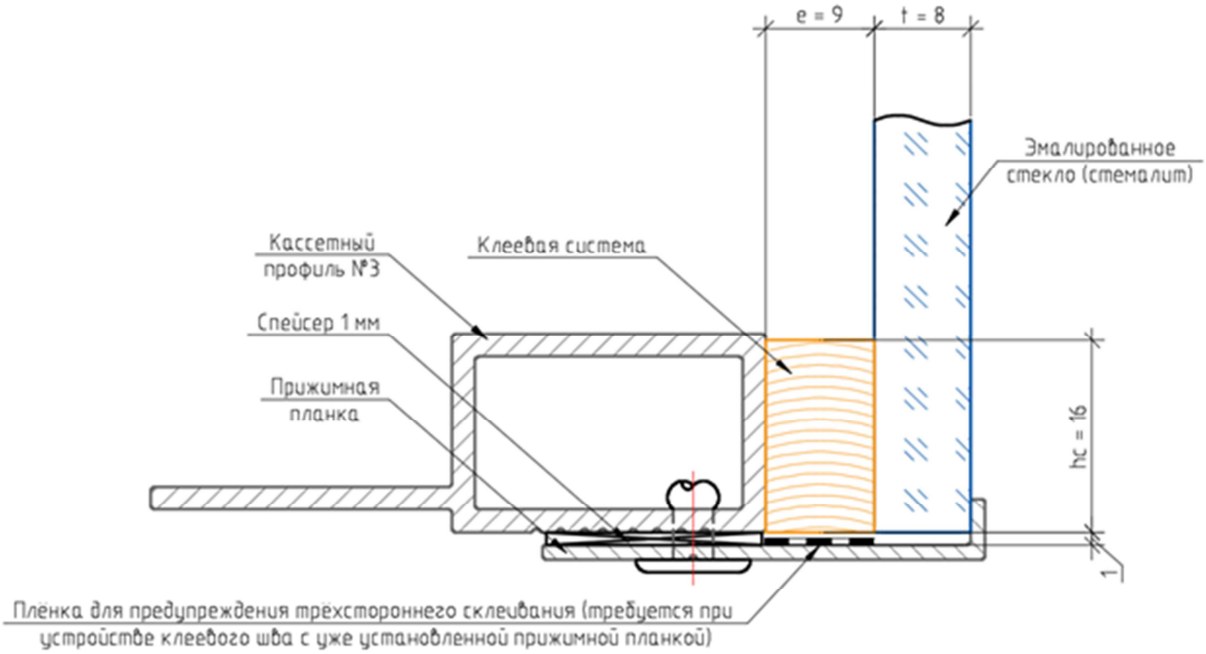


Рисунок 2. Конструктивное решение по устройству клеевого шва в объёме кассеты

Экстремальные температуры не должны разрушать или необратимо деформировать элементы структурного остекления. Согласно ETAG 002 учитывается диапазоном температур поверхности стекла от -20 до 80 °C, а для непрозрачного остекления - от -20 до 100 °C. Однако, необходимо заметить, что для северных стран нижний предел температур достигает -40°C [32].

Опорная рама рассчитываются для следующих температурных перепадов:

$\Delta T = T_v - T_c = +25°C$ - в летних условиях;

$\Delta T = T_v - T_c = -25°C$ - в зимних условиях,

где T_v – температура поверхности стекла;
T_c – температура поверхности опорной рамы.

Если же опорная рама контактирует с окружающей средой по всему периметру, то в расчете необходимо использовать температуры поверхностей стекла и рамы $T_v = T_c = 80°C$, как для наиболее суровых условий [32].

3. Результаты и обсуждение

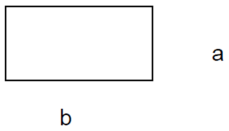
3.1. Расчет клеевого соединения: по европейскому стандарту EOTA ETAG 002 [32] и по американскому стандарту ASTM C1401 [34]

I. Порядок расчета по европейскому стандарту EOTA ETAG 002 [32]:

Определение требуемой толщины шва (e):

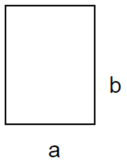
$$e = \frac{G \cdot \Delta}{\tau_{des}}.$$

a) При механическом опиранием стекла на элементы каркаса по стороне b:



$$\Delta = [(T_c - T_0) \cdot a_c - (T_v - T_0) \cdot a_v] \cdot \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2};$$

b) При механическом опиранием стекла на элементы каркаса по стороне a:



$$\Delta = [(T_c - T_0) \cdot a_c - (T_v - T_0) \cdot a_v] \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2};$$

c) Без механического опирания стекла на элементы каркаса:

$$\Delta = [(T_c - T_0) \cdot a_c - (T_v - T_0) \cdot a_v] \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2};$$

где τ_{des} – расчетная динамическая прочность на срез (принимается для выбранного герметика по сертификату соответствия стандартам EOTA ETAG 001);

G – модуль сдвига (принимается для выбранного герметика по сертификату соответствия стандартам EOTA ETAG 001) [32];

Δ – максимальное значение расширения под действием температуры, зависящее от соотношения сторон стеклопакета;

T_c – температура металлической рамы в момент t (в соответствии с п.4.4.4 EOTA ETAG 002 часть 1) [32];

T_v– температура стекла в момент t (в соответствии с п.4.4.4 EOTA ETAG 002 часть 1)[32];

$T_0 = 20°C$ – температура во время нанесения герметика;

$a_c = 24 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент температурного расширения рамы;

$a_v = 9 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент температурного расширения стекла.

Определение требуемой высоты шва (h_c) при растяжении/сжатии шва герметика при механическом опирании стекла на подкладки:

$$\sigma_{centre} = \frac{W \cdot a}{2 \cdot h_c},$$

$$h_c \geq \frac{a \cdot W}{2 \cdot \sigma_{des}};$$

где σ_{centre} – напряжение в центре длинной стороны панели;

a – ширина стекла;

W – нагрузка от ветра и снега, Па (вычисление производится по пиковой ветровой нагрузке);

σ_{des} – напряжение растяжения (в соответствии с п.4.4.4 EOTA ETAG 002 часть 1) [32].

Определение требуемой высоты шва (h_c) при растяжении/сжатии шва герметика без механического опирания стекла на подкладки:

$$h_c \geq \frac{P}{\sqrt{2\tau_\infty \cdot h_v}},$$

Однако должно выполняться неравенство:

$$h_c \geq \frac{a \cdot W}{2 \cdot \sigma_{des}},$$

где P – собственный вес;

$\tau_\infty = \frac{\tau_{des}}{\gamma_c}$ – напряжение сдвига от постоянной нагрузки (γ_c– коэффициент надежности по нагрузке для изоляционных конструкций);

h_v – высота стекла;

a – короткая сторона стекла;

W – нагрузка от ветра и снега, Па;

σ_{des} – напряжение растяжения (в соответствии с п.4.4.4 EOTA ETAG 002 часть 1) [32].

II. Порядок расчета по американскому стандарту ASTM C1401 [34]:

Деформация конструкции структурного остекления (SG):

$$\Delta l_{v,h} = l_{v,h} \cdot \left[\left(a_f \cdot \Delta T_f\right) - \left(a_g \cdot \Delta T_g\right)\right],$$

где $\Delta l_{v,h}$ - изменение длины, мм;
$l_{v,h}$ - сторона стеклопакета (вертикальная/горизонтальная), мм;
a_f – коэффициент расширения металлической рамы;
ΔT_f – средний перепад температур рамы;
a_g – коэффициент расширения стекла;
ΔT_g – средний перепад температур стекла.

Суммарные сдвиги:

$$\Delta l = \sqrt{\Delta l_v^2 + \Delta l_h^2}\,.$$

Расчет толщины шва e:

$$e \geq \frac{\Delta l}{\sqrt{2c + c^2}},$$

где c – максимальное допустимое удлинение для силиконовых клеев.

Расчет ширины шва h:

$$h = \frac{G \cdot 9{,}81}{l_v \cdot \sigma_{stat}},$$

где h – минимальная ширина клеевого шва, мм;
G - вес стекла или элемента конструкции, кг;
l_v – длина вертикальной стороны клеевого шва, м;
σ_{stat} – допустимое напряжение клеевого шва, кПа.

3.2. Расчет по EOTA ETAG 002 с учетом требований «СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*»

На основе архитектурного решения объекта исследования в данной статье приведен пример расчета геометрических размеров клеевого шва.

Расчет будем выполнять аналитически на основе формул из EOTA ETAG 002 [32] с учетом требований «СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*» [37].

Исходные данные для расчёта:

– Четырехсторонняя вклейка;

– Панель с механической поддержкой от весовых нагрузок и без поддержки;

– Размеры панели - 3070x1500x6 мм;

– Максимальная температура нагрева стекла - $T_v = 80°C$;

– Максимальная температура нагрева алюминия - $T_v = 55°C$;

– Температура окружающей среды во время нанесения герметика - $T_0 = 20°C$;

– Коэффициент температурного расширения стекла - $\alpha_{Gl} = 9 \cdot 10^{-6} \frac{м}{м\,°C}$;

– Коэффициент температурного расширения алюминия - $\alpha_{Al} = 24 \cdot 10^{-6} \frac{м}{м\,°C}$.

Ветровая нагрузка

Ветровое воздействие принимается в виде равномерно распределенной нагрузки в пределах высоты здания [37]. Необходимо отметить, что типом местности для назначения ветрового давления на торгово-развлекательный центр является тип «А».

Сбор нагрузок осуществляется для двух вариантов приложения ветровой нагрузки [37]:

1. Рядовая зона, высота +38.200 м;
2. Угловая зона, высота секции +38.200 м.

Равномерно распределённая нормативная ветровая нагрузка на стойку определяется по формуле [37]:

$$q = w_{+(-)} \cdot B,$$

где B – грузовая ширина приложения ветровой нагрузки;

$w_{+(-)}$ – нормативное значение пикового положительного и отрицательного воздействия ветровой нагрузки, определяемого по формуле:

$$w_{+(-)} = w_0 k(z_e)[1+\xi(z_e)]c_{p_{+(-)}} v_{+(-)},$$

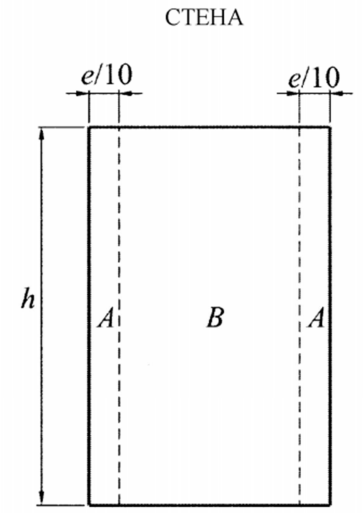
где z_e – эквивалентная высота ($z_e = 38{,}2$ м);

$k(z_e), \xi(z_e)$ – коэффициенты, учитывающие изменение давления и пульсаций давления ветра на высоте z_e соответственно:

$$k(38{,}2) = 1.49;\ \xi(38{,}2) = 0{,}62$$

$v_{+(-)}$ – коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (–) в зависимости от площади ограждения А, с которой собирается ветровая нагрузка, для панели с размерами ВхН = 3070 х 1500 мм - $v_{+(-)} = 0{,}91$

$c_{p_{+(-)}}$ – пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного давления (+) или отсоса (–), определяемые по рис. 3:



Участок	А	В
$c_{p,-}$	–2,2	–1,2

Рисунок 3. Иллюстрация к определению аэродинамических коэффициентов $c_{p_{+(-)}}$ [37]

В соответствии с Рис. 3, фасадные конструкции расположены в различных зонах по типу приложения ветровой нагрузки, следовательно $c_{p_{+(-)}} = 1{,}2$ или $c_{p_{+(-)}} = 2{,}2$ принимается в зависимости от местоположения конструкции. Таким образом, окончательная формула для определения ветровой нагрузки приобретает вид:

Рядовая зона:

$$w_{p-} = 23 \cdot 1{,}49 \cdot [1+0{,}62] \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}91 = 61{,}1 кгс/м.кв.$$

Угловая зона:

$$w_{y-} = 23 \cdot 1{,}49 \cdot [1+0{,}62] \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}91 = 112{,}01 кгс/м.кв.$$

Гололедная нагрузка

В соответствии с СП 20.13330.2016, для декоративной облицовки фасадов зданий необходимо учитывать гололедные нагрузки [37].

Расчётное значение поверхностной гололедной нагрузки $i`$, Па, определяется по формуле:

$$i` = b \cdot k \cdot \mu_2 \cdot \rho_i \cdot g \cdot \gamma_f;$$

где b – толщина стенки гололеда, мм, для II гололёдного района:

$$b = 5 \text{ мм}$$

k – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте и принимаемый по таблице 12.3 СП 20.13330.2016 [37];

$$k(80{,}9) = 1{,}87$$

μ_2 – коэффициент, учитывающий отношение площади поверхности элемента, подверженной обледенению, к полной площади поверхности элемента и принимаемый равным 0,6;

ρ_i – плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см3;

g – ускорение свободного падения ($\frac{м}{c^2}$);

γ_f – коэффициент надёжности по нагрузке, принимаемый для гололёдной нагрузки равным 1,8.

$$i` = 0{,}005 \cdot 1{,}87 \cdot 0{,}6 \cdot 900 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}8 = 89{,}16 \text{ Па}$$

$$i` = 9{,}1 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$$

Нормативное значение ветровой нагрузки на покрытые гололедом элементы следует принимать равным 60 % от нагрузки w.

Определение требуемой толщины шва (e):

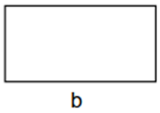
Согласно п. A2.3 EOTA ETAG 002 [32], условие прочности шва герметика с механическим опиранием стекла на элементы каркаса достигается при ширине герметика:

$$e = \left|\frac{\mathrm{G} \cdot \Delta}{\tau_{des}}\right|$$

где $\tau_{des} = 0{,}105$ МПа – расчетная динамическая прочность на срез, согласно ETA-03/0038 для Sikasil SG-500 (Сертификат соответствия стандартам EOTA ETAG 001 часть 1, стр. 12) [32];

$\mathrm{G} = 0{,}5$ МПа - модуль сдвига, согласно ETA-03/0038 (Сертификат соответствия стандартам EOTA ETAG 001 часть 1, стр. 5) [32];

Δ - максимальное значение расширения под действием температуры, зависящее от соотношения сторон стеклопакета.



$$\Delta = [(T_c - T_0).\alpha_c - (T_v - T_0).\alpha_v].\sqrt{a^2 + (b/2)^2}$$

$$\Delta = [(55 - 20) \cdot 24 \cdot 10^{-6} - (80 - 20) \cdot 9 \cdot 10^{-6}] \cdot \sqrt{1{,}5^2 + \left(\frac{3{,}07}{2}\right)^2} = 0{,}64 \text{ мм}$$

$$e = \left|\frac{0.5 \cdot 0{,}64}{0.105}\right| = 3{,}1 \text{ мм}$$

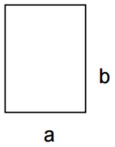
Согласно п. A2.4 EOTA ETAG 002-1, условие прочности шва герметика без механического опирания стекла на элементы каркаса достигается при ширине герметика:

$$e = \left|\frac{\mathrm{G} \cdot \Delta}{\tau_{des}}\right|$$

где $\tau_{des} = 0{,}105$ MPa – расчетная динамическая прочность на срез, согласно ETA-03/0038 (Сертификат соответствия стандартам EOTA ETAG 001 часть 1, стр. 12) [32];

$\mathrm{G} = 0{,}5$ MPa - модуль сдвига, согласно ETA-03/0038 (Сертификат соответствия стандартам EOTA ETAG 001 часть 1, стр. 5) [32];

Δ - максимальное значение расширения под действием температуры, зависящее от соотношения сторон стеклопакета.



$$\Delta = [(T_c - T_0).\alpha_c - (T_v - T_0).\alpha_v].\sqrt{(a/2)^2 + (b/2)^2}$$

$$\Delta = [(55 - 20) \cdot 24 \cdot 10^{-6} - (80 - 20) \cdot 9 \cdot 10^{-6}] \cdot \sqrt{\left(\frac{1{,}5}{2}\right)^2 + \left(\frac{3{,}07}{2}\right)^2} = 0{,}51 \text{ мм}$$

$$e = \left|\frac{0.5 \cdot 0{,}51}{0.105}\right| = 2{,}4 \text{ мм}$$

Определение требуемой высоты шва (h_c):

Согласно п. A2.3.1 EOTA ETAG 002-1, условие прочности при растяжении/сжатии шва герметика при механическом опирании стекла на подкладки:

$$\sigma_{centre} = \frac{\mathrm{W} \cdot a}{2 \cdot h_c}$$

Таким образом, формула для определения ширины шва:

$$h_c \geq \frac{\mathrm{W} \cdot B}{2 \cdot \sigma_{des}}$$

Рассмотрим формулу подробнее. При наличии опор от сдвиговой нагрузки, а также при отсутствии наклона стеклопакета, расчет на растяжение/сжатие ведется по ветровой нагрузке. Суммарная отрывная нагрузка, учитывающая действие ветровой и гололедной нагрузок на стеклопакет составляет:

$$P = w_{+(-)} \cdot a \cdot b + i'$$

Рядовая зона:

$$w_{-} = w_{p-} \cdot \gamma_f = 61{,}1 \cdot 1{,}4 = 85{,}54 \text{ кг/м}^2$$

$$P = 85{,}54 \cdot 3{,}07 \ \cdot 1{,}5 + 9{,}1 = 403{,}1 \text{ кгс}$$

Угловая зона:

$$w_{-} = w_{y-} \cdot \gamma_f = 112{,}01 \cdot 1{,}4 = 156{,}8 \text{ кг/м}^2$$

$$P = 156{,}8 \cdot 3{,}07 \ \cdot 1{,}5 + 9{,}1 = 731{,}1 \text{ кгс}$$

Требуемая площадь соединения:

$$S = \frac{P}{\sigma_{des}}$$

где, $\sigma_{des} = 0{,}14 \text{ МПа}$ – расчетная динамическая прочность на разрыв, согласно ETA-03/0038 (Сертификат соответствия стандартам EOTA ETAG 001 часть 1, стр. 12)

$$S\text{р} = \frac{4031}{0.14} = 28792 \text{ мм}^2$$

$$S\text{у} = \frac{7311}{0.14} = 52221 \text{ мм}^2$$

Площадь, разделенная на две длины больших сторон (короткие стороны в расчете согласно EN13022 идут в запас), таким образом позволит вычислить требуемую ширину герметика:

$$h_c \geq \frac{\mathrm{S}}{2 \cdot a}$$

$$h_{\text{ср}} = \frac{28792}{2 \cdot 3070} = 4{,}7 \text{ мм}$$

$$h_{\text{су}} = \frac{52221}{2 \cdot 3070} = 8{,}5 \text{ мм}$$

С учетом:

$$e \leq h_c \leq 3e$$

Параметры швов клеевых соединений принимают вид:

$$h_c \text{ x } e = 8{,}5\text{x } 3{,}1 \text{ мм}$$

Согласно п. A2.4.3 EOTA ETAG 002-1, условие прочности при растяжении/сжатии шва герметика без механического опирания стекла на подкладки [32]:

$$\sigma_{centre} = \frac{\mathrm{W} \cdot b}{2 \cdot h_c}$$

Таким образом, формула для определения ширины шва:

$$h_c \geq \frac{\mathrm{W} \cdot b}{2 \cdot \sigma_{des}}$$

При отсутствии механического опирания стекла на элементы каркаса расчет на растяжение/сжатие ведется по ветровой нагрузке аналогично расчету для панели с механическим опиранием, с учетом:

$$e \leq h_c \leq 3e$$

Параметр шва клеевого соединения принимает вид:

$$h_c \text{ x } e = 8{,}5 \text{ x } 2{,}8 \text{ мм}$$

Для проверки клеевого шва на действие собственного веса стекла, применяется формула:

$$h_c \geq \frac{P}{2 \cdot \tau_{des} \cdot h_v}$$

$$h_c \geq \frac{3{,}07 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}006 \cdot 2500 \cdot 1{,}2}{2 \cdot 10704 \cdot 1{,}5}$$

$$h_c \geq 2.6 \text{ мм}$$

Формула для объединения полученных величин:

$$h_{tot} = \frac{h_{tencile}}{2} + \sqrt{(\frac{h_{tencile}}{2})^2 + {h_{shear}}^2}$$

$$h_{tot} = \frac{8{,}4}{2} + \sqrt{\left(\frac{8{,}4}{2}\right)^2 + 2{,}6^2} = 9{,}1 \text{ мм}$$

Необходимо учитывать, что толщина шва должна быть не менее 6 мм.

Таким образом, для унификации клеевых соединений с применением герметика, приняты единые минимально допустимые габариты клеевого шва для всех рассчитываемых конструкций:

$$h_c \text{ x } e = 10 \text{ x } 6 \text{ мм}$$

Включая рассмотренные силиконовые клеевые системы, на сегодняшний день существуют такие способы фиксации элементов навесных фасадных систем, как:

1. Открытый механический:
   1.1. На кляммерах
   1.2. На прижимных планках
2. Скрытый механический;
   2.1. С помощью анкерной техники (например, решения Keil, Duro PT);
   2.2. Крепление на пропилах;
   2.3. Крепление на пиронах.
3. Скрытый клеевой:
   3.1. Силиконовые клеевые системы;
   3.2. Полиуретановые клевые системы;
   3.3. Клеевая лента (типа 3М).
4. Комбинированный.

Клеи-герметики подразделяются на силиконовые и полиуретановые. Однако полиуретаны малоустойчивы к УФ-излучению, в следствии чего недопустимы к применению в структурном остеклении, так как адгезия к стеклу теряется в результате воздействия УФ-излучения [31].

По способу твердения клеи-герметики бывают однокомпонентные (1К) и двухкомпонентные (2К). 1К клей затвердевает от влаги воздуха. Отличается легкой дозировкой и нанесением, скорость его твердения зависит от влаги воздуха (2 – 4 мм за 24 ч при t = 23°С, 50%), в следствии чего пленка образуется в течении достаточно длительного промежутка времени. Глубина шва не должна превышать 15 мм.

1К герметики наносят с помощью пистолетов из картриджей или мягкой фольгированной упаковки

2К клей используется не только для структурной вклейки стеклопакетов, но и для вторичной герметизации. Твердение осуществляется по процессу поликонденсации. Основной компонент и катализатор смешиваются в определенных пропорциях, поликонденсация происходит при комнатной температуре. 2К клей способен выдерживать высокие нагрузки. Обладает малой усадкой при отвердевании.

Для 2К герметиков требуется механическое смешивание компонентов, в следствии чего процесс нанесения усложняется по сравнению с процессом нанесения 1К герметика.

Рисунок 4. Пистолет для нанесения 1К герметика [35]

Рисунок 5. Пистолет для нанесения 2К герметика [36]

В качестве подконструкции для структурного остекления преимущественно применяют алюминий, а именно: анодированный алюминий, алюминий с порошковым покрытием и алюминий с PVDF покрытием, кроме того применяют и нержавеющую сталь, однако, ее применение требует повышенного внимания [31].

Анодированный и окрашенный алюминий утвержден американскими и европейскими стандартами [32-34]. Для проверки адгезии герметика к профилю, а также применяемых при этом средств подготовки под воздействием отслаивающего усилия проводят адгезионные тесты. Адгезия должна быть больше прочности герметика. В случае, если герметик отрывается от поверхности, а не разрывается сам, данное условие не выполняется. Кроме того, существует тест на совместимость для определения последствий контакта материалов друг с другом.

Использование других материалов возможно, но на данный момент не допускается стандартами для структурного остекления: EOTA ETAG 002, ASTM C 1184 и ASTM C 1401 [32-34].

Для надежности и долговечности клеевого соединения требуется подготовка поверхностей, задача которой - обеспечить хорошую совместимость склеиваемых материалов.

Смачиваемость склеиваемых поверхностей - нанесение жидкого или пастообразного герметика на поверхность таким образом, что клей цепляется за поверхность на атомном уровне. Для обеспечения достаточной смачиваемости необходимо, чтобы поверхность была сухой и чистой, а вязкость жидкости/пасты не слишком высока и поверхностное натяжение подложки было выше, чем у жидкости/пасты.

В таблице 2 приведены этапы подготовки поверхности опорной рамы перед нанесением герметика.

Таблица 2 - Этапы подготовки поверхности опорной рамы

№	Способы подготовки	Описание

п/п	поверхности	
1	Механическая обработка	— Шлифование поверхности шлифовальной машинкой; — Ошкуривание поверхности абразивным материалом; — Очистка поверхности металлической щеткой; — Пескоструйная обработка поверхности.
2	Очистка поверхности	Очистка поверхности от пыли и грязи безворсовой тканью или очищающей бумагой
3	Нанесение активатора	Нанесение безворсовой тканью или адсорбирующей салфеткой активатора, который удаляет включения и загрязнения с поверхности и, осаждая химически активную группу, активирует подложку
4	Нанесение праймера	Нанесение при помощи фетра праймера, заполняющего неровности с целью получения однообразной поверхности и обеспечения адгезии между подложкой и клеем
5	Использование фиксирующей ленты	Нанесение по всей длине вертикального профиля основания и параллельно его краям клейкой фиксирующей ленты для обеспечения толщины шва и предварительной фиксации до полимеризации клея

Поверхность стекла перед приклейкой должна быть тщательно очищена, при этом грунтование не требуется. Для стекла с покрытием покрытие удаляется с поверхности в зонах нанесения герметика [31-32].

В работе был представлен расчет клеевого крепления по методике EOTA ETAG 002 с учетом требования «СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*». В отечественных работах, приведенных вначале этой статьи, авторы рассматривают общие вопросы, связанные с навесными фасадными системами и не затрагивают вопросы расчета силиконового крепления и его проектирования. Иностранные авторы, такие как Staudt Y. и Schneider J. изучают характеристики клеящего вещества, проводят лабораторные испытания, но не рассчитывают само крепление и не учитывают влияние гололедной нагрузки на панель облицовки.

4. Заключение

В данной работе были решены следующие задачи:

1. Элементы навесных фасадных систем по виду крепления классифицированы на скрытые, открытые и комбинированные, а также на механические и клеевые. В работе рассмотрены клеевые силиконовые системы;
2. Основными факторами, оказывающими влияние на расчет силиконового соединения являются климатические воздействия, собственный вес облицовки, качество подготовки и материалы склеиваемых поверхностей;
3. Представлен ход расчета клеевого крепления по методике ETAG, а также расчет крепления по методике EOTA ETAG 002 с учетом требования национальных стандартов «СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*» на примере объекта исследования. Основным различием является учет действия гололедной нагрузки на облицовку. Выявлено, что учет гололедной нагрузки не влияет на конечные результаты, размеры клеевого шва, для рассмотренного объекта, однако для случаев с более значительными показателями ветровых и гололедных нагрузок может оказать существенное влияние.

Литература

[1]. А.А. Магай и Н.В. Дубынин «Светопрозрачные фасады высотных многофункциональных зданий»// Вестник МГСУ. 2010. №2. с.14-21.

[2]. Чесноков А.Г. «Проблемы фасадного остекления».// «Стройпрофиль». 2005. №5 (43). С. 76-77.

[3]. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. Москва: Издательство литературы по строительству, 1972. С.15-32

[4]. Cook N.J. The designer's guide to wind loading of building

References

[1]. Magay A.A., Dubynin N. V. Svetoprozrachnye fasady vysotnyh mnogofunkcional'nyh zdanij [Translucent facades of high-rise multipurpose buildings]. MGSU Bulletin magazine. 2010. No. 2. Pp. 14-21. (rus).

[2]. Chesnokov A.G. Problemy fasadnogo ostekleniya [Façade glazing problems]. «Strojprofil'». 2005. 5 (43). Pp. 76-77. (rus)

[3]. Savitskiy G.A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind load on buildings]. Moskva: Izdatelstvo literatury postroitelstvu, 1972.

structures. Part 2: Static structures. – London: Butterwords

[5]. Семенов А.А., Порываев И.А., Кузнецов Д.В., Нгуен Т.Х., Саитгалина А.С., Трегубова Е.С., Напряженно-деформированное состояние высотного здания при ветровом воздействии и прогрессирующем обрушении, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, № 8 (59). С. 7-26.

[6]. Стаценко Е.А., Островая А.Ф., Киселев С.С. Вентилируемые стеклянные фасады. Параметры воздушного зазора // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №12 (39). С. 32-42.

[7]. Стаценко Е.А., Островая А.Ф., Мусорина Т.А., Куколев М.И., Петриченко М.Р. Простая модель теплоустойчивой ограждающей конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 8(68). С. 86–91.

[8]. Немова Д.В. Навесные вентилируемые фасады: обзор основных проблем//Инженерно-строительный журнал. 2010. №5. Сс. 7-11 Горшков А.С., Попов Д.Ю., Глумов А.В. Конструктивное исполнение вентилируемого фасада повышенной надежности// Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 5-9

[9]. Горшков А.С., Попов Д.Ю., Глумов А.В. Конструктивное исполнение вентилируемого фасада повышенной надежности // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8. С. 5-9

[10]. Гагарин А.А., Вентилируемые фасады // XXXII Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. 2004. С. 115.

[11]. Явтушенко Е.Б., Петроченко М.В. Диффузорная конструкция навесного вентилируемого фасада // Инженерно – строительный журнал. 2013. №8. С. 38-45. СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. 2005. С. 73-75.

[12]. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Немова Д.В., Ватин Н.И. Методика расчета окупаемости инвестиций по реновации фасадов существующих зданий// Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №2 (17). С. 82-106

[13]. Рыбаков В. А., Гамаюнова О. С. Напряженно-деформированное состояние элементов каркасных сооружений из тонкостенных стержней// Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013, №7 (12). С. 79-123

[14]. Осипова Е.С. Светопрозрачные конструкции в современном строительстве // XXXIII Неделя науки

[15]. Симакова Е.А. Современные технологии и материалы в архитектурных решениях фасадов зданий и сооружений // XXXIII Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. 2005 . С. 100-102.

[16]. Ватин Н. И., Корниенко С. В. Кирпичи и камни с высокой пустотностью в облицовочной кладке наружных стен (в порядке научной дискуссии)//Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №1 (52). С. 86-92.

[17]. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Петриченко М.Р., Горшков А.С., Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле//Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №6. С.19-33.

[18]. Корниенко С.В., Попова Е.Д. "Зеленое" строительство в России и за рубежом // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 4 (55). С. 67-93.

[19]. Staudt Y., Odenbreit C., Schneider J. Investigation of Bonded Connections with Silicone under Shear Loading. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass. Ghent University. 2016.

[20]. Van Den Bergh S., Hart R., Petter B., Jelle B.P., Gustavsen A. Window Spacers and Edge Seals in insulating glass units: A State-of-the-Art Review and Future Perspectives. Energy and Buildings. 2013. 58. Pp. 263-280.

Pp.15-32 (rus)

[4]. Cook N.J. The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures. – London: Butterwords,

[5]. Semenov A.A., Porivaev I.A., Kuznetcov D.V., Nguen T.H., Saitgalina A.S., Tregubova E.S. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie vysotnogo zdaniya pri vetrovom vozdeystvii i progressiruyushchem obrushenii [Stress-train state of high-rise building under wind load and progressive collapse]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 8 (59). Pp. 7-26. (rus)

[6]. Statsenko E.A., Ostrovaia A.F., Kiselev S.S. The ventilated glass facades. Ventiliruemye steklyannye fasady. Parametry vozdushnogo zazora [Parameters of an air gap]. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 12 (39), Pp. 32-42. (rus)

[7]. Statcenko E.A., Ostrovaia A.F., Musorina T.A., Kukolev M.I., Petritchenko M.R. Prostaya model' teploustoychivoy ograzhdayushchey konstrukcii [The elementary mathematical model of sustainable enclosing structure]. Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 8. Pp. 86–91.

[8]. Nemova D.V. Navesnye ventiliruemye fasady: obzor osnovnyh problem [The hinged ventilated facades: review of the main problems]. Magazine of Civil Engineering. 2010. No. 5. Pp. 7-11. (rus).

[9]. Gorshkov A.S., Popov D.Yu. Konstruktivnoe ispolnenie ventiliruemogo fasada povyshennoj nadezhnosti [The Design of the ventilated facade of the increased reliability]. Magazine of Civil Engineering. 2010. No. 8. Pp. 5-9. (rus).

[10]. Gagarin A.A. The ventilated facades. The XXXII Week of science SPbSTU. Materials of interuniversity scientific and technical conference. 2004. 115 p.

[11]. Yevtushenko E.B., Petrochenko M.V. Diffuzornaya konstrukciya navesnogo ventiliruemogo fasada [The diffuser design of ventilated facades]. Magazine of Civil Engineering. 2013. No.8. Pp.38-45. (rus).

[12]. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Nemova D.V., Vatin N.I. Metodika rascheta okupaemosti investiciy po renovacii fasadov sushchestvuyushchih zdaniy [Method of calculating the payback period of investment for renovation of building facades]. Construction of Unique Buildings and Structures, 2014, 2 (17). Pp. 82-106. (rus)

[13]. Rybakov V. A., Gamayunova O. S. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie ehlementov karkasnyh sooruzheniy iz tonkostennyh sterzhney [The stress-strain state of frame constructions' elements from thin-walled cores]. 2013, 7 (12). Pp. 79-123 (rus)

[14]. Osipova E.S. Translucent designs in modern construction. The XXXIII Week of science SPbSTU. Materials of interuniversity scientific and technical conference. 2005. Pp. 73-75.

[15]. Simakova E.A. Modern technologies and materials in architectural concepts of facades of buildings and constructions. The XXXIII Week of science SPbSTU. Materials of interuniversity scientific and technical conference. 2005. Pp. 100-102.

[16]. Vatin N.I., Kornienko S.V. Kirpichi i kamni s vysokoj pustotnost'yu v oblicovochnoj kladke naruzhnyh sten [Masonry units with high percentage of holes in a facing laying of external walls] (as a scientific discussion). Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. No.1 (52). Pp. 86-92 (rus).

[17]. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Petritchenko M.R., Gorshkov A.S. Ocenka vlazhnostnogo rezhima mnogoslojnoj stenovoj konstrukcii v godovom cikle [Evaluation of hygrothermal performance of multilayered wall design in annual cycle]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2015. No.6. Pp. 19-33 (rus).

[18]. Kornienko S.V., Popova E.D. "Zelenoe" stroitel'stvo v Rossii i za rubezhom [«Green» construction in Russia and other countries]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. No.4 (55). Pp. 67-93 (rus).

[19]. Staudt Y., Odenbreit C., Schneider J. Investigation of Bonded Connections with Silicone under Shear Loading. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass. Ghent University.

[21]. Pascual C., Montali J., Overend M. «Adhesively-bonded GFRP-glass sandwich components for structurally efficient glazing applications»// Composite Structures. 2017. № 160. Pp. 560–573;

[22]. Staudt Y., Schneider J, Odenbreit C. Investigation of the material behavior of bonded connections with silicone. International Conference at glasstec. 2014.

[23]. Gent, A. Elastic instabilities in rubber. International Journal of Non-Linear Mechanics. 2005. 40(2). Pp. 165-175.

[24]. Dias V. Development of adhesives constitutive material laws for the assessment of bonded steel to glass partial composite beams. Dissertation, University of Luxembourg, 2013.

[25]. Staudt Y. Investigation of the material behavior of glued connections with silicone. Master Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2013.

[26]. Wolf A.T. Silicone Sealed Insulating Glass Units. International symposium on the Application of Architectural Glass (ISAAG). 2004.

[27]. Li X., Li S., Zia Q., Zi H. Effects of pore sizes of porous silica gels on desorption activation energy of water vapor. Applied Thermal Engineering. 2007. 27. Pp. 869-876.

[28]. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. Energy and Buildings. 2011. 43. Pp. 761-769.

[29]. Галямичев А.В. Специфика определения нагрузок на ограждающие конструкции и её влияние на результаты их статического расчёта // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015. Том 7, №2

[30]. Галямичев А.В., Ветровая нагрузка и её действие на фасадные конструкции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №9 (60). С. 44-57

[31]. Фасадные системы Sika. Герметизация и склейка элементов фасадов. Техническое руководство.

[32]. ETAG002 Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems

[33]. ASTM C 1184 Standard Specification for Structural Silicone Sealants

[34]. ASTM C1401 Standart Guide for Stuctural Sealant Glazing

[35]. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet Explorer. URL: http://www.germetic-rus.ru/germetiki/ (дата обращения: 10.09.2017).

[36]. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet Explorer. URL: http://simbirskgermetik.ru/catalog.php?cat=14 (дата обращения: 10.09.2017).

[37]. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М., 2016.

2016.

[20]. Van Den Bergh S., Hart R., Petter B., Jelle B.P., Gustavsen A. Window Spacers and Edge Seals in insulating glass units: A State-of-the-Art Review and Future Perspectives. Energy and Buildings. 2013. 58. Pp. 263-280.

[21]. Pascual C., Montali J., Overend M. «Adhesively-bonded GFRP-glass sandwich components for structurally efficient glazing applications». Composite Structures. 2017. №160. Pp. 560–573;

[22]. Staudt Y., Schneider J, Odenbreit C. Investigation of the material behavior of bonded connections with silicone. International Conference at glasstec. 2014.

[23]. Gent, A. Elastic instabilities in rubber. International Journal of Non-Linear Mechanics. 2005. 40(2). Pp. 165-175.

[24]. Dias V. Development of adhesives constitutive material laws for the assessment of bonded steel to glass partial composite beams. Dissertation, University of Luxembourg, 2013.

[25]. Staudt Y. Investigation of the material behavior of glued connections with silicone. Master Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2013.

[26]. Wolf A.T. Silicone Sealed Insulating Glass Units. International symposium on the Application of Architectural Glass (ISAAG). 2004.

[27]. Li X., Li S., Zia Q., Zi H. Effects of pore sizes of porous silica gels on desorption activation energy of water vapor. Applied Thermal Engineering. 2007. 27. Pp. 869-876.

[28]. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. Energy and Buildings. 2011. 43. Pp. 761-769.

[29]. Galyamichev A.V. Specifika opredeleniya nagruzok na ograzhdayushchie konstrukcii i eyo vliyanie na rezul'taty ih staticheskogo raschyota [The specifics of determining loads on the building envelope and its effect on the results of static analysis]. Internet-magazine «Naykovedenie». 2015. Том 7, №2 (rus)

[30]. Galyamichev A.V., Vetrovaya nagruzka i eyo dejstvie na fasadnye konstrukcii. Construction of unique buildings and structures [Wind load and its action on facade structures]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 9 (60). Pp. 44-57. (rus)

[31]. Sistemy fasadov Sika. Germetiziruyushchiye i skleivayushchiye elementy fasadov. Tekhnicheskoye rukovodstvo.

[32]. ETAG002 Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems

[33]. ASTM C 1184 Standard Specification for Structural Silicone Sealants

[34]. ASTM C1401 Standart Guide for Stuctural Sealant Glazing

[35]. [Electronic resource]. System requirements: Internet Explorer. URL: http://www.germetic-rus.ru/germetiki/ (Date of the application: 10.09.2017).

[36]. [Electronic resource]. System requirements: Internet Explorer. URL: http://simbirskgermetik.ru/catalog.php?cat=14 (Date of the application: 10.09.2017).

[37]. Set of Rules SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdejstviya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.01.07-85*. M., 2016.

Контактная информация

1.* +7(904)3360888, mmikhaylovaa@gmail.com (Михайлова Мария Константиновна, студент)

1.* +7(911)8110719, galyamichev@yandex.ru (Галямичев Александр Викторович, старший преподаватель)

Contact information

1.* +7(904)3360888, mmikhaylovaa@gmail.com (Maria Mikhaylova, Student)

1.* +7(911)8110719, galyamichev@yandex.ru (Alexander Galyamichev, Senior Lecturer)

© Михайлова М.К., Галямичев А.В., 2018