



Research Article

Received: January 16, 2026

Accepted: February 3, 2026

Published: March 17, 2026

ISSN 2304-6295

# Bearing capacity of bonded connection in facade structures with vertically bonded cladding

Gusev, Konstantin Vladimirovich<sup>1</sup>  Lalin, Vladimir Vladimirovich<sup>1</sup>  Rybakov, Vladimir Aleksandrovich<sup>2,3\*</sup>  

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; konstantin0399@yandex.ru (G.K.V.); vlalin@yandex.ru (L.V.V.)

<sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; fishermanoff@mail.ru (R.V.A.)

<sup>3</sup> NTS-Project LLC, St.Petersburg, Russian Federation; fishermanoff@mail.ru (R.V.A.)

Correspondence:\* email [fishermanoff@mail.ru](mailto:fishermanoff@mail.ru); contact phone +79118297767

## Keywords:

Facade structures; Adhesive joint; Direct vertical bonding; Silicone adhesive sealant; Stress–strain state; Numerical modeling

## Abstract:

**The object of research** is a structural silicone adhesive sealant. This work aims to identify the factors affecting the stress–strain state of the bonded joint in facade structures with vertically bonded cladding using numerical and analytical calculation methods. **Method.** As part of the conducted study, a numerical assessment of the performance of the bonded connection was carried out. Four computational models of the bonded connection were developed, each with a different level of detail in simulating the ventilated façade system with vertically bonded cladding. The shear and normal stresses obtained from the numerical simulations were compared with the values specified in accordance with the requirements of the regulatory document ETAG 002. **Results.** Numerical analyses accounting for the facade substructure show that the inclusion of hanger connections, brackets, and guide profiles has a significant impact (up to 15 %) on the magnitude and distribution pattern of shear stresses within the bonded connection under self-weight loading. It is proposed that the load-bearing capacity of the bonded connection in facade systems with vertically bonded cladding under wind pressure be evaluated using a numerical method based on a detailed model that considers the stiffness and arrangement of hanger connections and brackets. This recommendation is made because the structural configuration and the placement of brackets exert a substantial influence (up to 40 %) on the stress–strain state of the bonded connection.

## 1 Introduction

Клеевые соединения широко применяются в строительной отрасли, при этом ведётся активная научно-исследовательская работа, направленная на разработку и совершенствование новых способов их применения [1]–[2]. Использование клеевых соединений в строительных конструкциях позволяет повысить их прочностные, жесткостные и эксплуатационные характеристики. Клеевое соединение является универсальным технологическим способом соединения деталей, позволяющим реализовывать различные типы конструктивных сопряжений независимо от формы и материала элементов [3].

Научный и практический интерес представляют исследования, посвящённые применению клеевых соединений в деревянных и металлических конструкциях [4]–[7]. Клеевые соединения позволяют создавать крупногабаритные клеёные элементы (балки, фермы, арки), что делает возможным применение древесины в несущих конструкциях зданий сложной формы [8]–[9].

Gusev, K.; Lalin, V.; Rybakov, V.

Bearing capacity of bonded connection in facade structures with vertically bonded cladding;

2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12203. doi: 10.4123/CUBS.122.3



Методы крепления конструктивных элементов в производстве строительных металлоконструкций играют значительную роль [10]. Применение клеевых соединений в металлических конструкциях позволяет снизить собственный вес конструкции и защитить прилегающие элементы от коррозии [11]. Следует подчеркнуть, что клеевые соединения находят применение и в железобетонном строительстве, где их использование при ремонте несущих конструкций позволяет значительно сократить сроки реконструкции и уменьшить затраты [12].

В исследованиях [13]–[16] представлены методики экспериментального определения механических характеристик клеевых соединений и оценки их прочности. В работе [17] указано на недостаточность данных о поведении клеевых соединений при совместном действии касательных и нормальных напряжений. При изучении адгезионных свойств клеевых соединений [18] было определено, что прочность соединения не возрастает с увеличением его толщины. Однако в другой работе [19] было получено, что увеличение толщины клеевого слоя приводит к уменьшению наибольших касательных напряжений, возникающих в клеевом соединении.

При расчёте клеевых соединений необходимо учитывать в том числе и климатические воздействия. Результаты исследований свидетельствуют о том, что температурно-влажностные воздействия оказывают существенное влияние как на прочностные характеристики клеевых соединений, так и на их долговечность [20]–[22]. В исследовании [23] установлено, что при температуре около 40 °С возникает уменьшение несущей способности и жесткости клея. Аналогичный вывод был сделан и в другом исследовании [24], в котором также установлено, что при температуре ниже 10 °С необходимая прочность клеевого соединения при изготовлении продукции не достигается.

Наибольшую точность при анализе напряжённо-деформированного состояния (НДС) клеевых соединений под действием механических нагрузок обеспечивают экспериментальные исследования [25]–[29]. Однако проведение экспериментальных исследований отличается высокой сложностью, вследствие чего возрастают значение и эффективность вычислительных методов, прежде всего численных подходов. Результаты ряда работ [30–33] подтверждают целесообразность применения метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования клеевых соединений. В исследовании [34] с помощью применения численного моделирования было установлено, что для обеспечения прочности клеевого шва нет необходимости в увеличении площади сопрягаемых поверхностей, а достаточно увеличить изгибную жесткость приклеиваемой поверхности. Более того, в исследовании [35] установлена хорошая согласованность экспериментальных и численных результатов.

В данной работе объектом исследования является структурный клей-герметик, используемый для крепления облицовки в фасадных конструкциях. Применение клеевого соединения в фасадных конструкциях ранее было предметом исследований других авторов [36]. На основании численных методов расчета клеевых соединений в светопрозрачных конструкциях было получено, что напряжения при ветровом воздействии распределяются неравномерно, в зависимости от многих факторов [37]. Более того, в другом исследовании [39] было получено, что на деформации и напряжения, возникающие в клеевом соединении, может оказывать влияние конструктивная схема структурного остекления. На отсутствие учета совместной работы облицовки и несущих элементов каркаса при проектировании фасадных конструкций обращают внимание и другие авторы [39].

По состоянию на 2026г. в Российской Федерации отсутствует нормативно-технический документ, регламентирующий расчёт клеевых соединений, применяемых в навесных фасадных системах и светопрозрачных ограждающих конструкциях [40]. При проектировании подобных систем, где используется клеевой способ крепления облицовочных элементов, ориентируются на иные нормативы и стандарты [41]–[43].

На основе анализа опубликованных исследований можно сделать вывод, что в научной литературе достаточно полно представлены подходы к расчёту и численному моделированию различных клеевых соединений, применяемых в широкой области различных отраслей промышленности. Однако вопросы, связанные с работой клеевого соединения с использованием структурного клея-герметика в фасадных конструкциях, а в частности в навесных фасадных системах (НФС), остаются изученными не в полной мере. Коллектив авторов считает, что расчёт силиконового клея-герметика, применяемого в фасадных конструкциях, включает в себя ряд особенностей, которые необходимо учитывать в численном и аналитическом методах расчета.

Цель работы заключается в определении факторов, оказывающих влияние на НДС клеевого соединения в составе НФС с вертикальной приклейкой облицовки с применением численного

Gusev, K.; Lalin, V.; Rybakov, V.

Bearing capacity of bonded connection in facade structures with vertically bonded cladding;

2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12203. doi: 10.4123/CUBS.122.3

(метода конечных элементов) и аналитического (согласно нормативным документам). методах расчета.

Объект исследования – структурный клей герметик. Предмет исследования – факторы, оказывающие влияние на НДС клеевого соединения в составе НФС с вертикальной приклейкой облицовки.

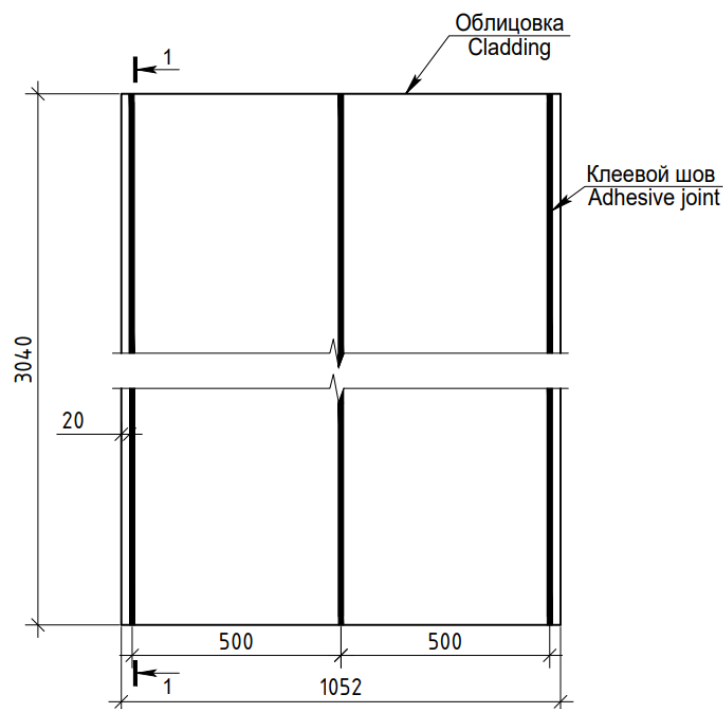
## 2 Materials and Methods

Исследование клеевого соединения на основе структурного клея-герметика с применением численных расчетов проводилось в рамках расчета НФС вертикальной схемой приклейки облицовки в 4 постановках, с различными уровнями детализации моделирования фасадной конструкции (см. рис. 4-7):

1. Изолированной (моделирование облицовочной панели и клеевой системы);
2. В составе облицовочной конструкции (моделирование облицовки и клеевой системы совместно с облицовочными профилями);
3. В составе рядовой конструктивной схемы НФС (моделирование облицовочной конструкции с вертикальными направляющими профилями подсистемы и тремя кронштейнами).
4. В составе межэтажной конструктивной схемы НФС (моделирование облицовочной конструкции с вертикальными направляющими профилями подсистемы и двумя кронштейнами).

Облицовочные конструкции представляют собой склеенные панели из керамогранита с облицовочными профилями. В данной работе рассматривается самонесущее клеевое крепление при помощи структурного клея-герметика. Основными несущими элементами каркаса НФС являются кронштейны, удерживающие вертикальные направляющие на необходимом вылете от стены, и сами направляющие, к которым крепятся облицовочные конструкции.

Для проведения численных расчётов были созданы конечно–элементные модели НФС с вертикальным типом приклейки облицовки в ПК SCAD Office (<https://scadsoft.com/>) в 4 различных постановках. Схема расположения и шаг клеевых швов для численных расчетов представлены на рисунке 1.



**Рис. 1 - Схема расположения и шаг клеевых швов**

**Fig. 1 - Layout and spacing of adhesive joints**

*Image by the authors of the article*

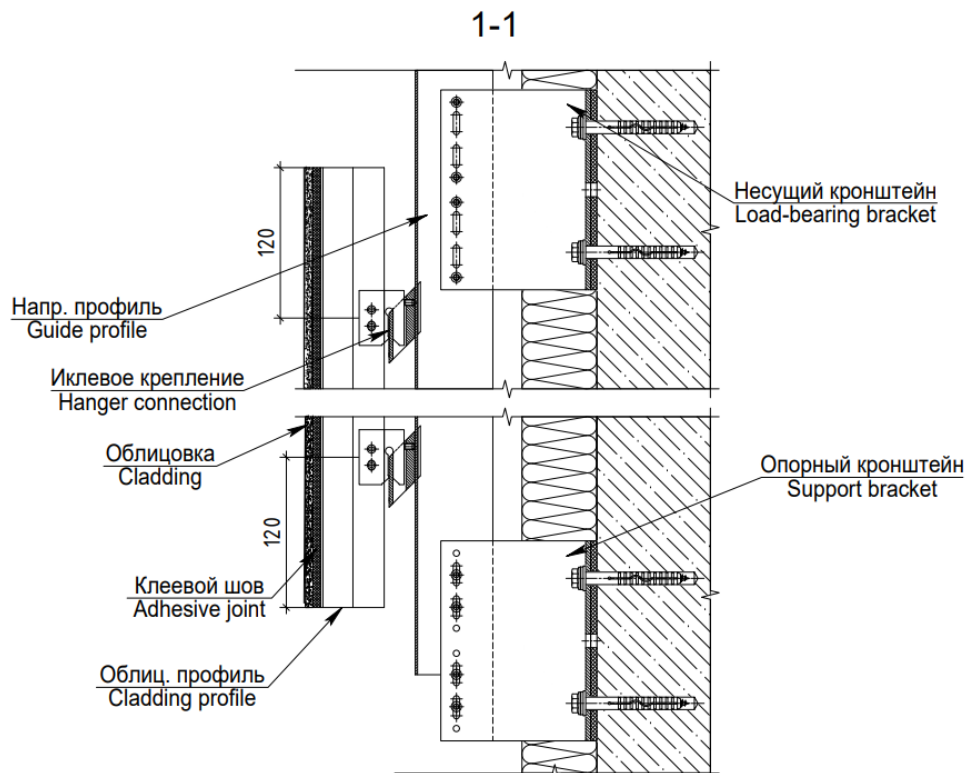
Конструктивные узловые решения по сечению 1–1 представлены на рис. 2. Шаг клеевых креплений принят равным 560 мм. Для рядовой схемы НФС шаг кронштейнов составил 1500 мм, для межэтажной — 3000 мм. Следует отметить, что нагрузка от собственного веса облицовочной конструкции воспринимается верхним рядом клеевых креплений. В связи с этим верхний ряд

Gusev, K.; Lalin, V.; Rybakov, V.

Bearing capacity of bonded connection in facade structures with vertically bonded cladding;

2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12203. doi: 10.4123/CUBS.122.3

рассматривается как несущий, тогда как остальные иклевые крепления выполняют функцию опорных.

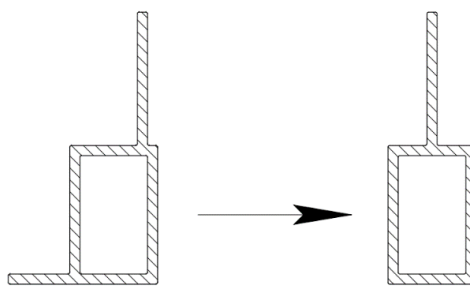


**Рис. 2 - Узловое решение НФС: вид в разрезе**

**Fig. 2 - Connection detail of the HFS: cross-sectional view.**

*Image by the authors of the article*

Для оценки и сопоставления НДС клеевых соединений в фасадных конструкциях с вертикальной приклейкой и металлическими кассетами в настоящей работе в качестве металлического облицовочного профиля принят типовой кассетный профиль фасадной системы «NordFox». В расчётной модели геометрия кассетного профиля была модифицирована с целью упрощения моделирования и снижения влияния изгибной (моментной) составляющей, действующей на клеевое соединение (рис. 3).

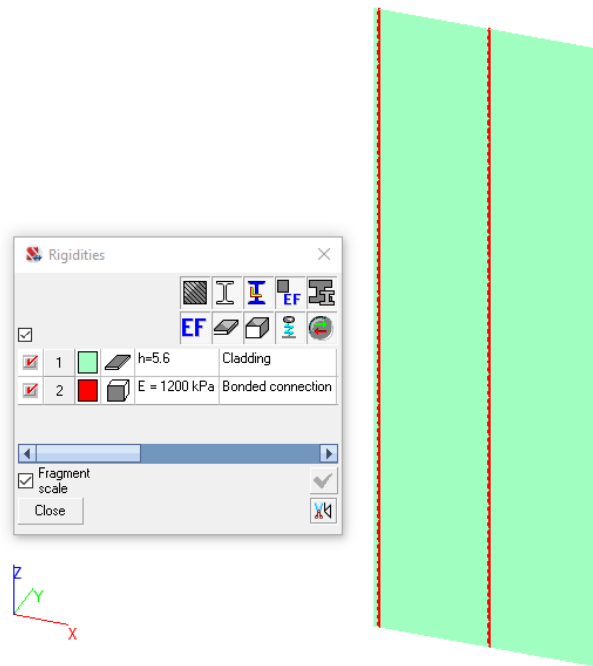


**Рис. 3 - Изменённое сечение кассетного профиля**

**Fig. 3 - Modified section of the cassette profile.**

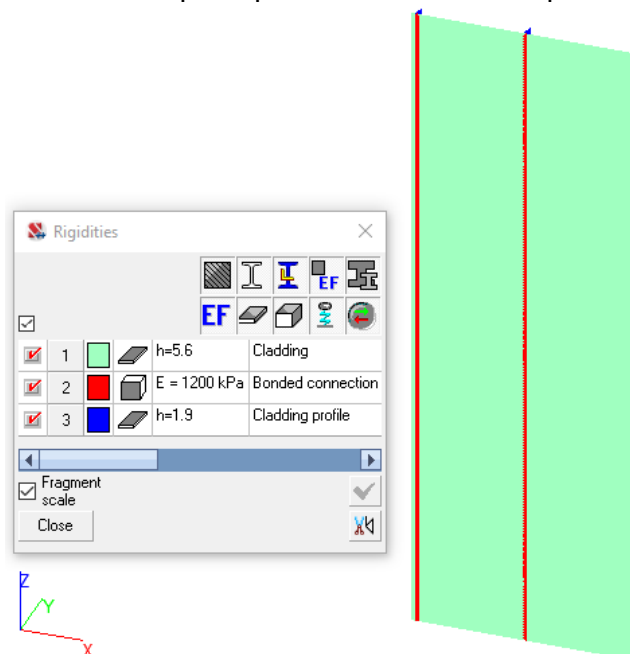
*Image by the authors of the article*

Расчет клеевого соединения в изолированной постановке выполнен для облицовочной панели из керамического гранита толщиной 6 мм, закрепляемой к металлическим облицовочным профилям посредством клеевого соединения. Общий вид расчетной модели в изолированной постановке и принятые жесткостные характеристики показаны на рис. 4.



**Рис. 4 - Расчетная модель в ПК SCAD Office для расчета в изолированной постановке**  
**Fig. 4 - Finite element model in SCAD Office for isolated analysis**  
*Image by the authors of the article*

Расчёт клеевого соединения в составе облицовочной конструкции предусматривает включение в расчётную схему облицовочных профилей, к которым облицовочная панель крепится с использованием структурного клея-герметика. Общий вид расчетной модели облицовочной конструкции и принятые жесткостные характеристики показаны на рис. 5.



**Рис. 5 - Расчетная модель в ПК SCAD Office для расчета в составе облицовочной конструкции**  
**Fig. 5 - Finite element model in SCAD Office for analysis as part of the cladding structure.**  
*Image by the authors of the article*

Для анализа работы клеевых соединений в составе НФС были разработаны модели с однопролётными направляющими длиной  $L = 3000$  мм, к которым с помощью иклевых креплений фиксировались облицовочные панели с клеевыми соединениями. Направляющие, в свою очередь, крепились к несущему основанию посредством кронштейнов. Иклевые крепления моделировались элементами конечной жёсткости. Были приняты следующие жесткостные характеристики иклевых креплений:

Gusev, K.; Lalin, V.; Rybakov, V.

Bearing capacity of bonded connection in facade structures with vertically bonded cladding;  
 2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12203. doi: 10.4123/CUBS.122.3

Жесткость иклевого крепления из плоскости фасада:

$$K_1 = 510 \frac{H}{\text{мм}}$$

Жесткость иклевого крепления в плоскости фасада:

$$K_2 = 440 \frac{H}{\text{мм}}$$

Общий вид расчетных моделей НФС рядовой и межэтажной конструктивных схем и принятые жесткостные характеристики элементов конструкции показаны на рис.6-7.

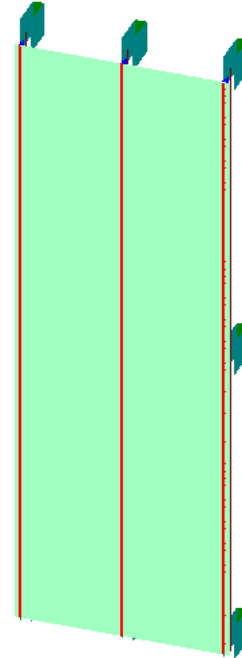
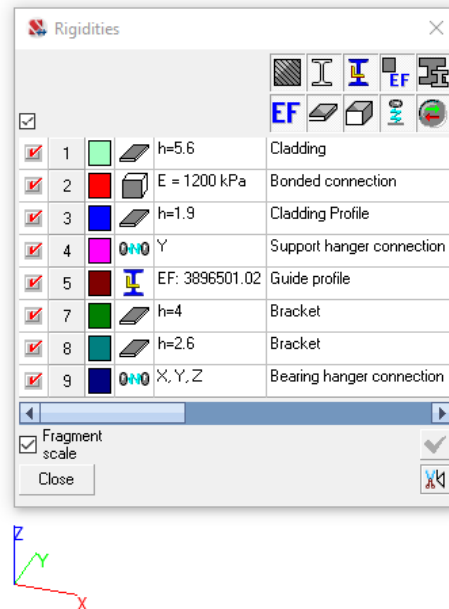


Рис. 6 - Расчётная модель в ПК SCAD Office для расчета в составе НФС (рядовая схема)  
 Fig. 6 - Finite element model in SCAD Office for analysis as part of the HFS (standard scheme)  
 Image by the authors of the article

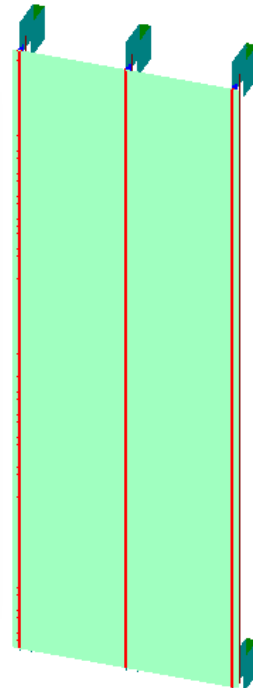
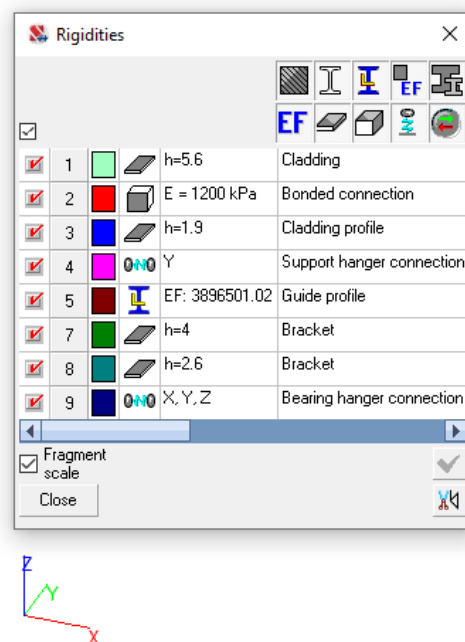


Рис. 7 - Расчётная модель в ПК SCAD Office для расчета в составе НФС (межэтажная схема)  
 Fig. 7 - Finite element model in SCAD Office for analysis as part of the HFS (inter-floor scheme)  
 Image by the authors of the article

Gusev, K.; Lalin, V.; Rybakov, V.

Bearing capacity of bonded connection in facade structures with vertically bonded cladding;  
 2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12203. doi: 10.4123/CUBS.122.3

В таблице 1 приведены характеристики керамических плит, используемых для статических расчетов в ПК SCAD Office.

Таблица 1 - Физико-механические показатели керамических плит  
Table 1 - Physico-mechanical characteristics of ceramic tiles

Наименование показателя	Показатель
Толщина плиты, мм	5.6
Объёмный вес, кг/м <sup>3</sup>	2500
Коэффициент поперечной деформации (Пуассона)	0.21
Модуль упругости, МПа	54000

Характеристики используемого клеевого соединения:

Клеевая система представляет собой однокомпонентный высокомодульный структурный силиконовый герметик нейтральной вулканизации. Характеристики структурного силиконового клея-герметика:

Расчётное сопротивление растяжению:

$$\sigma_{des} = 150 \text{ кПа.}$$

Расчётное сопротивление срезу (динамическое кратковременное воздействие):

$$\tau_{des} = 125 \text{ кПа.}$$

Расчётное сопротивление срезу (статическое постоянное воздействие):

$$\tau_{\infty} = 12.5 \text{ кПа.}$$

Модуль упругости при растяжении или сжатии:

$$E_0 = 1200 \text{ кПа.}$$

Модуль сдвига:

$$G_0 = 400 \text{ кПа.}$$

Были приняты следующие геометрические размеры клеевого соединения: 12x6 мм.

Результаты численного расчета клеевого соединения сравнивались с аналитическим расчетом согласно нормативному документу ETAG002.

Согласно ETAG 002 считается, что нагрузка от собственного веса системы воспринимается только вертикальными клеевыми швами, горизонтальные швы в расчёте не учитываются. Условие прочности выполняется в случае:

$$h_{c(shear)} \geq \frac{P}{2 \cdot \tau_{\infty} \cdot h_v}, \quad (1)$$

где  $h_v$  — высота вертикального клеевого шва;

$h_{c(shear)}$  — ширина клеевого соединения, определяемая при действии нагрузки от собственного веса облицовки;

$P$  — нагрузка от собственного веса облицовочных панелей, которая определяется по следующей формуле:

$$P = \rho \cdot a \cdot b \cdot t, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность облицовки;

$a, b$  — длина и высота облицовочной панели;

$t$  — толщина облицовочной панели.

Таким образом, касательные напряжения, возникающие в результате действия нагрузки от собственного веса облицовки определяются по следующей формуле:

$$\tau = \frac{P}{2 \cdot h_{c(shear)} \cdot h_v}. \quad (3)$$



Также, для самонесущей системы должно выполняться условие прочности при растяжении/сжатии шва герметика при действии пиковой ветровой нагрузки, которое будет обеспечено при

$$h_{c(tensile)} \geq \frac{w_{+(-)} \cdot a}{2 \cdot \sigma_{des}}, \quad (4)$$

где  $w_{+(-)}$  — пиковая ветровая нагрузка;

$h_{c(tensile)}$  — ширина клеевого соединения, определяемая при действии ветровой нагрузки.

Таким образом, нормальные напряжения, возникающие при действии пиковой ветровой нагрузки, определяются по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{w_{+(-)} \cdot c}{h_{c(tensile)}}, \quad (5)$$

где  $c$  — грузовая ширина действия ветровой нагрузки.

Для определения растягивающих напряжений в расчетную модель в ПК SCAD Office была задана отрицательная ветровая нагрузка, равная 1 кПа.

Для определения касательных напряжений в расчетную модель в ПК SCAD Office была задана нагрузка от собственного веса облицовочных панелей.

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Determination of stresses in the adhesive joint under the load from the self-weight of the cladding

*Аналитический расчёт клеевых швов.*

По формуле (2) были рассчитана нагрузка от собственного веса облицовки:

$$P = 24.525 \cdot 3.04 \cdot 1.052 \cdot 0.0056 = 0.439 \text{ кН}.$$

Далее по формуле (3) были вычислены максимальные касательные напряжения, возникающие в клеевых швах при действии нагрузки от собственного веса облицовочных панелей, при ширине клеевого шва 12 мм:

$$\tau_2 = \frac{0.439}{2 \cdot 0.012 \cdot 3.04} = 6.017 \text{ кПа}.$$

Крепление облицовочных панелей к облицовочным профилям осуществляется тремя вертикально ориентированными клеевыми швами. В соответствии с ETAG 002 [41] нагрузка от собственного веса облицовки воспринимается указанными вертикальными швами. Следовательно, выражение для определения касательных напряжений имеет вид:

$$\tau = \frac{P}{n \cdot h_{c(shear)} \cdot h_v}, \quad (6)$$

где  $n$  — количество вертикальных клеевых швов.

Таким образом, на основе аналитического расчёта определены значения касательных напряжений, возникающих в клеевом соединении при наличии трёх клеевых швов:

$$\tau_3 = \frac{0.439}{3 \cdot 0.012 \cdot 3.04} = 4.011 \text{ кПа}$$

*Численный расчёт клеевых швов.*

При решении задачи с помощью метода конечных элементов в ПК SCAD Office были получены касательные напряжения ( $\tau_{yz}$ ), возникающие в клеевых швах при действии нагрузки от собственного веса облицовочных панелей (см. рис. 8-11).

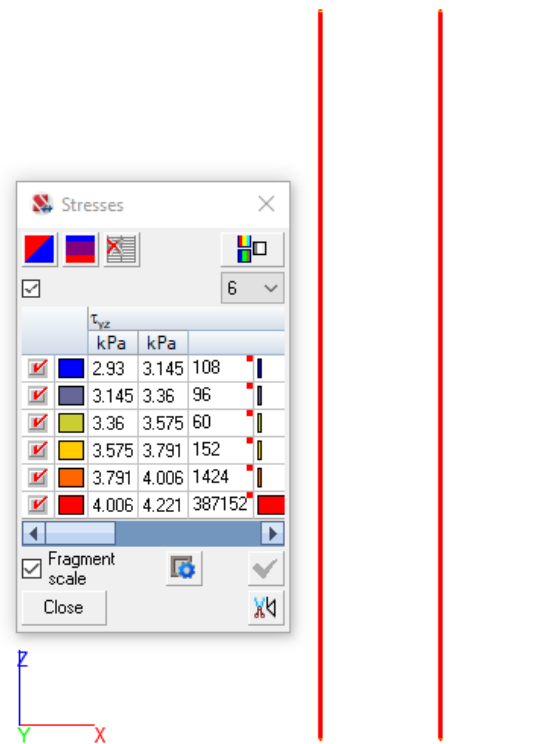


Рис. 8 - Касательные напряжения, возникающие в клеевых швах, при решении задачи в изолированной постановке

Fig. 8 - Shear stresses in adhesive joints obtained from the isolated analysis

*Image by the authors of the article*

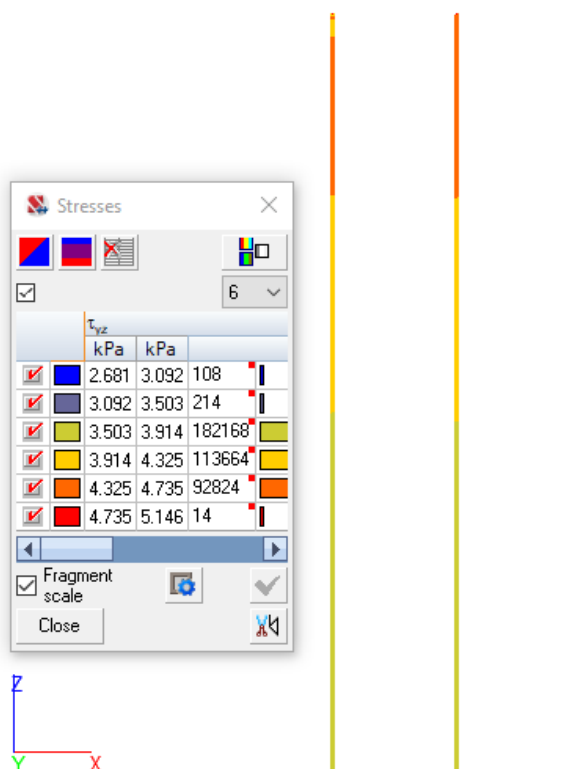


Рис. 9 - Касательные напряжения, возникающие в клеевых швах, при решении задачи в составе облицовочной конструкции

Fig. 9 - Shear stresses in adhesive joints obtained from the analysis as part of the cladding structure.

*Image by the authors of the article*

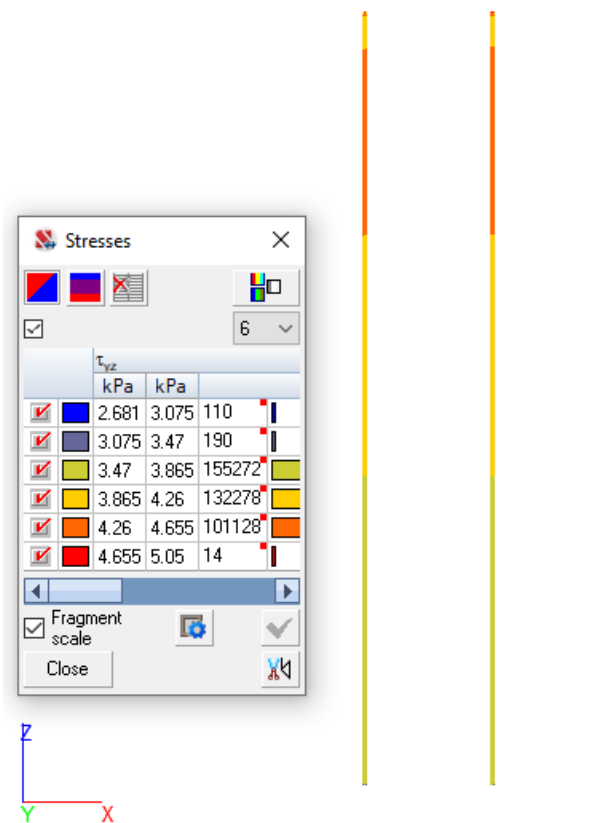


Рис. 10 - Касательные напряжения, возникающие в клеевых швах, при решении задачи в составе фрагмента НФС (рядовая схема).

Fig. 10 - Shear stresses in adhesive joints obtained from the analysis as part of the HFS fragment (standard scheme)

*Image by the authors of the article*

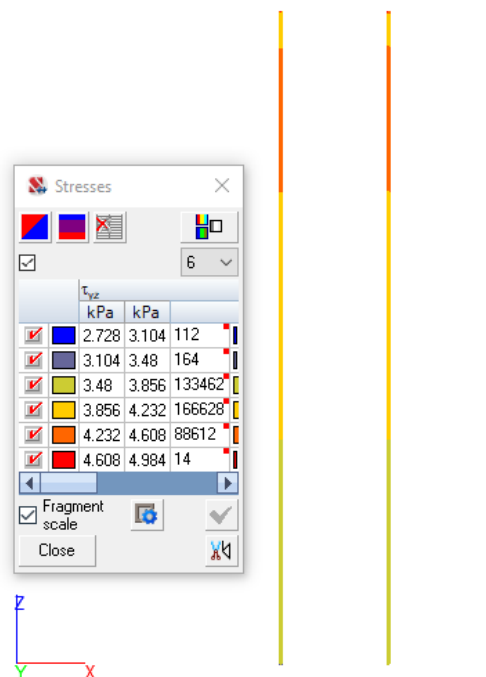


Рис. 11 - Касательные напряжения, возникающие в клеевых швах, при решении задачи в составе фрагмента НФС (межэтажная схема).

Fig. 11 - Shear stresses in adhesive joints obtained from the analysis as part of the HFS fragment (inter-floor scheme).

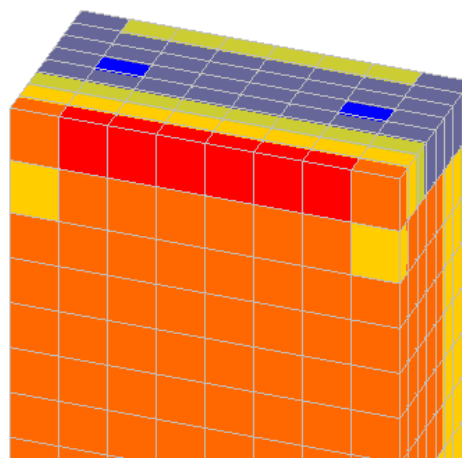
*Image by the authors of the article*

Результаты аналитического и численного расчета касательных напряжений, возникающих в клеевых швах, сведены в таблицу 2.

**Таблица 2 - Результаты расчета касательных напряжений**  
**Table 2 - Results of shear stress calculation**

Метод решения задачи	Максимальные касательные напряжения, кПа
ETAG 002 (2 клеевых шва)	6.017
ETAG 002 (3 клеевых шва)	4.011
Численный (изолированная)	4.221
Численный (в составе облицовочной конструкции)	5.146
Численный (в составе НФС – рядовая схема)	5.050
Численный (в составе НФС – межэтажная схема)	4.984

Стоит отметить, в таблицу 2 были сведены максимальные значения касательных напряжений, полученных в результате статических расчетов в ПК SCAD Office. Однако во всех расчетных случаях с учётом иклевых креплений и элементов подсистемы НФС на краю клеевого шва возникают существенные концентрации напряжений (см. рис. 12).



**Рис. 12 - Концентрации касательных напряжений на краю клеевого шва**  
**Fig. 12 - Shear stress concentrations at the edge of the adhesive joint**  
*Image by the authors of the article*

Результаты расчета, без учета концентраций, для дополнительного анализа сведены в таблицу 3.

**Таблица 3 - Результаты расчета касательных напряжений без учёта концентраций**  
**Table 3 - Results of shear stress calculation without considering stress concentrations**

Метод решения задачи	Максимальные касательные напряжения без учёта концентраций, кПа
Аналитический (2 клеевых шва)	6.017
Аналитический (3 клеевых шва)	4.011
Численный (изолированная)	4.221
Численный (в составе облицовочной конструкции)	4.655
Численный (в составе НФС – рядовая схема)	4.546
Численный (в составе НФС – межэтажная схема)	4.481

По результатам, представленным в таблицах 2-3, можно сделать следующие выводы:

1. Численное моделирование в изолированной постановке показывает, что касательные напряжения в клеевом соединении распределяются практически равномерно по длине шва и между швами. При этом рассчитанные значения касательных напряжений на 5% превышают напряжения, полученные по методике ETAG 002 [41] для схемы с тремя клеевыми швами.

2. Численные расчеты в составе облицовочной конструкции и НФС показывают, что учет иклевых креплений и элементов подсистемы НФС оказывают влияние (до 15%) на уровень и характер распределения касательных напряжений в клеевом соединении.

3. Исходя из вышеназванных выводов следует, что для оценки несущей способности клеевого соединения при вертикальной приклейке панелей к жёсткому несущему основанию без

применения точечных креплений при действии нагрузки от собственно веса облицовки, можно принять допущение о том, что формула для определения минимальной толщины клеевого соединения принимает следующий вид:

$$h_{c(shear)} \geq \frac{P}{n \cdot \tau_{\infty} \cdot h_v} ;$$

4. Тип конструктивной схемы НФС (рядовая или межэтажная) не оказывает существенного влияния на величину касательных напряжений при действии нагрузки от собственного веса облицовки; расхождения не превышают 2%;

5. По результатам численного моделирования установлено, что максимальные касательные напряжения локализуются у кромок вертикальных клеевых швов и сосредоточены в ограниченной области клеевого соединения. При исключении указанных концентраций из анализа напряжённого состояния наибольшие касательные напряжения фиксируются в зоне расположения несущих клеевых креплений, при этом их величина оказывается примерно на 10% ниже, чем возникающие в области концентраций. Вместе с тем для обоснования возможности исключения краевых концентраций касательных напряжений требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

### 3.2 Determination of stresses in the adhesive joint under wind load

#### **Аналитический расчёт клеевых швов:**

Исходя из формулы (5), максимальные растягивающие напряжения, возникающие в клеевых швах при действии пиковой ветровой нагрузки, равной 1кПа, при ширине клеевого шва 12 мм, равны:

$$\sigma_1 = \frac{1 \cdot 0.5}{0.012} = 41.667 \text{ кПа}.$$

Для учёта коэффициента включения грузовой ширины при действии ветровой нагрузки выполнен статический расчёт неразрезной балки в ПК SCAD Office (см. рис. 13). В узлах, соответствующих расположению клеевых швов, заданы опорные связи. Реакции в этих связях приняты в качестве коэффициентов включения грузовой ширины, приходящейся на каждый вертикальный шов рассматриваемой конструкции.



**Рис. 13 - Включение грузовой ширины при действии единичной равномерно-распределённой нагрузки**

**Fig. 13 - Involvement of the load width under a unit uniformly distributed load.**

*Image by the authors of the article*

Таким образом, при учёте максимального коэффициента включения грузовой ширины, были вычислены напряжения, возникающие в центральном клеевом шве:

$$\sigma_2 = \frac{1 \cdot 0.5 \cdot 1.246}{0.012} = 51.917 \text{ кПа}.$$

#### **Численный расчёт клеевых швов:**

При решении задачи с помощью метода конечных элементов в ПК SCAD Office были получены эквивалентные напряжения (по четвёртой теории прочности,  $\sigma_{IV}$ ), возникающие в клеевых швах при действии отрицательной ветровой нагрузки (см. рис. 14-17).

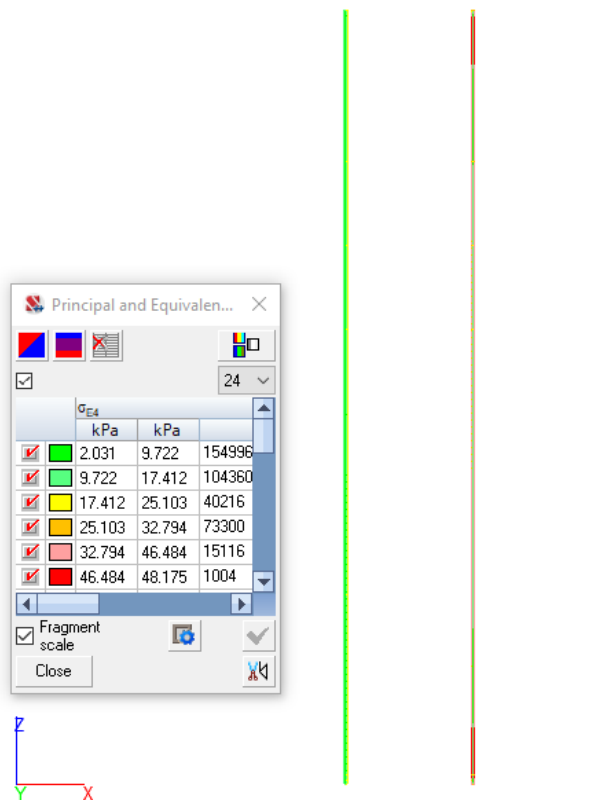


Рис. 14 - Эквивалентные напряжения, возникающие в клеевых швах, при решении задачи в изолированной постановке

Fig. 14 - Equivalent stresses arising in adhesive joints in the analysis of the problem in an isolated setting.

*Image by the authors of the article*

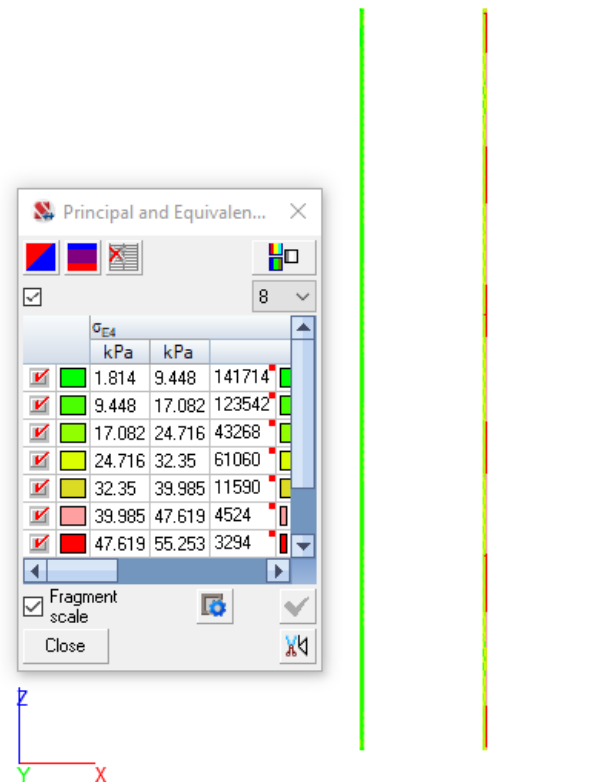


Рис. 15 - Эквивалентные напряжения, возникающие в клеевых швах, при решении задачи в составе облицовочной конструкции

Fig. 15 - Equivalent stresses arising in adhesive joints in the analysis of the cladding structure.

*Image by the authors of the article*

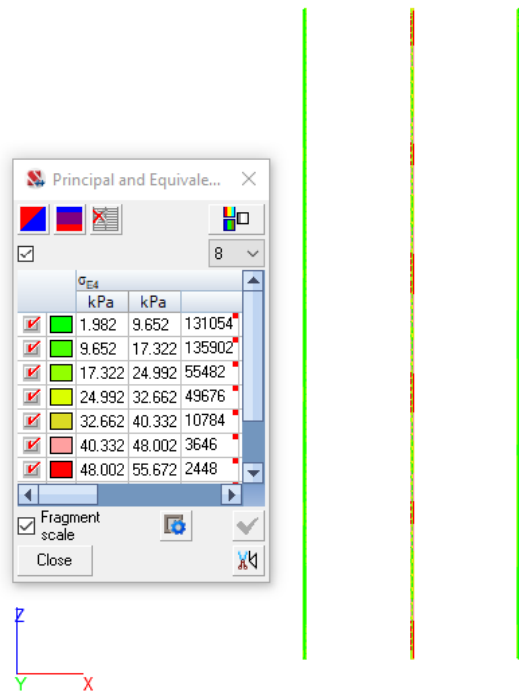


Рис. 16 - Эквивалентные напряжения, возникающие в клеевых швах, при решении задачи в составе фрагмента НФС (рядовая схема).

Fig. 16 - Equivalent stresses arising in adhesive joints in the analysis of the HFS fragment (standard scheme)

*Image by the authors of the article*

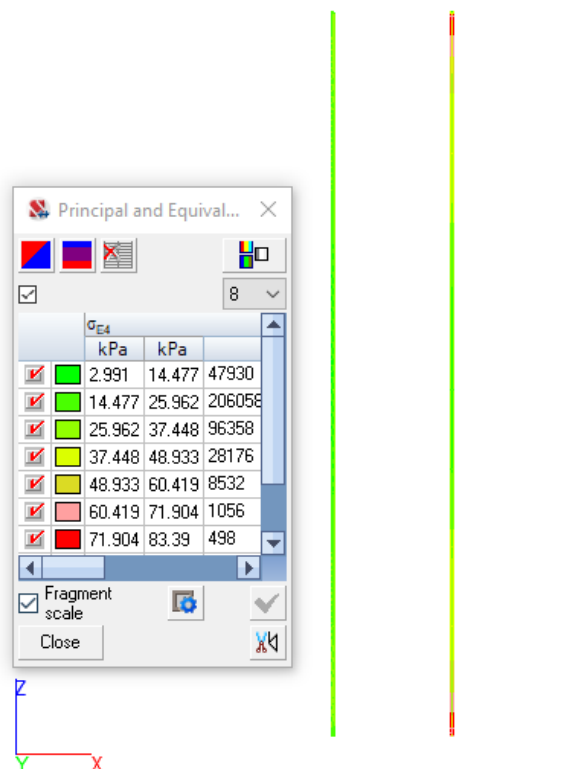


Рис. 17 - Эквивалентные напряжения, возникающие в клеевых швах, при решении задачи в составе фрагмента НФС (межэтажная схема).

Fig. 17 — Equivalent stresses arising in adhesive joints in the analysis of the HFS fragment (inter-floor scheme)

*Image by the authors of the article*

Результаты аналитического и численного расчета растягивающих напряжений, возникающих в клеевых швах, сведены в таблицу 4:

Gusev, K.; Lalin, V.; Rybakov, V.

Bearing capacity of bonded connection in facade structures with vertically bonded cladding;

2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12203. doi: 10.4123/CUBS.122.3

Таблица 4 - Результаты расчета напряжений при действии ветровой нагрузки  
Table 4 - Results of stress analysis under wind load

Метод решения задачи	Максимальные напряжения, кПа
ETAG 002	41.667
ETAG 002 (с учетом коэфф. включения грузовой ширины)	51.917
Численный (изолированная)	48.175
Численный (в составе облицовочной конструкции)	55.253
Численный (в составе НФС – рядовая схема)	55.672
Численный (в составе НФС – межэтажная схема)	83.390

По результатам, представленным на Рис. 14-17 и в таблице 4, можно сделать следующие выводы:

1. В соответствии с результатами численного моделирования напряжения, возникающие в клеевом соединении при действии ветровой нагрузки, существенно (более чем в 2 раза) превышают значения, получаемые при аналитическом расчёте по ETAG 002 [41]. Следовательно, применение методики ETAG 002 для определения напряжений в клеевом соединении при ветровом воздействии является некорректным для НФС с вертикальной приклейкой облицовки.;

2. Максимальные эквивалентные напряжения в клеевом соединении по результатам численных расчетов возникают в зонах установки креплений облицовочной конструкции к подсистеме НФС;

3. Результаты расчёта в изолированной постановке отличаются от результатов моделирования в составе облицовочной конструкции и НФС на 13–54%. Это подтверждает, что напряжённо-деформированное состояние клеевого соединения в значительной степени определяется учётом иклевых креплений и элементов подсистемы НФС;

4. Тип конструктивной схемы НФС (рядовая или межэтажная), а в частности, расположение кронштейнов подсистемы оказывает значительное влияние возникающие в клеевом соединении напряжения при действии пиковой ветровой нагрузки (до 40%). В связи с этим, определение несущей способности клеевых соединений в НФС с вертикальной приклейкой облицовки целесообразно рассчитывать численными методами при максимальной детализации расчётной модели, включая жесткостные характеристики элементов крепления облицовки и кронштейнов; такой подход обеспечивает наиболее объективную оценку работы клеевого соединения.

### 3.3 Analysis of forces arising in hanger connections under wind load

В рамках численного исследования клеевого соединения в составе облицовочной конструкции определены усилия в опорных связях в зоне установки креплений (см. рис. 18).

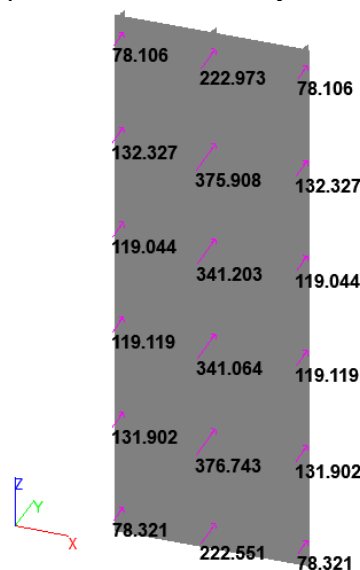
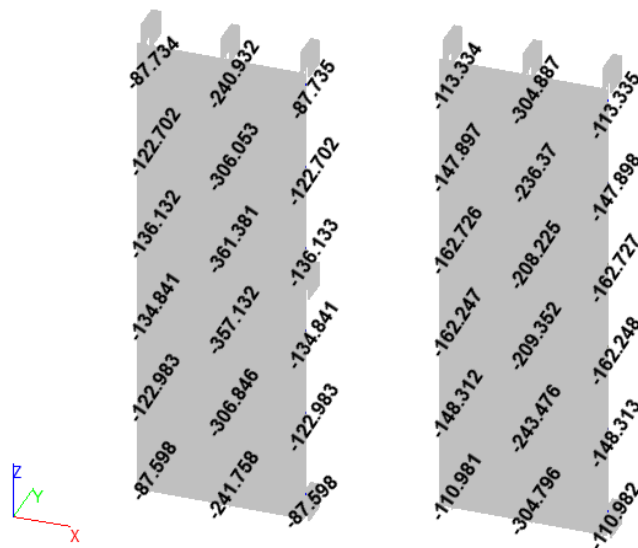


Рис. 18 - Усилия, возникающие в иклевых креплениях, при решении задачи в составе облицовочной конструкции

Fig. 18 - Forces arising in hanger connections in the analysis of the cladding structure  
Image by the authors of the article

Кроме того, получены значения усилий, возникающих непосредственно в иклевых креплениях, которые в расчётных моделях задавались с использованием связей конечной жёсткости (см. рис. 19).



**Рис. 19 - Усилия, возникающие в иклевых креплениях, при решении задачи в составе фрагмента НФС: слева - рядовая схема; справа - межэтажная схема**

**Fig. 19 - Forces arising in hanger connections in the analysis of the HFS fragment: left – standard scheme; right –inter-floor scheme**  
*Image by the authors of the article*

В случае моделирования НФС с учётом подсистемы (рядовая и межэтажная схемы), максимальные напряжения в клеевом соединении возникают в краевых областях вертикального шва. При моделировании в составе облицовочной конструкции максимальные напряжения возникают в зоне расположения наиболее нагруженного иклевого крепления. Для количественной оценки влияния усилий, возникающих в иклевых креплениях, в таблицу 5 были сведены значения усилий, возникающих в верхних иклевых креплениях центрального направляющего профиля, а также значения напряжений в клеевом соединении в данной области.

**Таблица 5 - Усилия в иклевых креплениях и напряжения в клеевом соединении**  
**Table 5 - Forces in hanger connections and stresses in the adhesive joint**

Метод решения задачи	Усилие в верхнем иклевом креплении, Н	Напряжения в клеевом соединении (в области верхнего крепления), кПа
Численный (в составе облицовочной конструкции)	222.973	52.516
Численный (в составе НФС – рядовая схема)	240.932	55.672
Численный (в составе НФС – межэтажная схема)	304.887	83.390

На основании полученных данных сформулированы следующие выводы:

1. Усилия, возникающие в иклевых креплениях, оказывают существенное влияние на уровень и характер распределения напряжений в клеевом соединении при действии ветровой нагрузки: с увеличением усилия в иклевом креплении возрастает величина напряжений в силиконовом клее-герметике.

2. Зона максимальных напряжений в клеевом соединении не всегда совпадает с расположением иклевого крепления, в котором возникает наибольшее усилие. По данным численного расчёта в изолированной постановке установлено, что при исключении влияния креплений облицовочной конструкции, максимальные напряжения в клеевом соединении НФС при вертикальной схеме приклейки облицовки возникают в краевых участках клеевого шва, а не распределяются равномерно по его длине. В связи с этим требуется дальнейшее исследование закономерностей распределения напряжений в клеевом соединении и выявление дополнительных факторов, определяющих их величину и область возникновения.



## 4 Conclusions

1. Численное моделирование в изолированной постановке показывает, что касательные напряжения в клеевом соединении распределяются практически равномерно по длине шва и между швами. При этом рассчитанные значения касательных напряжений на 5% превышают напряжения, полученные по методике ETAG 002 для схемы с тремя клеевыми швами.

2. Численные расчеты в составе облицовочной конструкции и НФС показывают, что учет иклевых креплений и элементов подсистемы НФС оказывают влияние (до 15%) на уровень и характер распределения касательных напряжений при действии нагрузки от собственного веса в клеевом соединении.

3. Предложено для оценки несущей способности клеевого соединения при вертикальной приклейке панелей к жёсткому несущему основанию без применения точечных креплений при действии нагрузки от собственного веса облицовки, принять допущение о том, что формула для определения минимальной толщины клеевого соединения принимает следующий вид:

$$h_{c(shear)} \geq \frac{P}{n \cdot \tau_{\infty} \cdot h_v};$$

4. Тип конструктивной схемы НФС (рядовая или межэтажная) не оказывает существенного влияния на величину касательных напряжений при действии нагрузки от собственного веса облицовки. Расхождения не превышают 2%;

5. Максимальные касательные напряжения возникают у кромок вертикальных клеевых швов и сосредоточены в ограниченной области клеевого соединения. Вне краевых концентраций максимум приходится на зоны расположения несущих иклевых креплений и примерно на 10% ниже; Целесообразность исключения краевых концентраций требует экспериментального подтверждения;

6. При ветровом воздействии напряжения в клеевом соединении, полученные с помощью численного исследования, более чем в 2 раза превышают значения по ETAG 002. Следовательно, методика ETAG 002 неприменима для НФС с вертикальной приклейкой облицовки. Максимальные эквивалентные напряжения при этом возникают на крайних участках вертикальных швов;

7. Результаты расчёта в изолированной постановке отличаются от результатов моделирования в составе облицовочной конструкции и НФС на 13–54%. Установлено, что напряжённо-деформированное состояние клеевого соединения в значительной степени определяется учётом иклевых креплений и элементов подсистемы НФС;

8. Предложено выполнять оценку несущей способности клеевого соединения, для НФС с вертикальной приклейкой облицовки при ветровом воздействии, численным методом с детализированной моделью и учётом жёсткости и расположения иклевых креплений и кронштейнов, в связи с тем, что на НФС клеевого соединения существенно влияют конструктивная схема НФС и расположение кронштейнов (до 40%);

9. Установлено, что усилия в иклевых креплениях определяют величины и распределение напряжений в клеевом соединении при ветровом воздействии: рост усилий приводит к увеличению напряжений в силиконовом клее-герметике.

10. Область максимальных напряжений не всегда совпадает с креплением с наибольшим усилием; в изолированной модели зоны максимальных напряжений также возникают ближе к краям клеевого шва. Требуются дополнительные исследования факторов и закономерностей распределения напряжений в клеевом соединении в НФС с вертикальной приклейкой облицовки при действии ветровой нагрузки.

## 5 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.



## References

1. Zhumabaev, A.K., Makashev, K.T., Makhanov, N., Ordabaev, M.M. and Stolboushkin, A.Yu. (2025) The adhesive joints of wooden structures: experimental investigation of glued I-beam. *Science and Technology of Kazakhstan*, **2**, 483–489. <https://doi.org/10.48081/LYQQ6848>
2. Gavrilov, V.B., Morozov, M.S. and Varlamov, A.A. (2021) Method for evaluating the strength of joints in building structures. *Molodyye uchenyye Rossii*, **12**, 77–81. <https://www.elibrary.ru/ecwjow>
3. Soldatov, D.S. and Noskov, D.A. (2023) Adhesive method for connecting parts. *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference "Razvitiye sovremennoy nauki i obrazovaniya: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii"*, 45–47. <https://www.elibrary.ru/jbpxvh>
4. Grachev, D. and Maklakova, E. (2025) Inside Wood Glue Joints: Structure and How We Study It. *Science and Students 2025: Proceedings of the All-Russian Interdisciplinary Scientific and Practical Conference*, 290–294. [https://doi.org/10.58168/SAS2025\\_290-294](https://doi.org/10.58168/SAS2025_290-294)
5. Danilov, A.I. and Kalugin, I.A. (2021) Strengthening elements of steel structures using adhesive joints. *Engineering Journal of Don*, **2**, 364–370. <https://www.elibrary.ru/saojif>
6. Potur, A.M. (2024) Methodology for Determining the Efficiency of Using Adhesive Joints and Steel Bending Elements. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU imeni V.G. Shukhova*, 136–140. <https://www.elibrary.ru/jpnoxax>
7. Vanin, I.V. and Ariskin, M.V. (2024) The effectiveness of the use of glued threaded washers in the joints of wooden structures. *News KSUAE*, **1(67)**, 63–70. <https://doi.org/10.48612/NewsKSUAE/67.7>
8. Zhumabayev, A.K., Makashev, K.T., Makhanov, N., Ordabayev, M.M. and Stolboushkin, A.Y. (2025) The Adhesive Joints of Wooden Structures: Experimental Investigation of Glued I-Beam. *Science and Technology of Kazakhstan*, **2**, 483–489. <https://doi.org/10.48081/LYQQ6848>
9. Yesipov, A.V., Yerenchinov, S.A. and Chernykh, K.V. (2020) Accounting for the compliance of the adhesive joint between reinforcement and wood in reinforced wooden beams. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, **4(40)**, 29–40. <https://www.elibrary.ru/sxdkmm>
10. Sinelyubov, M.A. (2023) Analysis and Comparison of Methods for Fastening Metal Structures. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, **5**, 167–169. <https://www.elibrary.ru/mvhfpe>
11. Korotets, D.E. (2023) Types of Joint Connections in Thin-Walled Structures. *Resursosberezheniye i ekologiya: agropromyshlennyy kompleks, proyektirovaniye i stroitel'stvo*, 256–258. <https://www.elibrary.ru/rkavgn>
12. Markin, V.B. and Lyamar, K.Y. (2025) Reinforcement of Reinforced-Concrete Floor Slabs with Composite Strips. *Fundamental'noe i prikladnoe materialovedenie*, 4–8. <https://www.elibrary.ru/vkthrn>
13. Lin'kov, N.V. (2021) To the question of the method for determining the strength characteristics of adhesive joints of wooden structures. *Textile Industry Technology*, **3(393)**, 153–158. [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2021\\_3\\_153](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_3_153)
14. Zhang, Ts. (2022) Comparison of methods for determining the mechanical characteristics of adhesive joints. *Politeknicheskyy molodezhnyy zhurnal*, **7(72)**, 1–10. <https://www.elibrary.ru/muvznz>
15. Nasonov, F.A. and Morozov, B.B. (2023) Question of strength determination of adhesive joints of parts and aggregates made of polymer composite materials. *Sovremennyye problemy mashinovedeniya*, 83–86. <https://www.elibrary.ru/ysudrx>
16. Klyuchnikov, O.R. and Farvaeva, E.R. (2025) Shear adhesive strength of polyamide-6 bonded with ethyl-2-cyanoacrylate compositions. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*, **28(11)**, 107–111. <https://www.elibrary.ru/byznvr>
17. Buylov, S.V., Buylova, M.V., Koryagin, S.I. and Liberman, I.V. (2022) Assessment of the strength of adhesive joints of reinforced polymer with metal in a complex stress state. *VIII Mezhdunarodnaya konferentsiya "Problemy mekhaniki sovremennykh mashin"*, 287–294. [https://doi.org/10.53980/9785907599055\\_287](https://doi.org/10.53980/9785907599055_287)



18. Cherenkov, E.D. and Golovina, E.A. (2024) Determination of the Main Factors Affecting the Adhesive Properties of Adhesive Joints. *Tekhnologii i oborudovaniye khimicheskoy, biotekhnologicheskoy i pishchevoy promyshlennosti*, 163–166. <https://www.elibrary.ru/idroh>
19. Zharinov, M.Yu. and Marasanov, A.I. (2023) Stress-strain state analysis of the polymer insulator adhesive bonding of a railway overhead system with a metal insulation displacement contact under torsion. *Russian Journal of Transport Engineering*, **10(3)**. <https://doi.org/10.15862/13SATS323>
20. Stoykovich, N., Smil'kovich, S., Tsurkina, S.K. and Laketch, A. (2017) Influence of moisture on adhesive joints. *Nauka i innovatsii v stroitel'stve*, 40–49. <https://www.elibrary.ru/zetlkf>
21. Veretikov, I.I. (2015) Effects of temperature and moisture actions on strength factors of adhesive joints. *Trudy BGTU. No. 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*, **2(175)**, 170–173. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-temperaturno-blazhnostnyh-bozdeystviy-na-prochnostnye-pokazateli-kleevyh-soedineniy>
22. Aruova, L., Korniejenko, K., Zhakanov, A., Zhaksyllykova, L. and Akimbekova, S. (2025) Thermophysical studies of adhesive joints of wood and reinforcement made of refractory materials on waste. *Trudy Universiteta*, **3(100)**, 204–210. <https://www.elibrary.ru/ffrozy>
23. Mikhas'kin, V.V. (2023) Stress-strain state of a steel rod reinforced with carbon fiber under the action of elevated temperatures. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, **4-3(79)**, 86–92. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-4-3-86-92>
24. Fedyaev, A.A., Somov, A.B. and Sanzhara, E.A. (2023) Study of the formation of strong adhesive joints under the effect of ambient temperature. *Lesoekspluatatsiya i kompleksnoye ispol'zovaniye drevesiny*, 70–73. <https://www.elibrary.ru/ufqjpr>
25. Lingzhen, L., Wandong, W., Eleni, C. and Elyas, G. (2023) Experimental investigation on debonding behavior of Fe-SMA-to-steel joints. *Construction and Building Materials*, **364**, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129857>
26. Carneiro Neto, R.M., Vogas, E.F., Akhavan-Safar, A., Carbas, R.J.C., Sampaio, E.M. and da Silva, L.F.M. (2024) Impact of surface preparation method on the fracture toughness of adhesive joints subjected to diverse loading modes. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **133**, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103763>
27. Castro Sousa, F., Zamani, P., Akhavan-Safar, A. and da Silva, L.F.M. (2024) A comprehensive review of the S–N fatigue behaviour of adhesive joints. *Journal of Advanced Joining Processes*, **9**, 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100178>
28. Castro Sousa, F., Akhavan-Safar, A., Carbas, R.J.C., Marques, E.A.S., Barbosa, A.Q. and da Silva, L.F.M. (2023) Experimental study on the influence of environmental conditions on the fatigue behaviour of adhesive joints. *International Journal of Fatigue*, **175**, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107752>
29. Akhavan-Safar, A., Jalali, Sh., da Silva, L.F.M. and Ayatollahi, M.R. (2023) Effects of low cycle impact fatigue on the residual mode II fracture energy of adhesively bonded. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **126**, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103455>
30. Liu, I. and Zuzov, V.N. (2021) Investigation of the effect of finite element sizes on the accuracy of modeling a bonded joint in automotive structures. *Izvestia MGTU MAMI*, **15(3)**, 31–41. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-49-3-31-41>
31. Liu, I. and Zuzov, V.N. (2022) Numerical simulation of adhesive joint in automobile designs under quasistatic loading using an improved model of its properties. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, **3(138)**, 84–97. [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2022\\_3\\_84](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_3_84)
32. Sevostyanov, P.A., Samoylova, T.A. and Minaeva, N.V. (2025) Modeling of the deformation of an adhesive bond under peel loading. *Materialy dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem im. Ya.V. Mil'mana*, 145–153. <https://www.elibrary.ru/ctdtdk>
33. Markin, O.V., Komissar, O.N. and Bush, A.V. (2024) Determination of the strength of the adhesive joint of the overlap of aluminum alloy plates. *Universum: tehničeskie nauki*, **3-1(120)**, 4–13. <https://www.elibrary.ru/heyPCR>
34. Putkova, V.A., Glebov, V.V. and Plaksin, S.A. (2024) Strength analysis of an adhesive joint by the finite element method. *Sotsial'no-ekonomicheskiye i tekhnicheskkiye problemy oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii: istoriya, real'nost', innovatsii*, 276–280. <https://www.elibrary.ru/dcysla>



35. Bolghand, Y., Chakherlou, T.N. and Biglari, H. (2023) Influence of graphene oxide nanoplatelets on the adhesive strength of Araldite under mixed-mode I/II loading. *Fizicheskaya mezhmekhanika*, 26(2), 115–125. <https://www.elibrary.ru/vlmggb>
36. Morina, A.A., Morina, E.A., Makarov, A.I., Galyamichev, A.V. and Nazarov, M.A. (2020) The influence of method of the fastening cladding on the design scheme of the hinged facade system frame. *AlfaBuild*, 1(13), 21–28. <https://alfabuild.spbstu.ru/article/2020.13.4/>
37. Descamps, P., Kimberlain, J., Bautista, J. and Vandereecken, P. (2016) Structural Glazing: Design under High Windload. *Challenging Glass 5. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. <https://doi.org/10.7480/cgc.5>
38. Alcaine, J., Lenk, P. and Forwood, E. (2020) Structural Silicone Glazing — Design & Modelling. *Challenging Glass 7. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. <https://doi.org/10.7480/cgc.7.4548>
39. Pavlova, M.O., Zakharov, V.A. and Kosheleva, L.I. (2022) Problems of the joint application of metal substructures of suspended facade systems and large-size fiber cement elements on the facades of modern development buildings. *Earthquake engineering constructions safety*, 4, 34–46. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-34-46>
40. Andreeva, S.A. (2024) Analysis of the stress-strain state of glass elements in translucent facade systems. *Razvitiye sovremennykh tekhnologiy: teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty*, 140–144. <https://www.elibrary.ru/phezkv>
41. ETAG002 Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems. <https://www.eota.eu/sites/default/files/uploads/ETAGs/etag-002-may-2012.pdf>
42. ASTM C 1184 Standard Specification for Structural Silicone Sealants. <https://elitesafetyglass.com/wp-content/uploads/2021/04/ASTM-C1184-Standard-Specification-for-Structural-Silicone-Sealants.pdf>
43. ASTM C1401 Standard Guide for Structural Sealant Glazing. <https://ru.scribd.com/document/787780402/ASTM-C1401-23>