

И.С. АКСЁНОВ¹, А.П. КОНСТАНТИНОВ¹, А.А. ВЕРХОВСКИЙ²

¹Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

²ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОКОННЫХ ПВХ ПРОФИЛЕЙ

Аннотация. Опыт эксплуатации ПВХ окон в районах с низкими зимними температурами наружного воздуха показал, что они подвержены значительным изгибным температурным деформациям, которые приводят к снижению их эксплуатационных качеств. Однако температурные деформации никак не учитываются при проектировании окон ПВХ, что связано с отсутствием инженерной методики их расчёта на температурные нагрузки. В настоящей статье представлен инженерный подход к расчету температурных деформаций оконных профилей ПВХ. Он реализован на примере расчета оконного ПВХ импоста с армирующим стальным сердечником на температурный изгиб для зимних условий эксплуатации. Расчёт выполнен двумя способами: численно-аналитическим и упрощенным аналитическим. Для верификации расчётной методики в климатической камере было проведено испытание двухстворчатого окна на температурную нагрузку. Сравнение результата расчётов с результатами испытаний показали расхождение в 10.6% (для численно-аналитического расчёта) и 16.2% (для аналитического расчёта). Результаты лабораторных испытаний подтвердили принятое в расчётной методике допущение: расчёт температурных деформаций импоста при его шарнирном креплении к раме возможно вести без учёта жесткости примыкающих к импосту створок, поскольку створки и импост деформируются под действием температуры совместно и не передают друг на друга механических усилий.

Ключевые слова: ПВХ окна, прогиб импоста, температурная нагрузка, климатические воздействия, численно-аналитический метод расчёта.

I.S. AKSENOV¹, A.P. KONSTANTINOV¹, A.A. VERKHOVSKY²

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²Research Institute of Building Physics of the Russian Academy Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

NUMERICAL ANALYTIC METHOD FOR CALCULATION OF PVC WINDOW PROFILES TEMPERATURE DEFORMATION

Abstract. The experience of operating PVC windows in areas with low winter outdoor temperatures has shown that they are subject to significant bending temperature deformations, which lead to a decrease in their performance. Nevertheless, these deformations are not taken into account in any way when designing PVC windows, which is due to the lack of an engineering methodology for calculating them for temperature loads. This article presents an engineering approach to the calculation of PVC window profiles temperature deformations. It is demonstrated on the example of a PVC window mullion with a reinforced steel core subjected to temperature bending in winter operating conditions. The calculation is performed in two ways: numerically analytical and simplified analytical. To verify the calculation method, a double-casement window was tested for temperature load in a climate chamber. Comparison of the calculation result with the test results showed a discrepancy of 10.6% (for numerical and analytical calculation) and 16.2% (for analytical calculation). The results of laboratory tests confirmed the assumption adopted in the calculation methodology: the calculation of the mullion temperature deformations when it is hinged to the frame can be carried out without taking

into account the rigidity of the casements adjacent to the mullion, since the casements and the mullion are deformed under the influence of temperature together and do not transfer mechanical forces to each other.

Keywords: *PVC windows, mullion deflection, temperature load, climatic effects, numerical-analytical method of calculation.*

Введение

Опыт использования окон ПВХ в странах Северной Америки, Северной и Восточной Европы показал, что они подвержены значительным температурным деформациям в зимний период эксплуатации [1-3]. Эти деформации способны приводить к снижению эксплуатационных характеристик оконных конструкций [4-9], в первую очередь – к многократному повышению их воздухопроницаемости, что негативно сказывается на тепловом комфорте внутри помещения [10-12]. Несмотря на это, в настоящее время расчет при проектировании ПВХ окон их расчет на температурные деформации не выполняется (учитывается только действие ветровой нагрузки [13]). В первую очередь это связано с тем, что на данный момент не существует полноценной инженерной методики такого расчёта. Лишь в некоторых научных работах предприняты попытки численного и аналитического описания температурных деформаций ПВХ окон [14-16]. Это обусловлено тем, что современные ПВХ окна представляют собой с т.з. восприятия действующих на них нагрузок системы со сложной конструктивной схемой, которую нельзя описать упрощенными аналитическими способами. В связи с этим видится перспективным использование численно-аналитических методов расчета с использованием данных полноценного компьютерного моделирования.

Авторами настоящей статьи разрабатывается подход к оценке температурных деформаций оконных конструкций из ПВХ. В работе [17] был предложен аналитический метод расчёта температурных деформаций неармированных ПВХ профилей с учётом специфики возникающего в них температурного поля. В работе [18] была рассмотрена совместная механическая работа ПВХ профиля и армирующего сердечника. Дальнейшее развитие расчётной методики не может продвигаться без её экспериментального подтверждения. В настоящей статье представлен расчёт импоста двухстворчатого ПВХ окна размером 1500x1500 мм на температурный изгиб для зимних условий эксплуатации в соответствии с разработанной авторами методикой. Расчёт выполнен двумя способами: численно-аналитическим и упрощенным аналитическим. Для верификации расчёта в климатической камере было проведено испытание описанного выше оконного блока на температурную нагрузку. Результаты расчёта были сопоставлены с результатами эксперимента.

Модели и методы

Расчёт величины температурных деформаций импоста

На рисунке 1 показаны размеры и поперечное сечение импоста ПВХ. Толщина стенок армирующего сердечника определялась в ходе их непосредственного измерения и составила 1,3 мм.

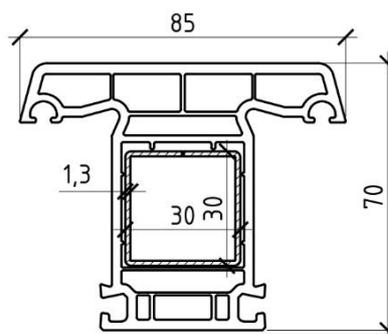


Рисунок 1 – Поперечное сечение оконного импоста

Сначала поперечное сечение ПВХ профиля импоста разбивалось на 3 участка (рисунок 2). При этом, геометрические параметры участков профиля определялись относительно нейтральной оси всего поперечного сечения. Нейтральная ось сечения определяется по формуле (1) [17].

$$y_{но} = \frac{\sum (d^i A^i + c^i S_z^i)}{\sum c^i A^i} \quad (1)$$

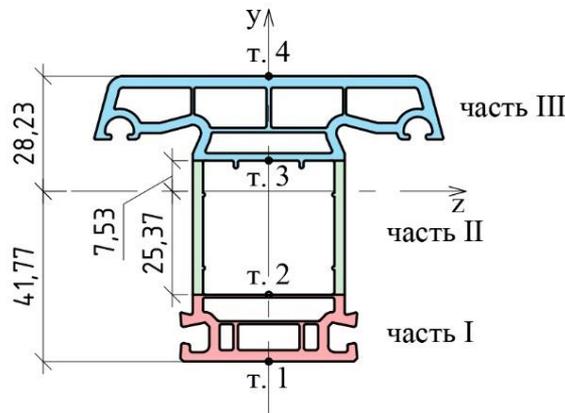


Рисунок 2 – Разделение ПВХ профиля на 3 участка

Затем был произведен расчёт температурного поля ПВХ профиля импоста и параметров его свободной температурной деформации в соответствии с формулами (2-5) [17].

$$R_I = R_{III} = \frac{R_0}{2}$$

$$R_{II} = 0 \quad (2)$$

$$k_{ax}^{ce} = \frac{A}{\sum (a^i A^i + b^i S_z^i)} \quad (3)$$

$$K_{ce} = \frac{\sum S_z^i - \sum (a^i S_z^i + b^i I_z^i)}{\sum (d^i S_z^i + c^i I_z^i)} \quad (4)$$

$$a^i = \frac{y_{i+1} - y_i}{y_{i+1} - y_i}; \quad b^i = \frac{1 - 1}{y_{i+1} - y_i}; \quad c^i = \frac{y_{i+1} - y_i}{y_{i+1} - y_i}$$

$$d^i = -y_{i+1} y_i b^i$$

$$\varphi_i = 1 + \alpha(T_i - T_{ref}) \quad (5)$$

Описание величин, входящих в формулы 1-5, а также иных параметров, необходимых для расчета, и их значения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры, используемые для расчета

Обозначение	Описание	Значение	Ед. измерения
R_I, R_{II}, R_{III}	Условное термическое сопротивление участков I, II и III соответственно	по расчёту	$m^2 \cdot ^\circ C / Вт$
R_0	Общее термическое сопротивление	0.513*	$m^2 \cdot ^\circ C / Вт$
α_b	Коэффициент тепловосприятости	5.52*	$Вт / m^2 / ^\circ C$
α_n	Коэффициент теплоотдачи	19.94*	$Вт / m^2 / ^\circ C$
T_{in}	Расчётная температура внутреннего воздуха	+20*	$^\circ C$
T_{ex}	Расчётная температура наружного воздуха	-33*	$^\circ C$
$k_{ax}^{св}$	Коэффициент продольной температурной деформации	по расчёту	1
A	Площадь всего сечения ПВХ профиля	10.117	cm^2
A^I, A^{II}, A^{III}	Площади участков сечения I, II и III	2.79; 1.66; 5.69	cm^2
$S_z^I, S_z^{II}, S_z^{III}$	Статический момент участков сечения I, II и III	-9.85; -1.49; 11.12	cm^3
$I_z^I, I_z^{II}, I_z^{III}$	Момент инерции участков сечения I, II и III	35.57; 2.83; 24.31	cm^4
a, b, c, d, φ	Вспомогательные коэффициенты	по расчёту	различные
y_1, y_2, y_3, y_4	Координата 1-4 точек сечения	-4.177; -2.537; 0.753; 2.823	см
α	Коэффициент линейного температурного расширения ПВХ	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 / ^\circ C$
T_i	Температура в i-ой точке сечения	по расчёту	$^\circ C$
T_{ref}	Начальное значение температуры	20	$^\circ C$

Примечания:
* - значения определялись в соответствии с результатами измерений, полученных при проведении испытаний в климатической камере

Проведенные ранее исследования позволили предположить, что створки и импост в случае шарнирного крепления импоста к раме деформируются под действием температуры совместно и не передают друг на друга механических усилий. Ввиду этого расчёт температурных деформаций импоста можно вести без учёта жесткости примыкающих к импосту створок. В конструкции ПВХ окна импост крепится к раме механическим способом через П-образные стальные соединители (колодки) (рисунок 3). Каждая колодка соединяется с импостом двумя шурупами, которые прорезают как ПВХ профиль, так и армирующий сердечник. Такое соединение формирует шарнирное крепление импоста к раме.

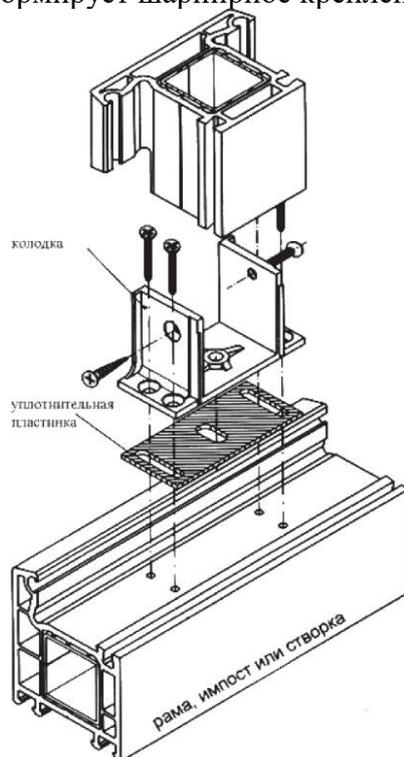


Рисунок 3 – Механическое крепление импоста к раме в оконном блоке ПВХ

Температурный изгиб импоста (с учётом армирования) рассчитывался численно в соответствии с предложенной в [18] моделью деформирования армированных ПВХ профилей в виде стержневых элементов (рисунок 4). При этом шарнирные крепления «ПВХ профиль – армирующий стальной сердечник» имели податливость в продольном направлении, равную $4.3 \cdot 10^6$ Н/м [18]. Численная модель была реализована в программном комплексе Comsol Multiphysics® (COMSOL Multiphysics® v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden).

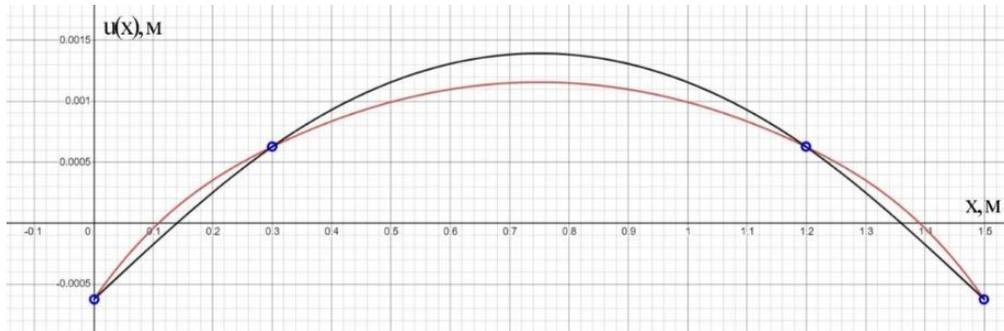


Рисунок 4 – Стержневая модель деформации армированного ПВХ профиля:
красная линия – ПВХ профиль, изгибающийся под действием температурного поля и передающий через точки крепления (на рисунке – 4 шт.) усилия на армирующий сердечник (черная линия), сердечник, изгибаясь, препятствует изгибу ПВХ профиля

На рисунке 5 показаны натурные обмеры импоста (а) и принятая расчётная схема для численного решения (б).

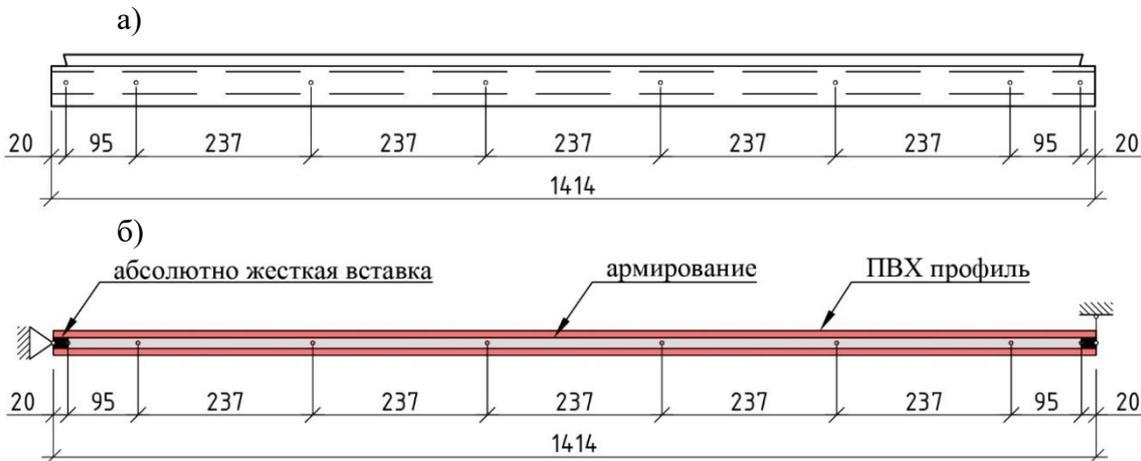


Рисунок 5 – Положение точек крепления «ПВХ-сердечник» по результатам обмера (а), расчётная схема (б)

Помимо численного было выполнено и аналитическое решение задачи. Аналитическое решение основано на предположении, что при количестве точек крепления «ПВХ профиль – армирующий стальной сердечник» больше 4-х наиболее нагруженными будут оставаться всегда первые (последние) две. Именно они будут создавать основной крутящий момент, который противодействует температурному изгибу ПВХ, поэтому расчет для случая 8-ми точек крепления можно вести так, будто имеется лишь 4-ре. При этом, для 4-х точек получено аналитическое решение [18]. Расчёт прогиба в этом случае выполняется по формулам (6-8).

$$f = \frac{RL_1^3}{6EI} - \frac{L_2}{2} \left(\frac{L_2}{4} + L_1 \right) \left(\frac{RL_1}{EI} + K_{св} \right) + L_{кр} \cdot \sin(\Theta) \quad (6)$$

$$R = -\frac{K_{св}EI}{L_1} \cdot \frac{L_1 + L_2}{\left(\frac{2}{3}L_1 + L_2\right)\left(1 + \frac{EI}{E_s I_s}\right)} \quad (7)$$

$$\Theta = \frac{RL_1}{2E_s I_s} (L_1 + L_2) \quad (8)$$

где L_1 – расстояние между двумя крайними точками крепления «ПВХ профиль – армирующий стальной сердечник», м; L_2 – расстояние между 2-ой и предпоследней точками крепления «ПВХ профиль – армирующий стальной сердечник», м; EI – изгибная жесткость ПВХ профиля, Н·м²; $E_s I_s$ – изгибная жесткость армирующего сердечника, Н·м²; $L_{кр}$ – длина абсолютно жесткой вставки, моделирующей металлический уголок крепления «импост-рама», м; R – поперечная сила реакции, действующая в каждой из 4-х точек крепления (определяется с точностью до знака), Н; Θ – угол поворота оси армирующего сердечника на опоре, рад.

Проведение испытаний

Для верификации расчётов в лаборатории «Фасады-СПК» НИИСФ РААСН был проведен эксперимент по измерению температурных деформаций оконного блока ПВХ размером 1500x1500 мм из профильной системы VEKA Softline 70 с двумя вариантами стеклопакета:

- а. 4М1-16-И4 (24 мм) – далее по тексту SL70-24;
- б. 4М1-12-4М1-12-И4 (36 мм) – далее по тексту SL70-36;

Исследование проводилось в климатической камере, принципиальная схема которой показана на рисунке 6.

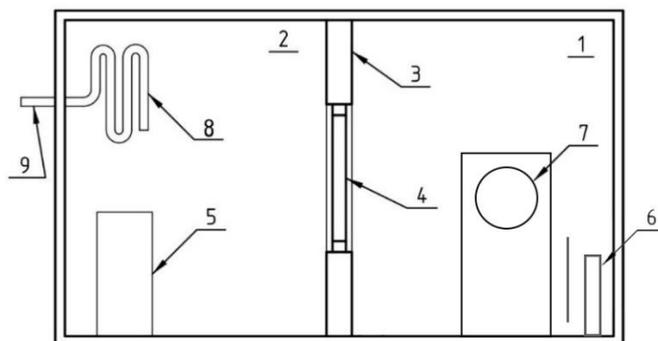


Рисунок 6 – Принципиальная схема климатической камеры для испытаний:

1 – теплый отсек, 2 – холодный отсек, 3 – герметичная перегородка, 4 – образец для испытания,

5 – система охлаждения и распределения холодного воздуха, 6 – прибор отопления,

7 – аппарат для создания отрицательного давления, 8 – теплообменник, 9 – воздухозаборник с анемометром

Образцы устанавливались в проем перегородки, отделяющей холодный и теплый отсеки климатической камеры в соответствии с нормативными требованиями по установке окон и организации монтажного шва. Монтажный шов заполнялся монтажной пеной, со стороны теплой камеры герметизировался пароизоляционной лентой, со стороны холодной – диффузионной мембраной. После монтажа образца производился монтаж измерительного оборудования, которое включало в себя:

- набор линейных датчиков перемещения (они устанавливались со стороны теплого отсека, схема расстановки датчиков представлена на рисунке 7);
- набор датчиков температуры и теплового потока. Эти датчики располагались на профильных элементах окна и стеклопакете (они были установлены только для контроля теплового режима образца).

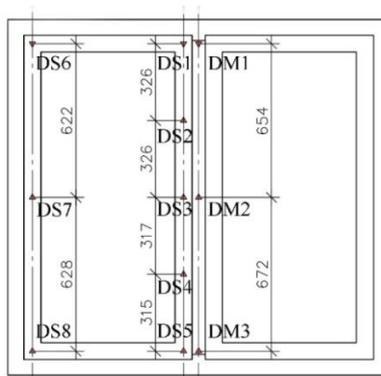


Рисунок 7 – Схема установки линейных датчиков перемещения.

Далее температура в холодном отсеке камеры опускалась до -30°C , в тёплом отсеке поддерживалась постоянной на уровне 20°C . Измерение температурных деформаций выполнялось после установления стационарного режима теплопередачи через образец.

Результаты исследования и их анализ

Теоретический расчёт

Поле температур в поперечном сечении импоста, определенное расчетом, показано в таблице 2 (положение точек – см. рисунок 2). В таблице 3 показаны параметры поперечного сечения ПВХ профиля импоста и армирующего сердечника, а также значения их свободных температурных деформаций. Эти значения использовались для численного решения задачи в программе Comsol Multiphysics.

Таблица 2 – Поле температур в поперечном сечении импоста.

Параметр	Значение, $^{\circ}\text{C}$
T_1	7.0
T_2	-11.4
T_3	-11.4
T_4	-29.8

Таблица 3 – Параметры поперечного сечения и свободных температурных деформаций.

Обозначение	ПВХ	Сердечник
A	10.138 [см ²]	1.467 [см ²]
I_y	62.688 [см ⁴]	2.012 [см ⁴]
I_z	43.403 [см ⁴]	1.999 [см ⁴]
$K_{св}$	-0,02838 [1/м]	0 [1/м]
$K_{ах}^{св}$	0.997598712	$1 + \alpha_s (T_2 - T_{ref}) = 1 + 12.3 \cdot 10^{-6} \cdot (-11.4 - 20) = 0.99961378$

На рисунке 8 показана определенная по результатам расчёта в Comsol Multiphysics деформированная схема импоста, в таблице 4 – усилия, возникающие в точках крепления ПВХ профиля к армирующему сердечнику.

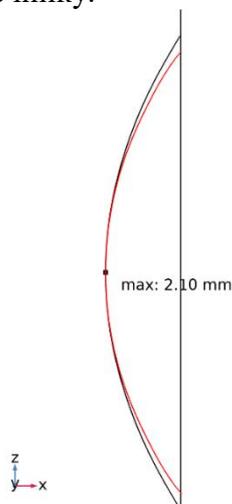


Рисунок 8 – Деформированная схема импоста (увеличены в 100 раз)

Таблица 4 – Силы реакции в шарнирах, соединяющих ПВХ профиль и сердечник, Н.

Узлы крепления «ПВХ-сердечник»	Поперечная компонента	Продольная компонента
F _{кв}	-400.6	-1889.3
F1	442.4	-1370.1
F2	-41.0	-649.3
F3	-0.8	-190.5
F4	-0.8	190.5
F5	-41.0	649.3
F6	442.4	1370.1
F _{кн}	-400.6	1889.3

Результаты подтверждают, что, самыми нагруженными точками крепления остаются крайние две. Именно они создают основной крутящий момент на концах ПВХ профиля, подавляющий изгибные температурные деформации.

Произведем численный расчёт:

$$R = -\frac{-0.02838 \cdot 2.7 \cdot 10^9 \cdot 62.688 \cdot 10^{-8}}{0.095} \cdot \frac{0.095 + 1.184}{\left(\frac{2}{3} \cdot 0.095 + 1.184\right) \left(1 + \frac{2.7 \cdot 10^9 \cdot 62.688 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10^{11} \cdot 2.012 \cdot 10^{-8}}\right)} = 365 \text{ Н}$$

Определим угол поворота оси армирующего сердечника в точке первого шарнирного крепления:

$$\Theta = \frac{365 \cdot 0.095}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 2.012 \cdot 10^{-8}} (0.095 + 1.184) = 5.51 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$$

Далее определим прогиб:

$$f = \frac{365 \cdot 0.095^3}{6 \cdot 2.7 \cdot 10^9 \cdot 62.688 \cdot 10^{-8}} - \frac{1.184}{2} \cdot \left(\frac{1.184}{4} + 0.095\right) \cdot \left(\frac{365 \cdot 0.095}{2.7 \cdot 10^9 \cdot 62.688 \cdot 10^{-8}} - 0.02838\right) + 0.02 \cdot \sin\left(5.51 \cdot 10^{-3}\right) = 1.97 \text{ мм}$$

Полученное значение на 6% отличается от определенного численным методом.

Экспериментальное исследование

На рисунке 9 показана эпюра перемещений для точек импоста.

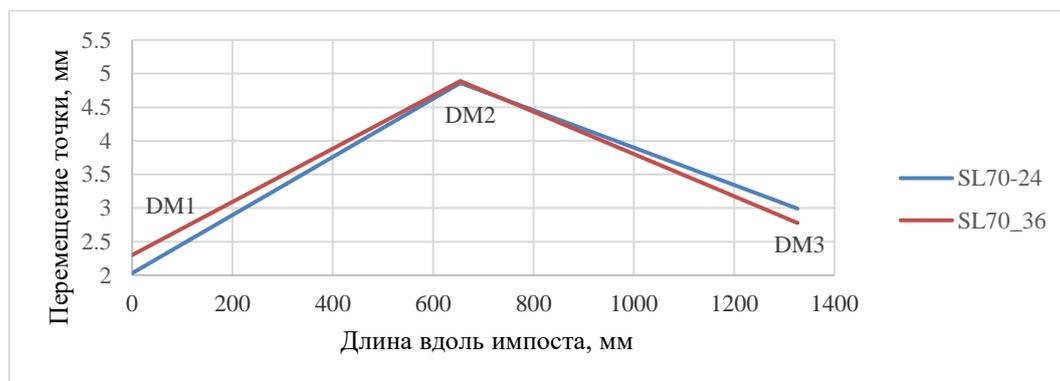


Рисунок 9– Перемещение точек 1-3 импоста при $t_{ext} = -30^{\circ}\text{C}$

На рисунке 10 показаны относительные перемещения точек створки и импоста при наличии только температурной нагрузки. При этом перемещение точек импоста вычиталось из перемещения соответствующих точек створки.

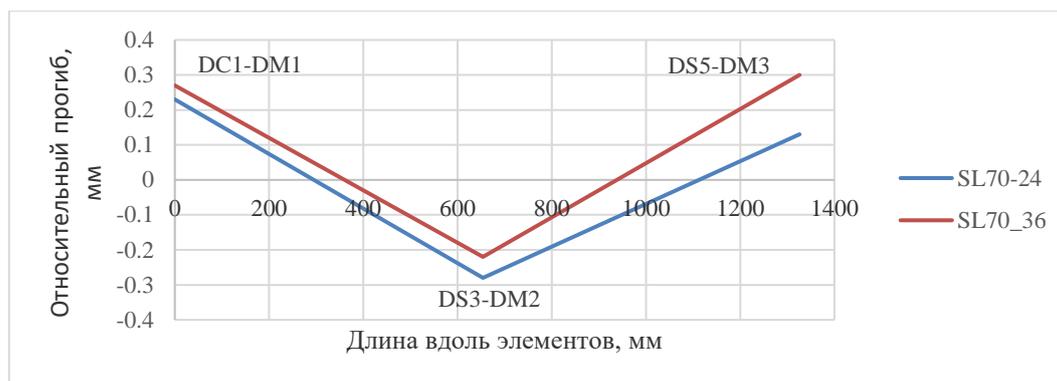


Рисунок 10 – Относительные перемещения импоста и створки

Измеренные прогибы импоста представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Прогибы импоста, мм.

Образец	$T_{ex} = -33^{\circ}C$ $T_{in} = 20^{\circ}C$
SL70-24	2.35
SL70-36	2.35

По результатам проведенных испытаний двухстворчатых ПВХ окон на действие температурной нагрузки можно говорить следующее:

- на абсолютные прогибы оконного импоста при действии температурной нагрузки существенное влияние оказывает жесткость ПВХ профиля импоста, жесткость примыкающих к импосту элементов створки не оказывает существенного влияния. Это объясняется тем, что импост и створки деформируются под действием температур совместно, но не передавая друг на друга нагрузки;
- стеклопакет может оказывать существенное влияние на прогибы элементов, к которым он непосредственно примыкает (в рассматриваемом случае – до 12,5 %). Очевидно, что здесь необходимо учитывать характер соединения стеклопакета с профильными элементами (механическое защемление за счет штапиков из плоскости стеклопакета, расклинивание стеклопакета в плоскости створки либо клейка стеклопакетов [19, 20]. Эти вывод совпадает с результатами работ [13].

Выводы

В настоящей работе с использованием разработанной авторами метода был проведен теоретический расчет температурного прогиба импоста оконного блока ПВХ двумя способами: численно-аналитическим и аналитическим. Результаты расчета составили 2,1 мм и 1,97 мм соответственно (расхождение – 6%). Этот результат показывает, что принятое в аналитическом решении упрощение, согласно которому в расчете можно учитывать только четыре (две первые и две последние) точки крепления «ПВХ профиль - армирующий стальной профиль» является приемлемым.

Для верификации использованного в расчёте метода было проведено экспериментальное исследование оконного блока ПВХ в климатической камере с двумя вариантами стеклопакета разной толщины. Температурный прогиб импоста составил 2,35 мм (независимо от толщины стеклопакета).

По результатам исследований установлено:

1. Жесткость стеклопакета влияет на жесткость только тех элементов, в которые они установлены (например, створки) и практически не влияет на жесткость импоста;
2. Жесткость ПВХ профилей существенно влияет на общую деформативность оконной конструкции и должна учитываться при их расчете на температурные нагрузки;

3. При действии температурной нагрузки импост деформируется вместе с примыкающими к нему элементами створок, поэтому их соединение остается герметичным, и в нем не происходит существенной передачи механических усилий.

Сравнение результатов расчёта с результатами экспериментальных измерений показали расхождение:

- Для численно-аналитического метода – 10.6%
- Для численного – 16.2%

Полученные результаты подтверждают адекватность разработанного авторами метода расчета элементов оконных ПВХ конструкций на температурные деформации. Дальнейшая работа в этом направлении позволит усовершенствовать методы проектирования оконных конструкций, что приведет к повышению качества и снижению стоимости готовой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елдашов Ю.А., Сесюнин С.Г., Ковров В.Н. Экспериментальное исследование типовых оконных блоков на геометрическую стабильность и приведенное сопротивление теплопередаче от действия тепловых нагрузок // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 146–149.
2. Verkhovskiy A., Bryzgalin V., Lyubakova E. Thermal Deformation of Window for Climatic Conditions of Russia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol 463. No 3. doi:10.1088/1757-899X/463/3/032048.
3. Konstantinov A. and Verkhovsky A. Assessment of the Wind and Temperature Loads Influence on the PVC Windows Deformation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol 753. No 3. doi:10.1088/1757-899X/753/3/032022.
4. Fleury G., Thomas M. Variations to window air permeability according to outside temperature // Cahiers Du Centre Scientifique et Technique Du Batiment. 1972. Vol 132. No. 1129.
5. Шеховцов А.В. Воздухопроницаемость оконного блока из ПВХ профилей при действии отрицательных температур // Вестник МГСУ. 2011. № 3–1. С. 263–269.
6. Henry R., Patenaude A. Measurements of window air leakage at cold temperatures and impact on annual energy performance of a house // ASHRAE Transactions. 1998. Vol 104. No Pt 1B. Pp. 1254–1260.
7. Kehrl D. Window air leakage performance as a function of differential temperatures and accelerated environmental aging // Thermal performance of exterior envelopes of building III. 1985. Pp. 872–890. [Online]. Available: [https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1985 B3 papers/066.pdf](https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1985%20B3%20papers/066.pdf)
8. Кунин Ю.С., Алекперов Р.Г., Потапова Т.В. Зависимость воздухопроницаемости светопрозрачных конструкций от температурных воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С.114–120.
9. Куренкова А.Ю. Уроки 2010 года, или особенности изготовления оконных блоков из ПВХ-профилей шириной более 68 мм // Светопрозрачные конструкции. 2011. № 1. С. 10–12.
10. Van Craenendonck S., Lauriks L., Vuye C., Kampen J. Local effects on thermal comfort: Experimental investigation of small-area radiant cooling and low-speed draft caused by improperly retrofitted construction joints // Building and Environment. 2018. Vol 147. Pp. 188–198. doi:10.1016/j.buildenv.2018.10.021.
11. Schiepel D. and Westhoff A. Study on the Influence of Turbulence on Thermal Comfort for Draft Air // New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XIII. STAB/DGLR Symposium 2020. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2021. Pp. 494–503. doi:10.1007/978-3-030-79561-0_47.
12. Manz H., Frank T. Analysis of thermal comfort near cold vertical surfaces by means of computational fluid dynamics // Indoor and Built Environment. 2004. Vol 13. No 3. Pp. 233–242. doi:10.1177/1420326X04043733.
13. Konstantinov A.P., Lambias Ratnayake M. Calculation of PVC windows for wind loads in high-rise buildings // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. doi:10.1051/e3sconf/20183302025.
14. Калабин В.А. Оценка величины тепловой деформации ПВХ-профиля. Часть 1. Зимние поперечные деформации // Светопрозрачные конструкции. 2013. № 1-2. С. 6–9.
15. Калабин В.А. Оценка величины тепловой деформации ПВХ-профиля. Часть 2. Летние поперечные деформации // Светопрозрачные конструкции. 2013. № 3. С. 12–15.
16. Сесюнин С.Г., Елдашов Ю.А. Моделирование сопряженной задачи термоупругости на примере анализа вариантов конструктивного оформления оконного блока зданий // Светопрозрачные конструкции. 2005. № 4. С. 14–18.
17. Аксенов И.С., Константинов А.П. Аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния оконных профилей ПВХ при действии температурных нагрузок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып.11. С. 1437–1451. doi:10.22227/1997-0935.2021.11.1437-1451.

18. Aksenov I.S., Konstantinov A.P. Temperature deformations of PVC window profiles with reinforcement // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. 18(2). P. 98-111. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-98-111>
19. Gerasimova E., Galyamichiev A., Dogru S. Stress-strain state of insulated glass unit in structural glazing systems // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol 98. No 6. doi:10.18720/MCE.98.8.
20. Carbary L.D., Kimberlain J.H. Structural silicone glazing: optimizing future designs based on historical performances // *Intelligent Buildings International*. 2020. Vol 12. No. 3. Pp. 169–179. doi:10.1080/17508975.2018.1544881.

REFERENCES

1. Eldashov Yu.A., Sesyunin S.G., Kovrov V.N. Eksperimental'noe issledovanie tipovykh okonnykh blokov na geometricheskuyu stabil'nost' i privedennoe soprotivlenie teploperedache ot dei-stviya teplovykh nagruzok [Experimental study of typical window units for geometric stability and reduced heat transfer resistance from the action of thermal loads] // *Vestnik MGSU*. 2009. № 3. Pp. 146–149.
2. Verkhovskiy A., Bryzgalin V., Lyubakova E. Thermal Deformation of Window for Climatic Conditions of Russia // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol 463. No 3. doi:10.1088/1757-899X/463/3/032048.
3. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the Wind and Temperature Loads Influence on the PVC Windows Deformation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol 753. No 3. doi:10.1088/1757-899X/753/3/032022.
4. Fleury G., Thomas M. Variations to window air permeability according to outside temperature // *Cahiers Du Centre Scientifique et Technique Du Batiment*. 1972. Vol 132. No. 1129.
5. Shekhovtsov A. Air permeability of an PVC-window when exposed to freezing temperatures // *Vestnik MGSU*. 2011. № 3–1. Pp. 263–269.
6. Henry R., Patenaude A. Measurements of window air leakage at cold temperatures and impact on annual energy performance of a house // *ASHRAE Transactions*. 1998. Vol 104, No Pt 1B. Pp. 1254–1260.
7. Kehrl D. Window air leakage performance as a function of differential temperatures and accelerated environmental aging // *Thermal performance of exterior envelopes of building III*. 1985. Pp. 872–890. [Online]. Available: https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1985_B3_papers/066.pdf
8. Kunin Y.S., Alekperov R.G., Potapova T.V. Dependence of air permeability of translucent structures on temperature impacts // *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo* [Industrial and civil engineering]. 2018. (10). Pp. 114–120. URL: <http://www.pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2018&v=10&p=00&r=19> (rus).
9. Kurenkova A.Yu. Uroki 2010 goda, ili osobennosti izgotovleniya okonnykh blokov iz PVKh-profilей shirinoi bolee 68 mm [Lessons of 2010, or the peculiarities of manufacturing window units from PVC profiles over 68 mm wide] // *Svetoprozrachnye konstruksii* [Translucent structures]. 2011. № 1. Pp. 10-12 (rus).
10. Van Craenendonck S., Lauriks L., Vuye C., Kampen J. Local effects on thermal comfort: Experimental investigation of small-area radiant cooling and low-speed draft caused by improperly retrofitted construction joints // *Building and Environment*. 2018. Vol 147. Pp. 188–198. doi:10.1016/j.buildenv.2018.10.021.
11. Schiepel D. and Westhoff A. Study on the Influence of Turbulence on Thermal Comfort for Draft Air // *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XIII. STAB/DGLR Symposium 2020. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. 2021. Pp. 494–503. doi:10.1007/978-3-030-79561-0_47.
12. Manz H., Frank T. Analysis of thermal comfort near cold vertical surfaces by means of computational fluid dynamics // *Indoor and Built Environment*. 2004. Vol 13. No 3. Pp. 233–242. doi:10.1177/1420326X04043733.
13. Konstantinov A.P., Lambias Ratnayake M. Calculation of PVC windows for wind loads in high-rise buildings // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 33. doi:10.1051/e3sconf/20183302025.
14. Kalabin V.A. Otsenka velichiny teplovoi deformatsii PVKh-profilya. Chast' 1. Zimnie poperechnye deformatsii [Estimation of the value of PVC profile thermal deformation. Part 1. Winter transverse deformations] // *Svetoprozrachnye konstruksii* [Translucent structures]. 2013. № 1-2. Pp. 6–9.
15. Kalabin V.A. Otsenka velichiny teplovoi deformatsii PVKh-profilya. Chast' 2. Letnie poperechnye deformatsii [Estimation of the value of PVC profiles thermal deformation. Part 2. Summer transverse deformations] // *Svetoprozrachnye konstruksii* [Translucent structures]. 2013. № 3. Pp. 12–15.
16. Sesyunin S.G., Eldashov Yu.A. Modelirovanie sopryazhennoi zadachi termouprugosti na primere analiza variantov konstruktivnogo oformleniya okonnogo bloka zdaniy [Modeling of the conjugate problem of thermoelasticity on the example of window analysis] // *Svetoprozrachnye konstruksii* [Translucent structures]. 2005. № 4. P. 14-18.
17. Aksenov I.S., Konstantinov A.P. An analytical method for calculating the stress-strain state of PVC window profiles under thermal loading // *Vestnik MGSU*. 2021. No 11. Pp. 1437–1451. doi:10.22227/1997-0935.2021.11.1437-1451.

18. Aksenov I.S., Konstantinov A.P. Temperature deformations of PVC window profiles with reinforcement // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. 18(2). P. 98-111. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-98-111>
19. Gerasimova E., Galyamichev A., Dogru S. Stress-strain state of insulated glass unit in structural glazing systems // Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol 98. No 6. doi:10.18720/MCE.98.8.
20. Carby L.D., Kimberlain J.H. Structural silicone glazing: optimizing future designs based on historical performances // Intelligent Buildings International. 2020. Vol 12. No. 3. Pp. 169–179. doi:10.1080/17508975.2018.1544881.

Информация об авторах:

Аксёнов Иван Сергеевич

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, аспирант.
E-mail: ivanak1995@mail.ru

Константинов Александр Петрович

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, кандидат технических наук, руководитель научно-исследовательского центра «Фасадные системы».
E-mail: apkonst@yandex.ru

Верховский Алексей Адольфович

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, кандидат технических наук, руководитель испытательного центра «Фасады СПК».
E-mail: v2508@rambler.ru

Information about authors:

Aksenov Ivan S.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, graduate student.
E-mail: ivanak1995@mail.ru

Konstantinov Aleksandr P.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate in technical sciences, head of the Research Center «Facade Systems».
E-mail: apkonst@yandex.ru

Verkhovsky Aleksey Ad.

Research Institute of Building Physics of the Russian Academy Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, candidate in technical sciences, head of the Test Center «Facades SPK».
E-mail: v2508@rambler.ru