Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 4 / 2025, Vol. 17, Iss. 4 https://esj.today/issue-4-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/66SAVN425.pdf

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**
Акимов, Л. И. Проектирование динамических фасадов — разработка физической модели / Л. И. Акимов, Д. Г. Васильева, Г. Л. Козинец, В. Л. Баденко // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 4. — URL: https://esj.today/PDF/66SAVN425.pdf.

**For citation:**
Akimov L.I., Vasileva D.G., Kozinets G.L., Badenko V.L. Dynamic facade design — a physical model development. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(4): 66SAVN425. Available at: https://esj.today/PDF/66SAVN425.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

**УДК 692**

**Акимов Лука Игоревич**
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Исследователь
E-mail: lukakimov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8603-1956
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=795716

**Васильева Дарья Геннадьевна**
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Ассистент
E-mail: vasileva.dasha19962015@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9914-014X

**Козинец Галина Леонидовна**
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства
Директор, профессор
Доктор технических наук
E-mail: kozinets_gl@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6877-8420
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=624625

**Баденко Владимир Львович**
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Доцент
Доктор технических наук
E-mail: vbadenko@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3054-1786
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=131728

# Проектирование динамических фасадов — разработка физической модели

**Аннотация.** Повышение энергоэффективности зданий является критически важной задачей, особенно в контексте высоких затрат на искусственное освещение, которое может достигать 45 % от общего энергопотребления. Одним из перспективных направлений является использование динамических фасадов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды для оптимизации использования естественного света и снижения

энергозатрат. Однако их широкому внедрению мешает проблема перехода от аналитической модели к физической реализации.

В данной статье представлено практическое применение авторской методики для проектирования и интеграции динамического фасада в ограждающую конструкцию здания. Основное внимание уделено инженерной проработке этого перехода. Разработаны и применены четыре критерия обеспечения реализуемости, касающиеся механических свойств, интеграции в конструкцию, доступности материалов и простоты приводного механизма.

На примере здания в г. Сочи (III ветровой район) проведено комплексное численное моделирование: аэродинамический анализ для определения ветровых нагрузок и прочностной расчет конструкции. На основе концепции «двери Клемена Торгглера» спроектирована физическая модель фасада с поворотно-складывающимися алюминиевыми элементами, подобран приводной механизм и рассчитаны все несущие элементы (шарниры, швеллеры). Результаты моделирования подтвердили прочность и надежность конструкции при воздействии статических и динамических ветровых нагрузок.

Работа демонстрирует эффективность авторской методики как инструмента, закрывающего разрыв между цифровым проектированием и физической реализацией энергоэффективных адаптивных фасадов, доказав их техническую осуществимость и надежность.

**Ключевые слова:** динамический фасад; адаптивный фасад; расчет ветровых нагрузок; аэродинамическое моделирование; ограждающие конструкции; ветровые нагрузки; обтекание здания ветром; подбор материалов; критерии проектирования

## Введение

Задачи, связанные с улучшением показателей энергоэффективности зданий, занимают особое место во многих областях строительства и промышленности. Фасадные системы зданий играют важнейшую роль в формировании показателей энергоэффективности зданий.

В современных зданиях можно увидеть тенденцию увеличения вклада энергопотребления на искусственное освещение в общем объеме потребления энергии зданиями. В среднем в коммерческих зданиях на освещение приходится до 45 % общего потребления электроэнергии.

Проектирование и внедрение интерактивных, адаптивных и динамических типов устройств затенения, интегрированных в ограждающие конструкции, способствует регулированию уровней естественного освещения внутри зданий. Динамический фасад — это внешняя система затенения, интегрируемая в ограждающую конструкцию здания, способная адаптироваться к изменяющимся граничным условиям в виде краткосрочных погодных изменений, суточных погодных циклов или сезонных погодных закономерностей; целью динамического фасада является оказание воздействия на систему здания, путем достижения трех требований к эффективности фасадной системы: энергосбережение, комфорт пользователей здания, нейтрализация вредного воздействия здания на окружающую среду [1–5].

Помимо нерешенных в научном сообществе вопросов, связанных с количественной оценкой эффективности динамических фасадов [6–9], существуют и другие проблемы, влияющие на использование динамических фасадов в ограждающих конструкциях зданий. Одна из ключевых проблем связана с возможностью натурной реализации аналитической модели динамического фасада, его внедрение в существующие ограждающие конструкции зданий [6].

Для решения вопроса интеграции динамического фасада в ограждающие конструкции здания при проектировании динамического фасада необходимо учитывать параметры: механические свойства применяемых материалов, механизм актуации динамического фасада, существующая система ограждающих конструкций [10].



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Точное воспроизведение аналитической модели в физической модели позволит осуществить простую интеграцию динамического фасада в цифровую модель эксплуатируемого здания — цифровой двойник [11]. Дополнительно, здания, ограждающие конструкции которых содержат динамический фасад, физическая модель которых идентична аналитической модели, могут быть интегрированы в пространственно-временные базы данных, необходимые для анализа состояния территории, прогнозирования изменений и принятия решений, особенно в части реализации энергетических стратегий и энергоменеджмента [12; 13].

В работах [2; 4] предложена методика проектирования ограждающих конструкций зданий с динамическим фасадом, способная улучшить светотехнические характеристики объекта проектирования, учитывающая мультидисциплинарность процесса проектирования динамических фасадов [1–5], и при этом не требующая больших вычислительных затрат — ИПДФ-методика (методика авторской разработки, которая в источниках литературы [2; 4] называется «FDPI-методика»). Основой методики является параметр, учитывающий эффективность дневного освещения, достигнутую при использовании динамического фасада — «изменение производительности динамического фасада» — ИПДФ или, как это описано в [2; 4], «улучшение эффективности динамического фасада с точки зрения обеспечения доступности дневного света» (от англ. façade daylighting performance improvement indicator, FDPI). ИПДФ позволяет учитывать несколько ключевых параметров эффективности динамических фасадов при общей оценке эффективности динамических фасадов при общей оценке эффективности и предоставляет количественные результаты в сравнительном выражении [2; 4].

В работах [2; 4] проиллюстрировано использование ИПДФ-методики на примере проектирования динамического фасада. Для проведения эксперимента, в работе заданы граничные условия проектирования: граничные климатические условия, тестовое здание и тестовая комната. Для проведения оценки эффективности работы запроектированного динамического фасада с использованием ИПДФ-методики в исследовании выбрано несколько существующих эффективных динамических фасадных решений, представителей различных типологий динамических фасадов (именуемых «Типологиями»). Оценка эффективности запроектированного динамического фасада произведена с использованием ИПДФ в сравнении с Типологиями. Проведенная оценка эффективности позволила сделать вывод о наиболее эффективном с точки зрения доступности дневного света динамическом фасаде из пула сравниваемых с помощью ИПДФ-методики динамических фасадов. Вывод из проведенного анализа позволил выявить основные геометрические особенности фасада, показавшего наибольшую эффективность — эти данные были использован для модификации изначально запроектированного динамического фасада для улучшения его характеристиках с точки зрения доступности дневного света и, следовательно, визуального комфорта внутри помещений. Критерием оценки эффективности работы динамического фасада является обеспечиваемая доступность «эффективного» дневного света, связанный с ним визуальный комфорт внутри помещений с использованием CBDM-параметров (от англ. Climate-based daylight metrics).

ИПДФ-методика позволяет учитывать несколько критериев проектирования ограждающей конструкции с динамическим фасадом, поскольку ИПДФ является универсальным параметром, который в сравнительном выражении позволяет оценить улучшение характеристик исследуемого динамического фасада с точки зрения параметров, представляющих интерес для проектировщика. Переход от аналитической модели динамического фасада к физической модели также учтен в ИПДФ-методике. В статьях [2; 4] авторами продемонстрировано использование ИПДФ-методики с точки зрения разработки аналитической модели в целях разработки оптимального с точки зрения улучшения светотехнических характеристик здания в части обеспечения «полезного» уровня дневного света внутри помещений.

В данной работе авторы делают упор на демонстрацию работы ИПДФ-методики с точки зрения перехода от аналитической модели динамического фасада к его физической модели.



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

## 1. Материалы и методы

**Методика ИПДФ (FDPI)**. Как описано в [2; 4] проектирование динамических фасадов — междисциплинарный многозадачный процесс проектирования, целью которого является создание эффективного проектного решения через подбор оптимальных параметров динамического фасада. Основные параметры проектирования динамических фасадов можно разделить на «внутренние» (геометрия фасада, материалы фасада, механика движения) и «внешние» или «граничные» (расположение здания, для которого проектируется динамический фасад, внутренняя планировка помещений здания, ориентация остекленной части фасада, назначение здания и др.) [14]. Цель ИПДФ-методики заключается в эффективном проектировании динамического фасада на предпроектной стадии за счет балансирования основных параметров динамического фасада [1; 15; 16]. На рисунке 1.1 представлена блок-схема работы методики.

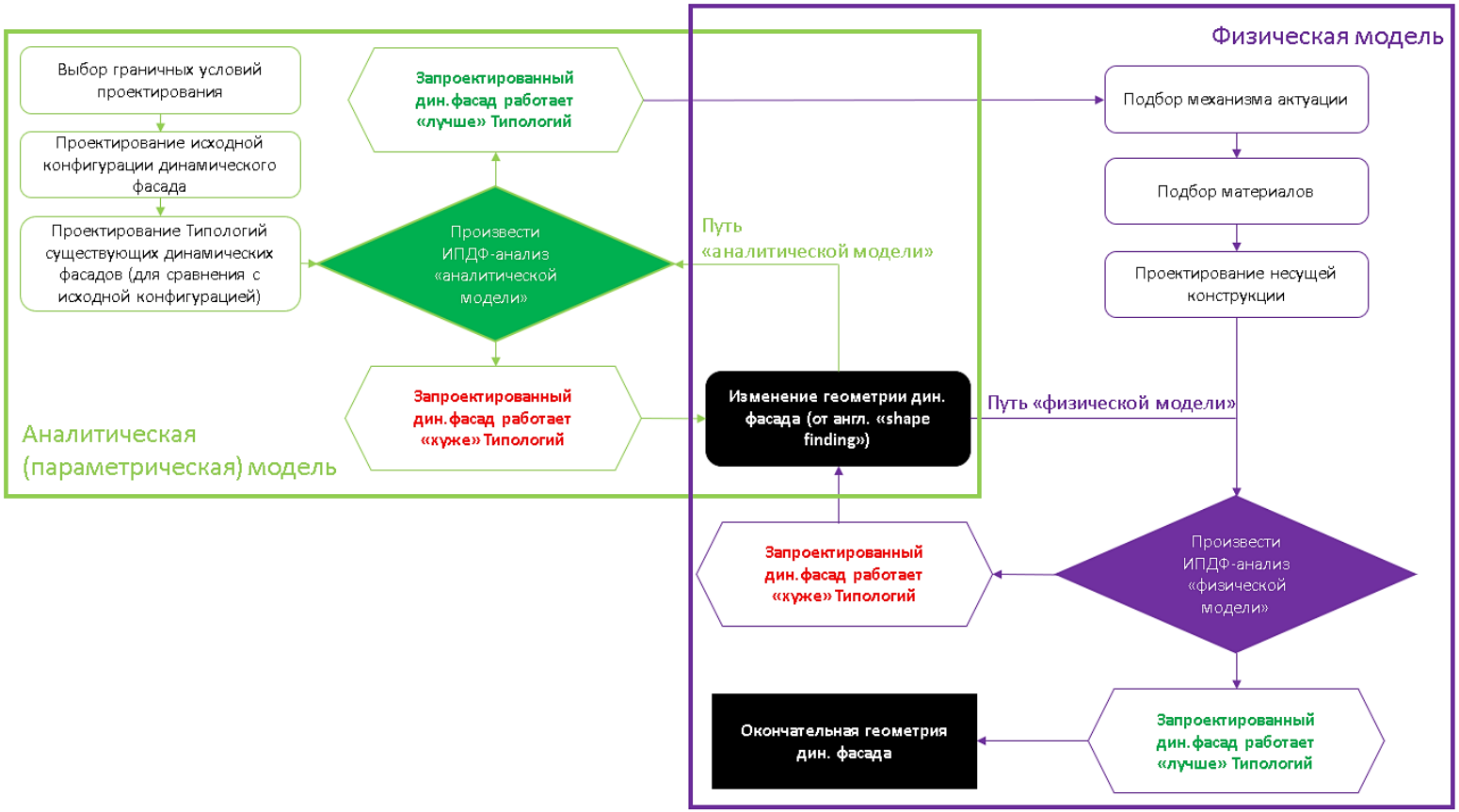



***Рисунок 1.1.*** *Блок-схема работы ИПДФ(FDPI)-методики, определение ИПДФ(FDPI)-методики (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

В данной статье представлен переход от аналитической модели ограждающей конструкции с динамическим фасадом с учетом природно-климатических условий района строительства с использованием ИПДФ-методики к её физической модели, описана интеграция динамического фасада в ограждающую конструкцию здания. Авторами предложены критерии перехода от аналитической модели динамического фасада к физической модели. Произведен расчет ветровых нагрузок, воздействующих на физическую модель динамического фасада, подобраны материалы динамического фасада. Представлены визуализации спроектированного динамического фасада с использованием ИПДФ-методики.

### *Критерии перехода от аналитической модели ограждающей конструкции с динамическим фасадом к физической модели*

Для обеспечения возможности перехода от аналитической модели ограждающей конструкции с динамическим фасадом к её физической модели были разработаны и предложены следующие критерии:

1. Динамический фасад, интегрированный в ограждающую конструкцию, объединяет механические свойства рассматриваемых динамических фасадов (физически реализованных, обсуждаемых в Разделе 2.3) и/или его типология основана на существующем механизме.
2. Динамический фасад может интегрироваться в единую систему ограждающей конструкции с включением дополнительной несущей конструкции, которая не будет резко вмешиваться в структуру ограждающей конструкции.
3. Динамический фасад, интегрированный в ограждающую конструкцию, спроектирован с использованием имеющихся на рынке материалов, прочность и механические свойства которых изучены.
4. Приводной механизм динамического фасада прост в использовании и размещен на конструктивной части ограждающей конструкции.

### *Аэродинамическое моделирование и ветровые нагрузки*

С целью реализации физической модели динамического фасада требуется обеспечить определение оптимальных геометрических размеров составляющих частей динамического фасада здания, а также определение и подбор материалов для обеспечения прочностных характеристик динамического фасада при воздействии нагрузок в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».[1]

Достижение цели производится с использованием современного ПО КМ, удовлетворяющего требованиям Национальных стандартов РФ.[2]

---

[1] Свод правил СП 20.13330.2016 "Нагрузки и воздействия". Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. Москва: Стандартинформ, 2016.

[2] ГОСТ Р 57700.4-2017 "Численное моделирование физических процессов. Термины и определения в областях механики сплошных сред: гидромеханика, газовая динамика". Москва: Стандартинформ, 2018. 32 с.

ГОСТ Р 57700.10-2018 "Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области". Москва: Стандартинформ, 2018. 16 с.

ГОСТ Р 57700.14-2018 "Численное моделирование физических процессов. Верификация получаемых сеточными методами численных решений задач механики сплошной среды". Москва: Стандартинформ, 2018. 12 с.

Авторами выполнено численное моделирование здания с динамическим фасадом, состоящее из аэродинамического моделирования внешнего обтекания здания ветром [17] и анализа собственных форм и частот колебаний конструкции и расчета гармонического воздействия колебаний на конструкцию (механического моделирования) [18–20].

Программный комплекс Fluent использует для решения метод конечных объёмов.[3] Решение газодинамических задач в используемой программе состоит из следующих этапов [17]:

- построение расчётной модели;
- разбиение модели на конечные объёмы;
- определение границ модели (входных/выходных зон, стенок);
- задание граничных условий;
- расчёт;
- постобработка результатов расчёта.

Расчёты ветровых потоков и воздействий сводятся в общем случае к численному решению системы трёхмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики. В практических задачах определения ветровых нагрузок и воздействия на здания и сооружения с практически обоснованным упрощением ветровые потоки принимаются несжимаемыми (плотность является постоянной), изотермическими (температура постоянна) [21; 22].

Для решения практических задач используется специализированные подходы, например, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) [23]. Данный подход основан на разложении скорости на осреднённую во времени и пульсационную составляющие. В результате соответствующих преобразований уравнений Навье-Стокса появляются дополнительные соотношения (т. е. модели турбулентности).

Одной из оптимальных по совокупности качеств моделей турбулентности является модель Ментера (SST модель).[1]

## Граничные условия

Г. Сочи — представитель климата на территории РФ с высоким уровнем солнечной радиации в течение всего года. Выбор III ветрового района в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» в качестве типового для расчета ветровых нагрузок на динамический фасада обусловлен несколькими ключевыми факторами: этот район охватывает значительную часть территории РФ, включая города с высоким уровнем солнечной радиации в течение года, такие как, Сочи, Ялта, Астрахань и другие южные регионы. Именно в этих областях наблюдается наибольшая потребность в динамических фасадах, способных адаптироваться к изменяющимся погодным условиям и эффективно регулировать теплопоступления. Г. Сочи, расположенный в III ветровом районе[1], является репрезентативным примером, т. к. сочетает в себе высокую ветровую нагрузку равно как интенсивную инсоляцию. Это делает его оптимальным типовым случаем для расчетов, поскольку динамические фасады в таких условиях должны обеспечивать не только устойчивость к ветру, но и эффективное управление солнечной энергией.

[3] Методическое пособие. Математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок и воздействий. Москва: ФАУ "Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве", 2020. 65 с.



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

В качестве характеристик набегающего потока (граничные условия на «входе» (INLET)) для подхода RANS используются профили расчётной скорости ветра и характеристик турбулентности (кинетическая энергия турбулентности и скорость диссипации энергии), соответствующие расчётным значениям нагрузок заданного ветрового района и типа местности.[2]

Профиль расчётной скорости ветра $v(z_e)$ рассчитывается по формуле (1.1)[1].

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2\gamma_f w_0 k(z_e)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}4 \cdot 380 \cdot 1{,}25}{1{,}25}} = 32{,}62 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (1.1)$$

где:

$\gamma_f$ — коэффициент надёжности по нагрузке (равный 1,4)[2];

$w_0$ — нормативное значение ветрового давления, которое принимается в зависимости от ветрового района (равное 380 Па)[2];

$k(z_e)$ — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты $z_e$[2] для местности типа А и высоты здания 20 м $k(z_e) = 1{,}25$);

$\rho$ — плотность воздуха (равная 1,25 кг/м$^3$).

На «выходе» (OUTLET) используются «мягкие» граничные условия по Нейману (равенство нулю производных) с нулевыми дополнительными давлениями и аналогичными параметрами турбулентности, как и на «входе» [24].

На нижней границе расчётной области (на земле) и на всех поверхностях зданий и сооружений используется граничное условие «стенки с прилипанием» [22] (все компоненты скорости на таких стенках равны нулю), исключающее проникновение вещества через поверхность.

Описание расчётной модели. На рисунке 1.2 представлена общая геометрическая модель здания с динамическим фасадом. Расстояние между листами динамического фасада и стеной здания составляет 200 мм.

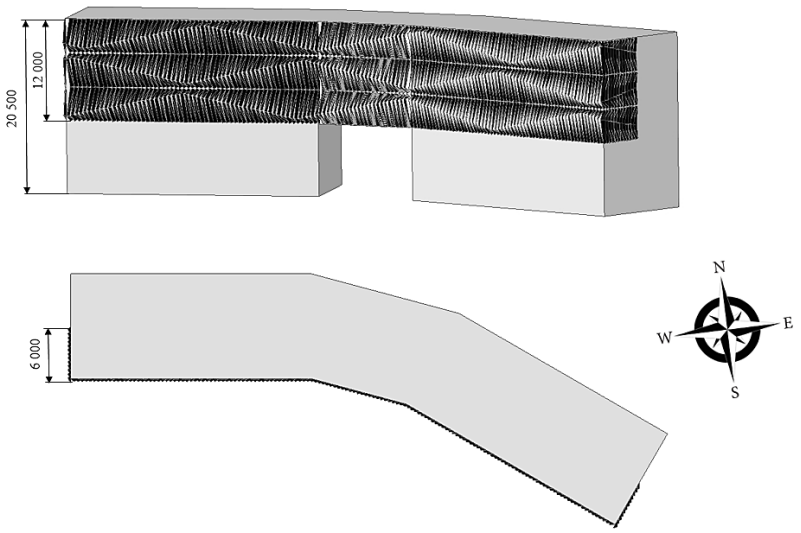



***Рисунок 1.2.*** *Общий вид геометрической модели (составлено автором)*

Расчётная модель состоит из 4,5 миллионов полиэдрических ячеек. Расстояния от границ объекта до границ воздушного домена составляют 5H (до боковых, передней и верхней границ) и 10H (до задней границы домена).[3]

Для выбора оптимальной с точки зрения используемых ресурсов и качества разрешения задачи расчётной области, выполнен модельный расчёт ветрового воздействия на здание (без динамического фасада). Данный расчёт проведён с целью определения области с максимальным градиентом давления от ветрового воздействия (самым наибольшим перепадом давления). Искомая область будет являться самым опасным участком с точки зрения действия нагрузок на фасад (присутствие как областей давления, так и областей разрежения в максимальных значениях).

На рисунке 1.3 представлено поле давлений в модельной задаче с выделенной чёрной рамкой областью максимального градиента давления.

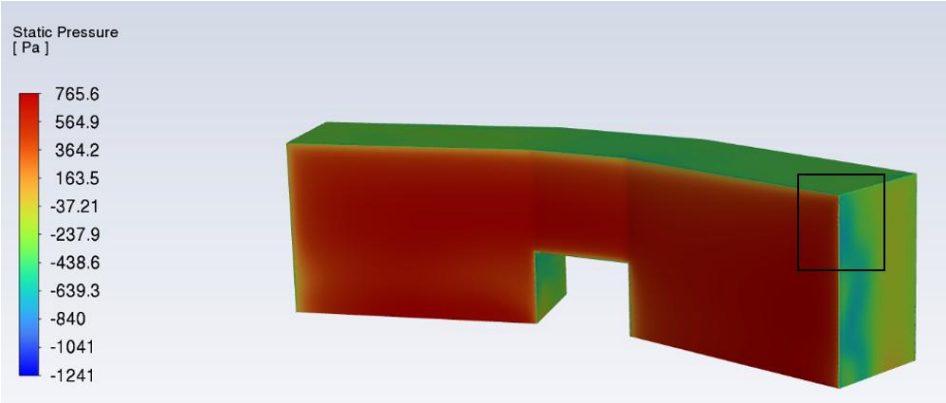



***Рисунок 1.3.*** *Поле давления на здание при ветровом воздействии, Па (составлено автором)*

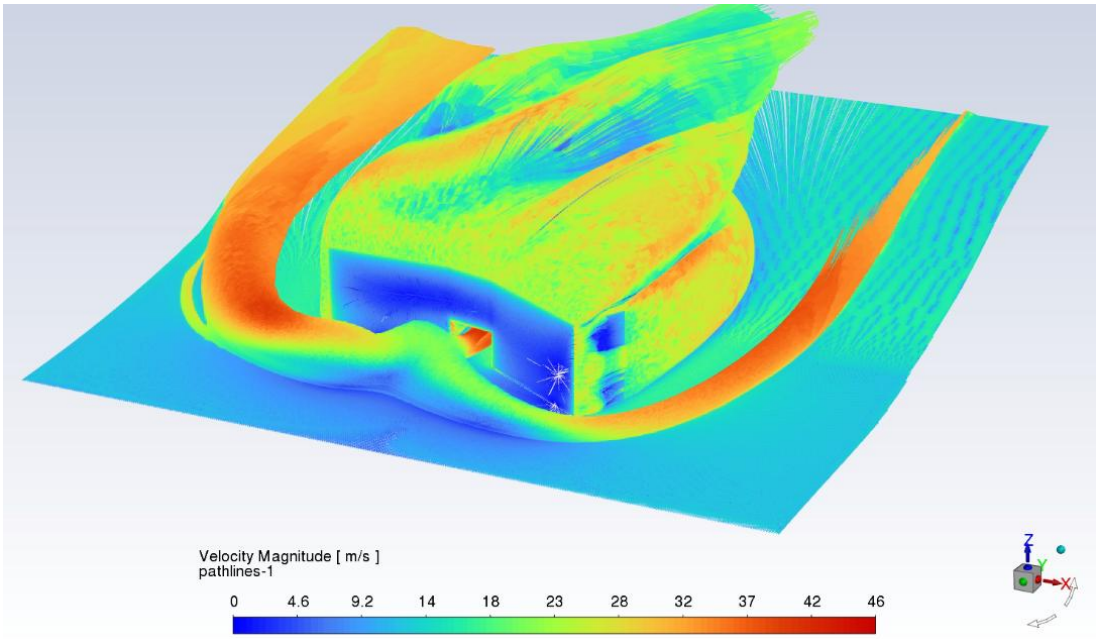



***Рисунок 1.4.*** *Распределение скоростей ветра в виде линий тока, м/с (составлено автором)*

Таким образом, в качестве расчётной области рассматривается частичная геометрия фасада, расположенная в области высокого градиента давления, в связи с ограничением вычислительных ресурсов. Данная часть фасада выбрана вследствие того, что в данной области при обтекании происходит срыв потоков воздуха (рисунок 1.4) и, как следствие, наибольший градиент давления на поверхности [17].

Подход к моделированию и исходные данные. Аэродинамическое моделирование проведено для двух расчётных случаев, представляющих собой обтекание здания при



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

различных направлениях ветра: южного и юго-западного — в данном исследовании представлены результаты только при южном направлении ветра.

Данные направления ветрового воздействия приняты, исходя из максимального значения давления, приходящегося на место установки конструкции динамического фасада. В таблице 1.1 представлены максимальные и минимальные значения давлений на здание для соответствующих направлений.

**Таблица 1.1**

**Максимальные и минимальные значения давлений на здание**

| Направление ветра | Максимальное давление, Па | Минимальное давление, Па | Расположение максимального значения |
|---|---|---|---|
| Юг | 1 231 | -1 338 | В зоне расположения динамического фасада |
| Юго-запад | 1 043 | -1 202 | В зоне расположения динамического фасада |

В качестве граничных условий использованы скорость ветра на входных границах (равная 32,62 м/с) и нулевое статическое давление (равное атмосферному) на выходных границах (границы области расчёта за исключением области входа).

Обработка результатов, процесс моделирования ветрового воздействия. Значение основной ветровой нагрузки складывается из средней и пульсационной составляющих.[1] Результатом моделирования обтекания потоком воздуха в стационарной постановке являются поля давления на поверхностях здания, представляющих собой среднюю составляющую ветровой нагрузки.

Нормативное значение основной ветровой нагрузки $w$ следует определять как сумму средней $w_m$ и пульсационной $w_p$ составляющих по формуле (1.2)[1]:

$$w = w_m + w_p. \quad (1.2)$$

Нормативное значение средней составляющей основной ветровой нагрузки $w_m$ получено в виде поля давления в результате решения задачи аэродинамики обдува конструкции с заданным направления ветра, выполненного с использованием программного комплекса Ansys Fluent.

В соответствии с методическими рекомендациями для проведения численных расчётов ветрового воздействия[3] ввиду высокой ресурсоёмкости вариантных нестационарных расчётов и для минимизации их объёма может применяться инженерная методика оценки максимальных и минимальных значений ветрового давления по результатам стационарных расчётов с учётом энергии турбулентных пульсаций (также называемая средней кинетической энергией турбулентности) и осреднённых коэффициентов обеспеченности.

Основные расчётные соотношения методики, основанные на гипотезе об изотропности турбулентности и статистических зависимостях [24] (1.3–1.7):

$$I = \sqrt{\frac{3 \cdot \rho \cdot k}{|w_m|}} \quad (1.3)$$

$$\sigma_p = (I^2 + 2I) \cdot |w_m| \quad (1.4)$$

$$P_{max} = w_m + \sigma_p \cdot \theta_{max} \quad (1.5)$$

$$P_{min} = w_m - \sigma_p \cdot \theta_{min} \quad (1.6)$$

$$w_p = (P_{max} - P_{min}) \cdot 0.5 \cdot v \quad (1.7)$$



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

где:

$\sigma_p$ — среднеквадратичное отклонение давлений;

$I$ — интенсивность турбулентности;

$v$ — коэффициент корреляции давлений на поверхностях (для консервативности принимается максимальным, т. е. равным 1)[1];

$\theta_{max}$ и $\theta_{min}$ — коэффициенты обеспеченности, которые допускается принимать равными 3 и 6, соответственно.

Пульсационная составляющая вычисляется в соответствии с формулой (1.7). Соответственно, нормативное расчётное значение ветровой нагрузки вычисляется по формуле (1.2).

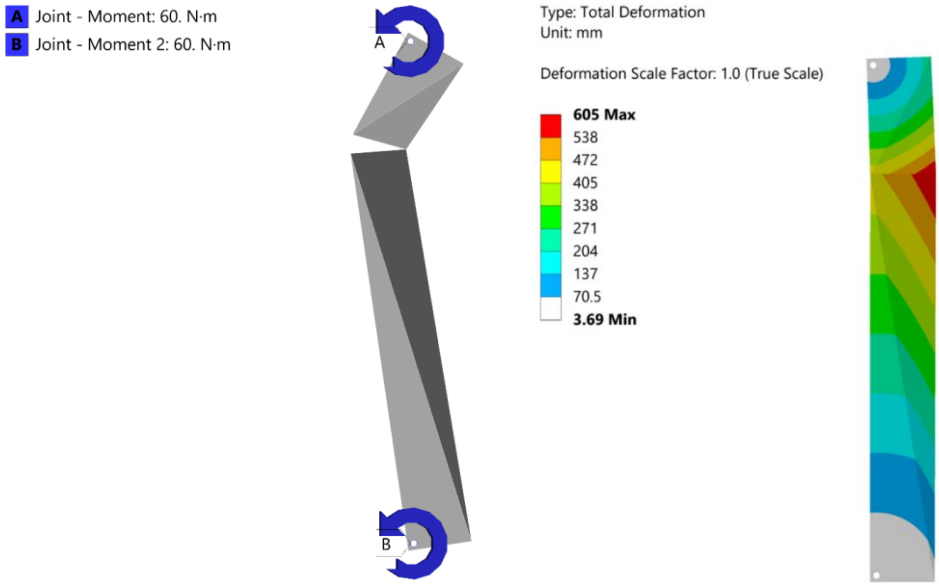
### *Механическое моделирование*

*Поворотный шарнир*

Сечение поворотного шарнира определяется следующим образом:

- моментом на валу, необходимым для поворота затеняющего элемента из одного положения (степень раскрытия 50 %, равный углу раскрытия 40°) в другое (степень раскрытия 0 %, угол раскрытия 0°);
- прочностными характеристиками шарнира при его расчёте на кручение;
- прочностными характеристика шарнира на срез (от воздействия собственного веса части динамического фасада, приходящегося на шарнир).

Момент, необходимый для поворота затеняющего элемента, определён посредством итеративного определения необходимой величины крутящего момента для смыкания поверхностей динамического фасада (то есть перехода из состояния с максимальным углом открытия до состояния с минимальным углом) путём численного моделирования и составляет 60 Н·м (рис. 1.5).




а б

***Рисунок 1.5.*** *Определение момента, необходимого для поворота затеняющего элемента: а — нагрузки и граничные условия (Н*м); б — распределение полных деформаций (мм) в положении 0° (степень раскрытия динамического фасада 0 %) (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Поворотный шарнир должен удовлетворять условиям прочности при кручении [24]:

$$\tau = \frac{M}{W_p} \leq [\tau], \quad (1.8)$$

где:

$\tau$ — касательные напряжения, МПа;

$M$ — момент на валу, Н·м;

$W_p$ — полярный момент сопротивления, м$^3$;

$[\tau]$ — допускаемое касательное напряжение, для пластичных материалов принимается равным $0{,}5 \cdot \sigma_т$, МПа.

Откуда диаметр шарнира $d$ должен составлять:

$$\frac{M}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} \leq [\tau],$$
$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M}{\pi \cdot [\tau]}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M}{\pi \cdot 0{,}5 \cdot \sigma_т}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 60}{\pi \cdot 0{,}5 \cdot 225 \cdot 10^6}} = 13{,}95 \text{ мм}. \quad (1.9)$$

Условие прочности шарнира при срезе:

$$\tau = \frac{Q}{A} \leq [\tau], \quad (1.10)$$

где:

$\tau$ — касательные напряжения, МПа;

$Q$ — перерезывающее усилие (в данном случае — собственный вес; значение веса, принято максимально возможным, т. е. равным весу одного элемента динамического фасада — 75 кг), Н;

$A$ — площадь сечения, м$^2$;

$[\tau]$ — допускаемое касательное напряжение, для пластичных материалов принимается равным $0{,}5 \cdot \sigma_т$, МПа.

Откуда диаметр шарнира $d$ должен составлять:

$$\frac{Q}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \leq [\tau],$$
$$d \geq \sqrt{\frac{4 \cdot m \cdot g}{\pi \cdot 0{,}5 \cdot \sigma_т}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 75 \cdot 9{,}81}{\pi \cdot 0{,}5 \cdot 225}} = 2{,}89 \text{ мм}. \quad (1.11)$$

Кроме того, условие жёсткости требует [25]:

$$\theta = \frac{M}{G \cdot I_p} \leq [\theta], \quad (1.12)$$

где:



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

θ — относительный угол закручивания, рад/м;

$G$ — модуль сдвига, МПа;

$I_p$ — полярный момент инерции, м$^4$;

[θ] — допускаемый относительный угол закручивания, принимается стандартным для машиностроения 0,5° на 1 м длины вала, рад/м.

Откуда диаметр шарнира $d$ должен составлять:

$$\frac{M}{G \cdot \frac{\pi \cdot d^4}{32}} \leq [\theta]$$

$$d \geq \sqrt[4]{\frac{32 \cdot M}{\pi \cdot G \cdot [\theta]}} = \sqrt[4]{\frac{32 \cdot 60}{\pi \cdot 26{,}7 \cdot 10^9 \cdot \frac{0{,}5 \cdot \pi}{180}}} = 40{,}24 \text{ мм.} \quad (1.13)$$

Таким образом, принимается больший из полученных диаметров — 40,24 мм. При этом ближайший к нему стандартный диаметр — 45 мм. [4] Следовательно, диаметр сечения поворотного шарнира назначается равным 45 мм.

*Швеллер*

Швеллер необходим для крепления затеняющих элементов между вертикальными импостами. При этом соединение швеллера с вертикальными импостами осуществляется с помощью двух болтов d30.

Минимальное расстояние от центра болта до края элемента должно составлять — $2{,}5d_{болт}$, т. е. для болтов $d30$ — 75 мм. Расстояние между центрами болтов также нормируется — минимальное расстояние должно составлять $3{,}5d_{болт}$, т. е. для болтов d30 — 105 мм.[5]

Таким образом, минимальная высота стенки швеллера В должна составлять не менее 255 мм.

Из сортамента[6] за первый, подлежащий расчёту на прочность, профиль принимается профиль с наименьшей металлоёмкостью — 440485.

*Подбор материалов*

Вследствие особенностей климатической зоны, в которой расположено здание, рекомендуется использовать для листов динамического заграждения, алюминиево-марганцевые сплавы (например, АМц или АМг2).[7] Ввиду того, что сплав АМг2 поставляется в виде листов, для листов динамического фасада принимается сплав АМг2.

[4] ГОСТ 21488-97 Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия, Минск: ИПК Издательство стандартов, 2001.

[5] СП 128.13330.201.

[6] ГОСТ 13623-90. Профили прессованные прямоугольного равнополочного швеллерного сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент, Москва, 1990, р. 12.

Алюминиевые конструкции, Москва: Минстрой России, 2016.

[7] Рекомендации по применению алюминиевых сплавов в зонах с агрессивными средами. Москва: Издательство литературы по строительству, 1969. 18 с.

Для несущих элементов кровельных и стеновых панелей, которыми являются несущие алюминиевые профили конструкции фасада, следует использовать сплавы АД31 или АВ[4]. Алюминиевый сплав АВ поставляется в виде профиля, соответственно, принимается для дальнейших расчётов.

Граничные условия и нагрузки. Коэффициент надёжности по нагрузке от собственного веса, согласно [таблица 7.1, 18], равняется 1,05 для металлических конструкций. Коэффициент надёжности по ветровой нагрузке принимается в соответствии с [раздел 11, 18] и равен 1,4. Данный коэффициент учтён при формировании профиля скорости ветра.

Определение ветровых нагрузок на конструкцию динамического фасада произведено согласно [18]. Распределение давления (основной ветровой нагрузки, то есть суммы нормативной и пульсационной составляющих) на исследуемой поверхности конструкции с наветренной и подветренной стороны (южное направление ветра) показаны на рисунках 1.6 и 1.7.

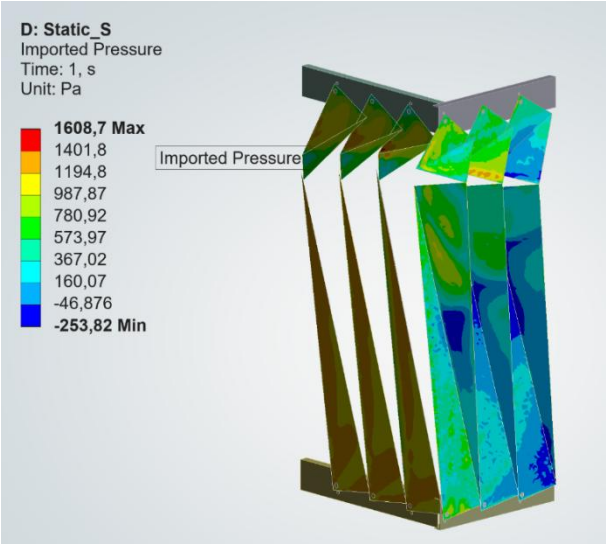



***Рисунок 1.6.*** *Распределение давления на исследуемой поверхности конструкции с наветренной стороны (южное направление ветра), Па (составлено автором)*

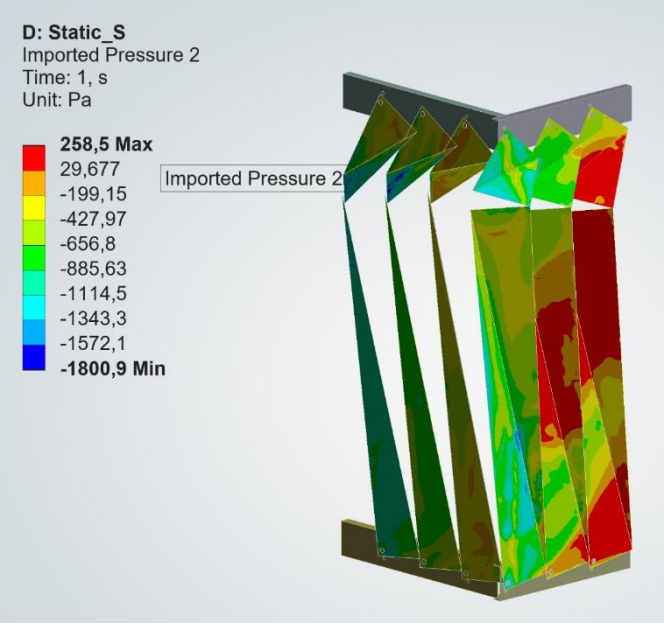



***Рисунок 1.7.*** *Распределение давления на исследуемой поверхности конструкции с подветренной стороны (южное направление ветра), Па (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

***Оценка прочности с учетом динамических эффектов***

Подход к оценке напряженно-деформированного состояния. В рамках моделирования воздействия ветровой нагрузки на динамический фасад, составляющие ветровой нагрузки учитываются с использованием разных расчётных модулей. Так, среднее ветровое давление имеет постоянный (статический) характер, расчёт напряжённо-деформированного состояния фасада под постоянными статическими нагрузками производится с использованием модуля Static Structural.

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки имеет динамический характер воздействия на фасад — расчёт проводится с использованием модуля Harmonic Response. Данный подход выбран вследствие необходимости учёта динамического отклика конструкции на частоты и амплитуду срыва вихрей (пульсационная составляющая).

В гармоническом расчёте в качестве амплитуды используются значения пульсационной составляющей, вычисляемой по формуле 1.7 и представленной для соответствующих направлений воздействия ветровой нагрузки.

В качестве частоты воздействия необходимо выбирать максимально опасную, с точки зрения эффектов резонанса, частоту, такой частотой является собственная частота конструкции. Для вычисления частоты гармонического воздействия, проводится анализ собственных частот и колебаний расчётной модели для определения самой опасной, с точки зрения вовлечённой (эффективной) модальной массы, собственной частоты колебаний.

Для определения полного напряжённо-деформированного состояния конструкции от воздействия полной ветровой нагрузки проводится комбинация результатов статического и гармонического расчётов для получения итогового результата.

Анализ динамики конструкции фасада. В результате анализа собственных частот и колебаний получена собственная частота с максимальной вовлечённой (эффективной) массой по направлению воздействия ветра (южное направление), равная 9,68 Гц. На рисунке 1.8 представлена информация по эффективным массам системы, возбуждаемым по направлению действия ветра. На рисунке 1.9 представлена собственная форма конструкции, соответствующая частоте 9,68 Гц.

**Ratio of Effective Mass to Total Mass**

| Mode | Frequency [Hz] | X Direction | Y Direction | Z Direction | Rotation X | Rotation Y | Rotation Z |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6.2205 | 2.7615e-002 | 6.4018e-002 | 3.2112e-007 | 4.6977e-002 | 8.5462e-003 | 6.5622e-002 |
| 2 | 6.2303 | 2.5121e-002 | 7.7979e-002 | 6.8116e-007 | 6.087e-002 | 7.6736e-003 | 6.1104e-002 |
| 3 | 6.2435 | 8.1175e-002 | 3.9151e-002 | 1.227e-007 | 3.0656e-002 | 2.327e-002 | 5.4936e-002 |
| 4 | 6.2853 | 4.782e-002 | 3.2862e-002 | 2.9099e-007 | 2.5462e-002 | 1.2837e-002 | 2.6359e-002 |
| 5 | 6.3422 | 3.446e-002 | 5.999e-002 | 1.1002e-006 | 4.1781e-002 | 1.0694e-002 | 8.125e-002 |
| 6 | 6.3699 | 4.7097e-002 | 4.4295e-002 | 3.3508e-008 | 3.421e-002 | 1.2111e-002 | 1.9634e-002 |
| 7 | 9.0507 | 2.9056e-002 | 4.7524e-002 | 2.007e-005 | 3.7701e-002 | 9.5187e-003 | 1.4033e-002 |
| 8 | 9.1188 | 3.1091e-002 | 7.9216e-002 | 2.3591e-005 | 5.9791e-002 | 1.1734e-002 | 3.3659e-002 |
| 9 | 9.3566 | 6.127e-002 | 2.187e-002 | 2.3183e-005 | 2.249e-002 | 1.7117e-002 | 3.6762e-002 |
| 10 | 9.4505 | 9.1649e-002 | 1.9679e-002 | 1.5931e-005 | 2.5424e-002 | 2.4532e-002 | 4.5407e-002 |
| 11 | 9.6818 | 1.6948e-002 | 8.4849e-002 | 1.8131e-005 | 6.0311e-002 | 8.0282e-003 | 5.3767e-002 |
| 12 | 10.496 | 9.0131e-002 | 7.0597e-003 | 8.4704e-006 | 1.5281e-002 | 2.1216e-002 | 3.2183e-002 |
| 13 | 12.811 | 1.0525e-003 | 1.6192e-002 | 1.9195e-005 | 5.9308e-003 | 9.2503e-004 | 2.6008e-002 |
| 14 | 12.91 | 1.271e-002 | 3.4485e-003 | 1.1881e-005 | 9.0574e-004 | 1.2569e-003 | 6.9646e-003 |
| 15 | 13.263 | 1.7978e-002 | 1.1865e-003 | 1.6403e-005 | 3.1836e-003 | 2.2152e-003 | 7.2865e-003 |
| 16 | 13.426 | 3.852e-003 | 1.4575e-002 | 1.1969e-005 | 4.2965e-003 | 2.8059e-004 | 2.7919e-002 |
| 17 | 13.595 | 1.2599e-002 | 6.2645e-003 | 7.291e-006 | 2.759e-004 | 1.1626e-003 | 6.5357e-003 |
| 18 | 13.786 | 4.8679e-004 | 2.1256e-002 | 2.9687e-005 | 1.1383e-002 | 3.1596e-003 | 3.3955e-002 |
| 19 | 23.549 | 4.7747e-006 | 2.6109e-004 | 2.6274e-005 | 5.4768e-003 | 4.5528e-003 | 2.9537e-004 |
| 20 | 23.569 | 1.7724e-003 | 5.6174e-005 | 1.7017e-005 | 1.5195e-002 | 4.6227e-003 | 1.2477e-004 |
| Sum | | 0.63389 | 0.64173 | 2.5164e-004 | 0.5076 | 0.18545 | 0.63381 |

***Рисунок 1.8.*** *Зависимость величин эффективных масс системы, возбуждаемых по направлению действия ветра (южное направление) от собственной частоты конструкции (ось Y совпадает с направлением ветра) (составлено автором)*


Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

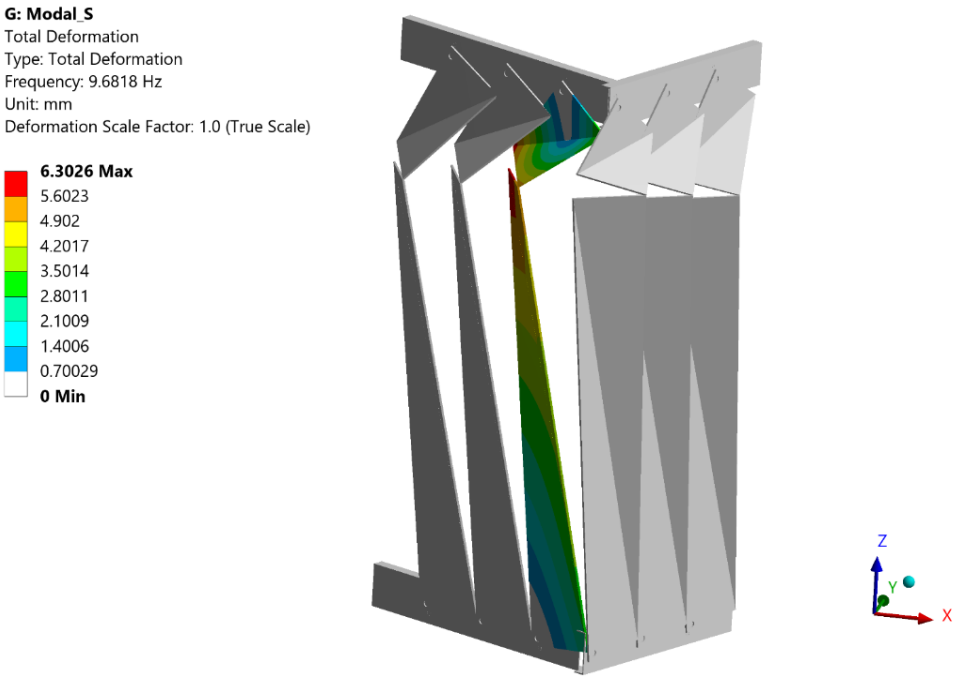



***Рисунок 1.9.*** *Собственная форма конструкции, соответствующая частоте 9,68 Гц (составлено автором)*

Распределение давления (средней составляющей основной ветровой нагрузки $w_m$) на исследуемой поверхности конструкции с наветренной и подветренной стороны (южное направление ветра) показаны на рисунках 1.10, 1.11. Давление, действующее с подветренной стороны приложено к оболочечной конструкции с учётом обратного знака.

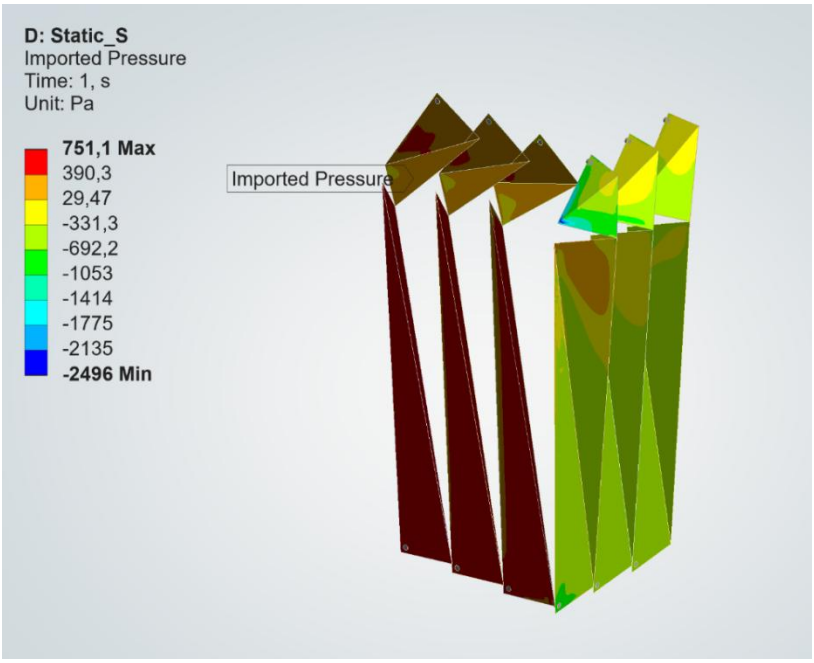



***Рисунок 1.10.*** *Распределение давления (средней составляющей основной ветровой нагрузки $w_m$) с наветренной стороны, Па (составлено автором)*

Распределение давления (пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки $w_p$) на исследуемой поверхности конструкции с наветренной и подветренной стороны (южное направление ветра) показаны на рисунках 1.12, 1.13.

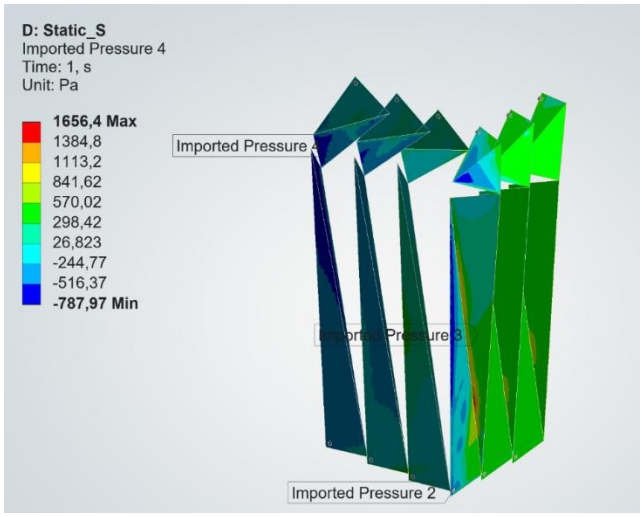



***Рисунок 1.11.*** *Распределение давления (средней составляющей основной ветровой нагрузки $w_m$) с подветренной стороны, Па (составлено автором)*

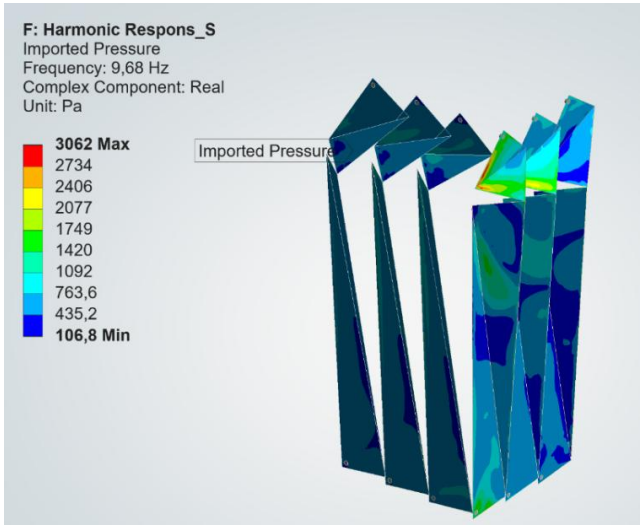



***Рисунок 1.12.*** *Распределение давления (пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки $w_p$) с наветренной стороны, Па (составлено автором)*

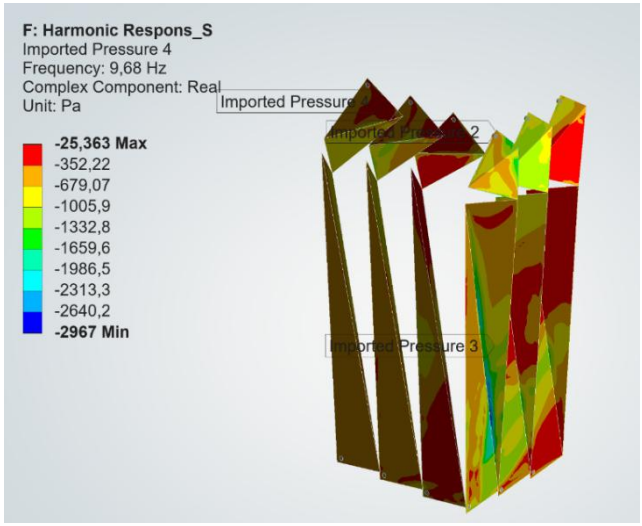



***Рисунок 1.13.*** *Распределение давления (пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки $w_p$) с подветренной стороны, Па (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

## 2. Результаты и обсуждение

### *Конструкция фасада в соответствии с критериями проектирования динамического фасада*

Проектирование с учетом критерия 1 описано в [2; 4] — проект динамического фасада должен удовлетворять критерию осуществимости его строительства. По этой причине исходный динамический фасад, представленный в данной работе, объединяет технические характеристики существующих динамических фасадов: свойства движения (плоскостное и внеплоскостное перемещение и вращение), геометрическая форма, использование доступных материалов с известными свойствами.

Концепция «складная конструкция» с типами движений «поворот» и «складывание» (два типа движения, которые наиболее широко используются в практике высотного строительства в последние годы) можно найти в уже существующем инженерном решении, известном как «дверь Клемена Торгглера».

Данное инженерное решение состоит из 4-х (четырех) треугольников, соединенных друг с другом рояльными петлями и вращающимся шарниром в центральном узле. Тип движения основан на плоскостном вращении верхнего и нижнего треугольников и внеплоскостном складывании центральных треугольников, что проиллюстрировано на рисунке 2.1. Комбинация описанных типов движения позволяет управлять механикой движения динамического фасада.

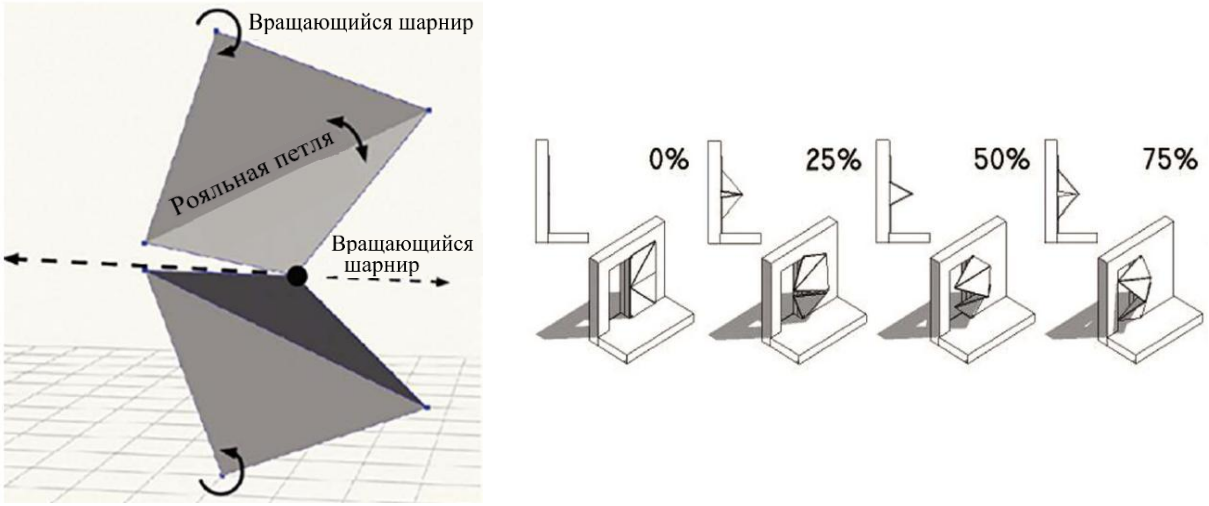



***Рисунок 2.1.*** *Тип движения концепции «дверь Клеме на Торгглера» (составлено автором)*

«Степень открытия» динамического фасада определяется как относительное значение смещения центрального поворотного шарнира по отношению к краю вертикального импоста ограждающей конструкции.

Основываясь на типе движения и геометрии концепции «дверь Клемена Торгглера», были разработаны исходные конфигурации динамического фасада.

Следуя критерию 2:

Динамический фасад спроектирован как простой механизм, внедренный в унифицированную систему ограждающих конструкций с добавлением дополнительной несущей балки.

Нагрузка от динамического фасада передается на систему, формирующую ограждающую конструкцию, состоящую из матрицы ригелей и стоек (системы импостов), расстояние между стойками составляет 1 м. Покомпонентный вид общей конструкции фасада представлен на рисунке 2.2.



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

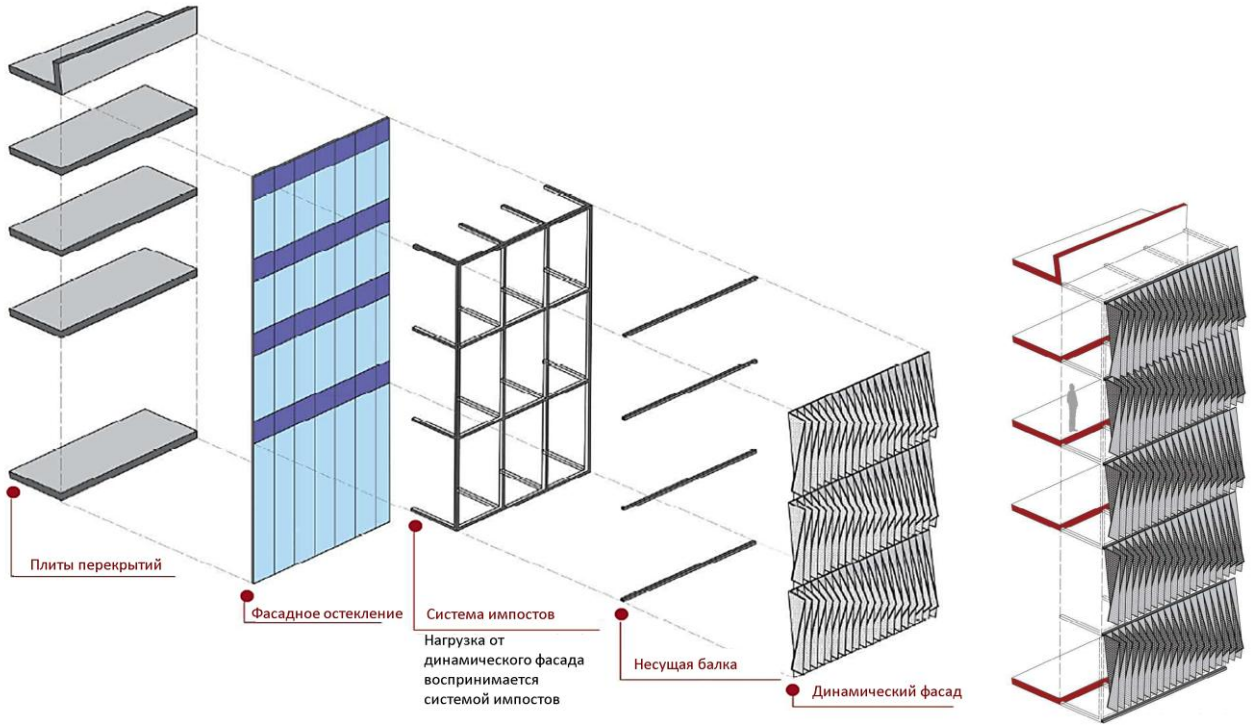



***Рисунок 2.2.*** *Покомпонетный вид общей конструкции фасада (составлено автором)*

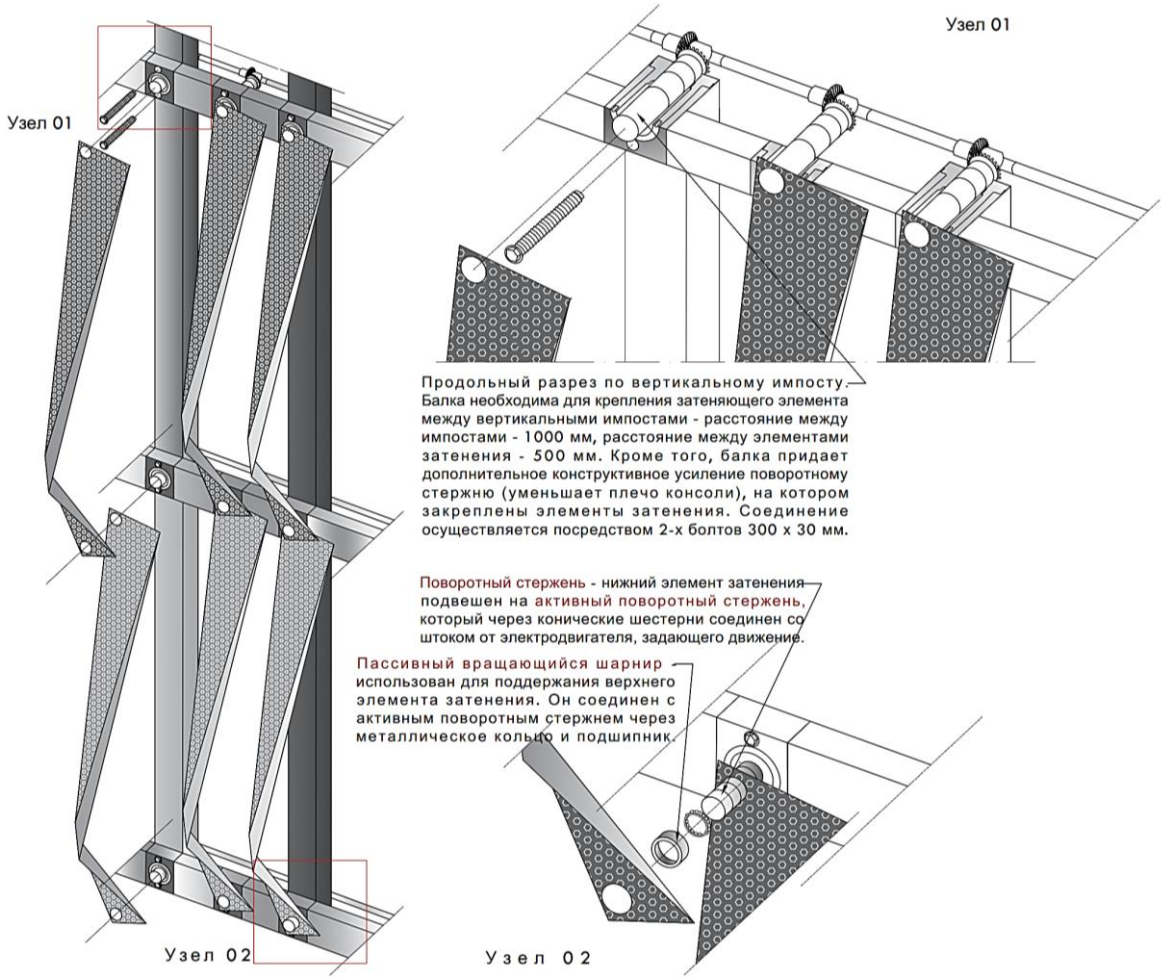



***Рисунок 2.3.*** *Аксонометрический вид конструктивного устройства элемента динамического фасада (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Конструкция динамического фасада соединена с несущей балкой через поворотные стержни (несущие элементы) в верхней и нижней точках затеняющей конструкции, несущая балка швеллерного сечения 440 384 (100×50 мм) соединена с конструктивным элементом фасадной системы (стойкой или «импостом») 4 (четырьмя) болтами каждые 0,5 м. Поворотный стержень вверху элемента динамического фасада называется активным шарниром, так как он соединен с механизмом, придающим вращение системе, и обеспечивает вращательное движение элементам динамического фасада (рис. 2.3).

Поворотный стержень является частью вращательного механизма и одновременно несущим элементом, используемым для подвешивания элемента динамического фасада сверху и поддержки элемента динамического фасада снизу через пассивный вращающийся шарнир.

Для перевода вращательного движения от вращающегося штока (ротора), соединенного напрямую с электродвигателем (расположенного параллельно динамическому фасаду на полке двутавровой балки) на 90 градусов для обеспечения вращения элементов динамического фасада использованы конические шестерни. Конические шестерни — это шестерни, в которых оси двух валов пересекаются, а поверхности зубчатых подшипников самих шестерен имеют коническую форму. Конические шестерни чаще всего монтируются на валах, разнесенных на 90 градусов [26].

Затенение состоит из 4-х (четырех) треугольных элементов: два треугольных элемента сверху и снизу двигаются «в плоскости» (вращаются) ограждающей конструкции, два треугольных элемента в центре элемента динамического фасада, соединенные сферическим шарниром, двигаются «из плоскости» ограждающей конструкции (складываются). Соединение верхнего и нижнего треугольников с треугольниками в центре выполнено с помощью потайной (скрытой) рояльной петли (рис. 2.4).

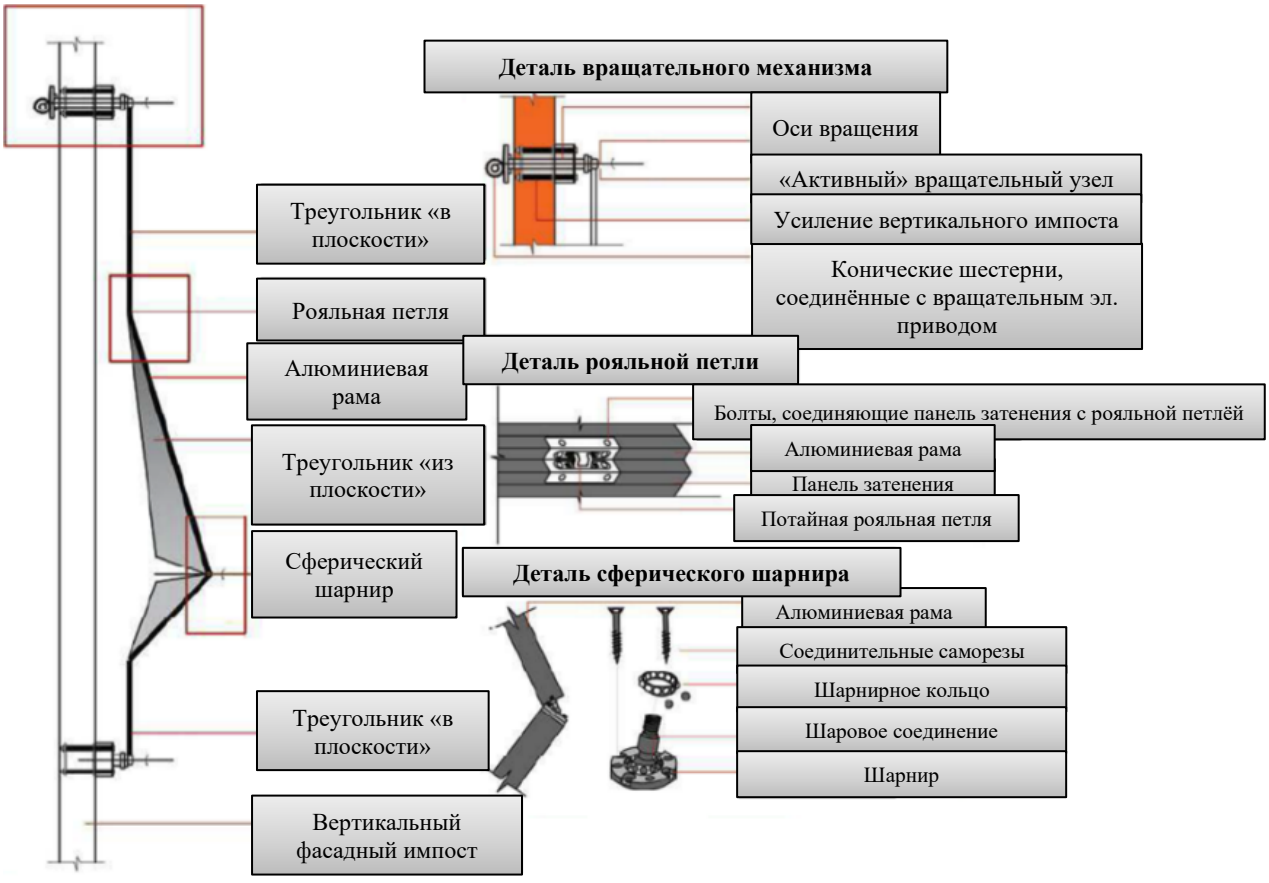



***Рисунок 2.4.*** *Узлы динамического фасада (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Элемент, соединяющий два центральных треугольника, двигающихся «из плоскости» ограждающей конструкции, называется сферическим шарниром. Этот элемент не является конструктивным и необходим только для обеспечения движения центральных треугольников элементов динамического фасада.

Следуя критерию 3:

Каждый треугольник изготовлен из перфорированного тонкого алюминиевого листа толщиной 14 мм (подобран согласно аэродинамическому и механическому расчету). Для придания жесткости элементу выполнено ребро жесткости из алюминиевой рамы 25×25 мм, приваренной ко всем граням каждого треугольника (рис. 2.5).


***Рисунок 2.5.*** *Вид на элемент динамического фасада снаружи и изнутри (составлено автором)*

Следуя критерию 4:

Осуществление движения динамического фасада происходит с помощью электрического роторного двигателя («приводной» или «вращательный» механизм) (рис. 2.6). Двигатель придает вращательное движение штоку (ротору), соединенному с активными шарнирами через конические шестерни, изменяющими плоскость вращательного движения.


***Рисунок 2.6.*** *Расположение роторного двигателя на полке несущей балки фасадной системы (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

При включении двигателя верхние треугольники начинают вращаться, что способствует внеплоскостному движению центральных треугольников.

Поскольку верхние треугольники элементов динамического фасада имеют разные размеры, соответствующие конические шестерни также имеют разные размеры, что позволяет обеспечить одинаковую степень раскрытия всех элементов, соединенных с одним и тем же вращательным ротором [27; 28]. Двигатель контролирует степень открытия системы затенения.

### *Результаты механических расчётов (степень раскрытия фасада — 50 %). Южное направление ветра*

Прочность затеняющего листа оценивается по коэффициенту запаса по пределу текучести. Принята толщина листа АМг2 — 14 мм. В случае снижения коэффициента запаса до значения меньше 1 рассмотрению подлежит лист большей толщины.

Прочность профиля швеллерного сечения также оценивается по коэффициенту запаса по пределу текучести. В случае снижения его до значения меньше 1 рассмотрению подлежит следующий по металлоёмкости швеллер. Исходным к рассмотрению швеллером является профиль 440485.[8]

На рисунке 2.7 представлено распределение полных перемещений в конструкции динамического фасада при воздействии нагрузок.

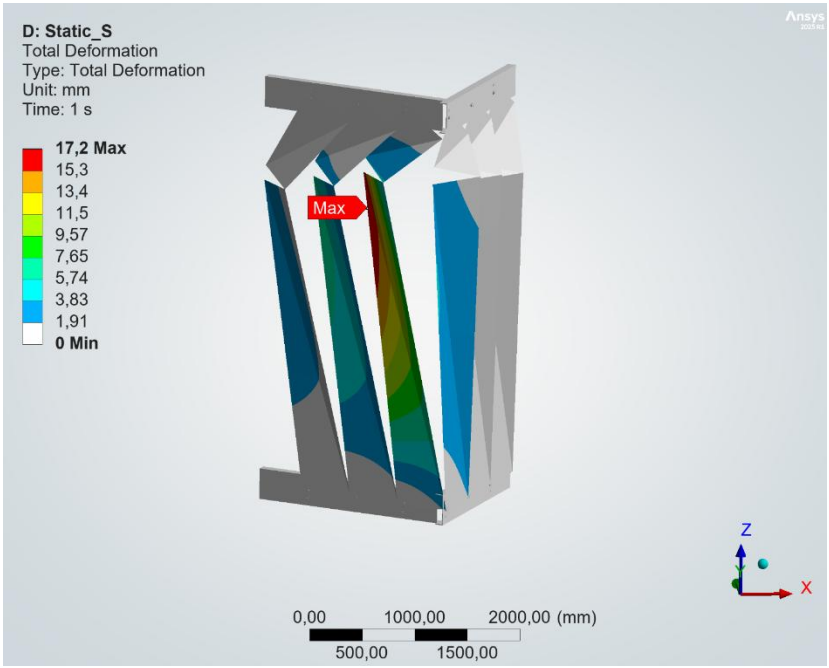



***Рисунок 2.7.*** *Распределение полных перемещений в конструкции динамического фасада при воздействии нагрузки от собственного веса и ветровой нагрузки (южное направление ветра), мм (составлено автором)*

На рисунке 2.8 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции затеняющих листов. Наибольшие напряжения наблюдаются в зоне крепления поворотного шарнира к листу — это область концентрации напряжений. На расстоянии 1–3 конечных элементов от этого участка (в соответствии с принципом Сен-Венана [25])

[8] ГОСТ 13623-90. Профили прессованные прямоугольного равнополочного швеллерного сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент, Москва, 1990, p. 12.



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

напряжения не превышают предела текучести — прочность обеспечена (максимальные напряжения составляют 38 МПа < 100 МПа).

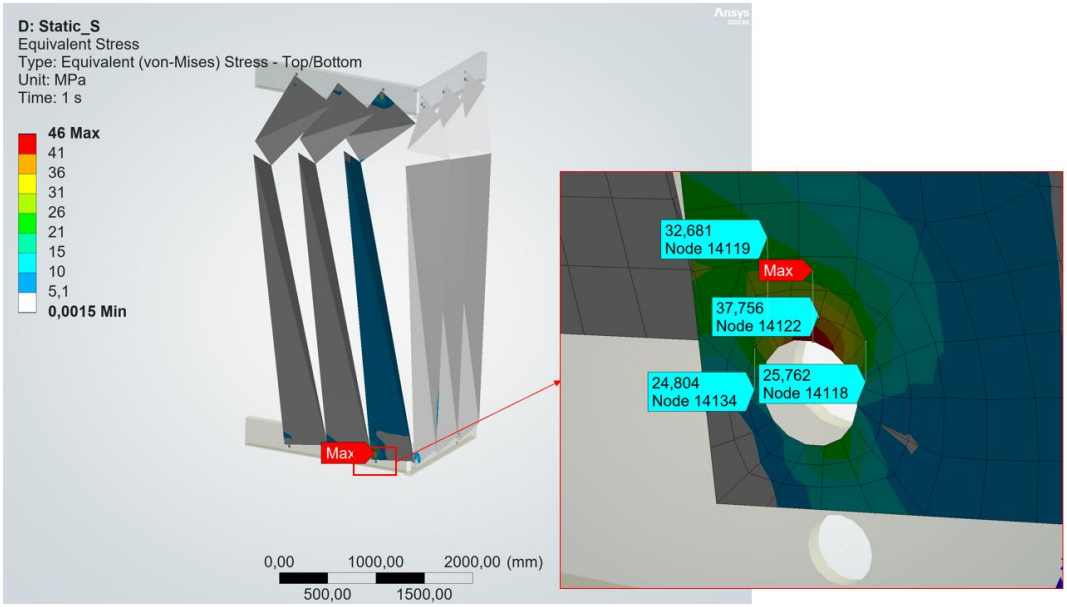



***Рисунок 2.8.*** *Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции затеняющих листов при воздействии нагрузки от собственного веса и ветровой нагрузки (южное направление ветра), МПа (составлено автором)*

На рисунке 2.9 представлено распределение коэффициента запаса по пределу текучести в конструкции затеняющих листов. Коэффициент превышает 1, что свидетельствует о достаточной прочности конструкции.

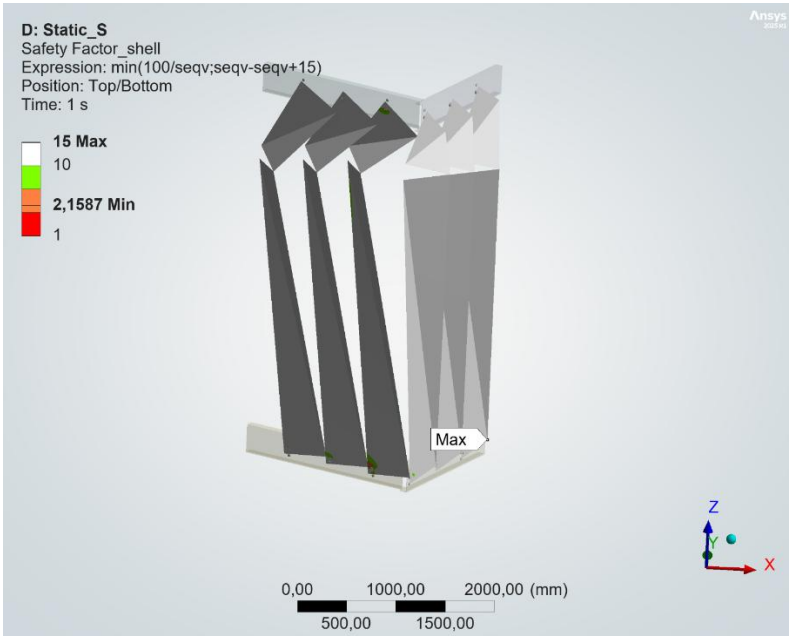



***Рисунок 2.9.*** *Распределение коэффициента запаса по пределу текучести в конструкции затеняющих листов при воздействии нагрузки от собственного веса и ветровой нагрузки (южное направление ветра) (составлено автором)*

Таким образом, расчётным способом подтверждена прочность алюминиевых листов из сплава АМг2 толщиной 14 мм.



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

На рисунке 2.10 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции швеллеров. Наибольшие напряжения наблюдаются в зоне контакта швеллера и поворотного шарнира. Напряжения не превышают предела текучести — прочность обеспечена (максимальные напряжения составляют 69 МПа < 290 МПа).

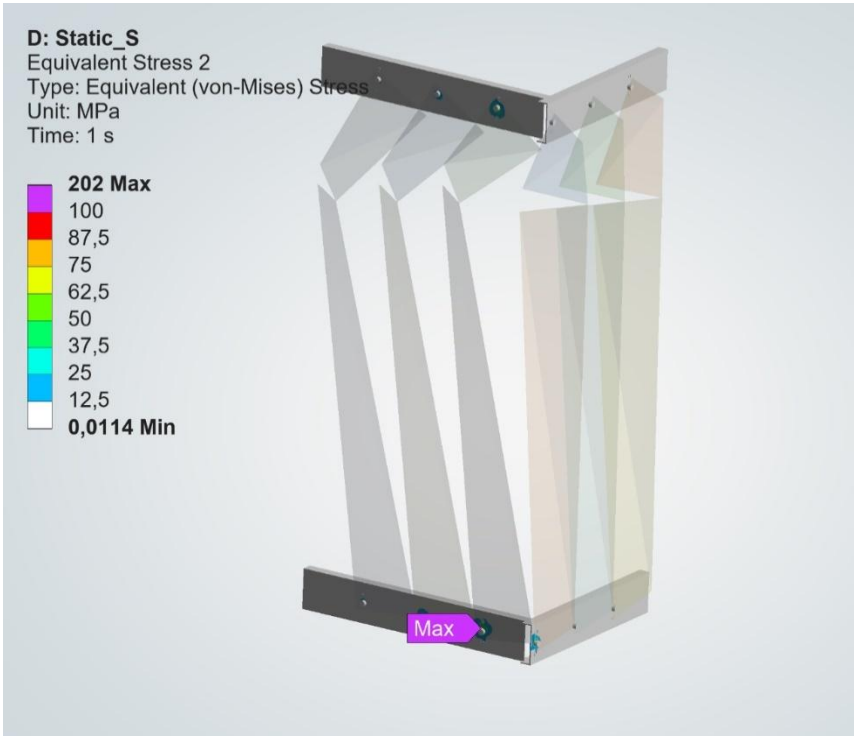



***Рисунок 2.10.*** *Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции швеллеров при воздействии нагрузки от собственного веса и ветровой нагрузки (южное направление ветра), МПа (составлено автором)*

На рисунке 2.11 представлено распределение коэффициента запаса по пределу текучести в конструкции швеллеров. Коэффициент запаса превышает 1, что свидетельствует о достаточной прочности конструкции.

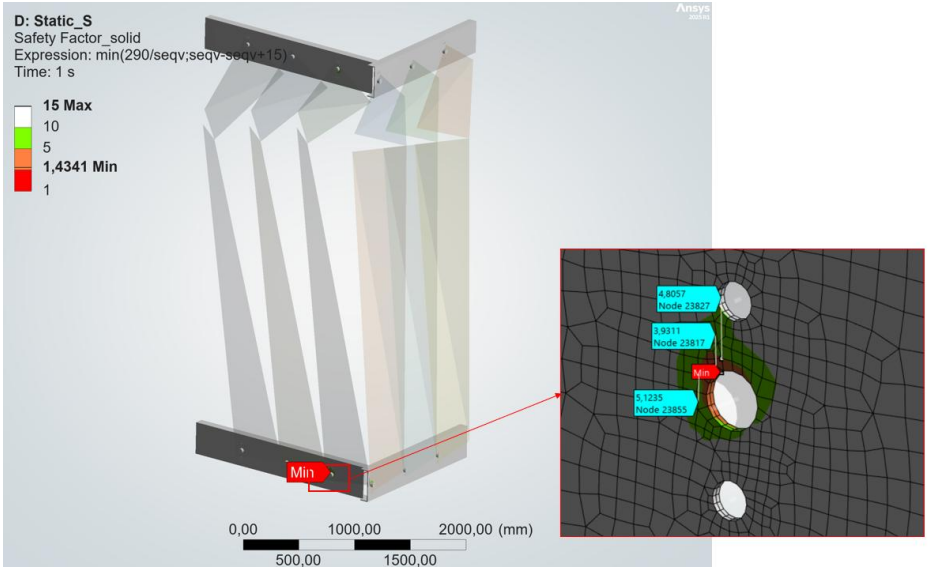



***Рисунок 2.11.*** *Распределение коэффициента запаса по пределу текучести в конструкции швеллеров при воздействии нагрузки от собственного веса и ветровой нагрузки (южное направление ветра) (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таким образом, расчётным способом подтверждена прочность швеллера 440485.[8]

### *Результаты механических расчётов оценки прочности с учетом динамических эффектов. Южное направление ветра*

На рисунке 2.12 представлено распределение полных перемещений в конструкции динамического фасада при воздействии нагрузок.

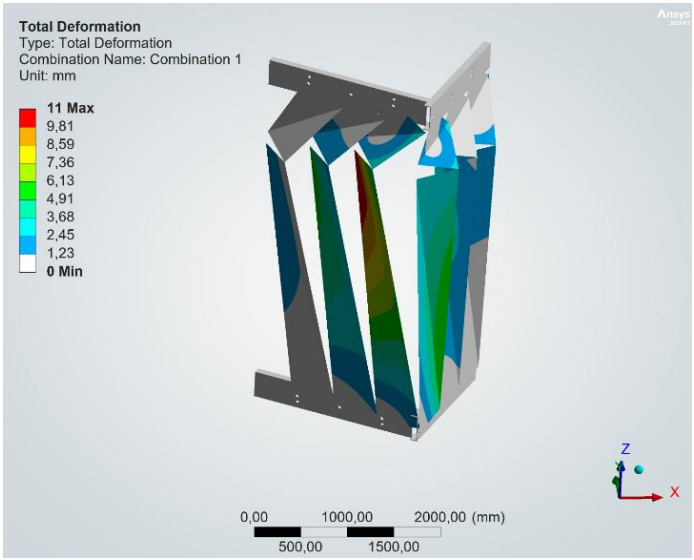



***Рисунок 2.12.*** *Распределение полных перемещений в конструкции динамического фасада при воздействии нагрузки от собственного веса и ветровой нагрузки (южное направление ветра), мм (составлено автором)*

На рисунке 2.13 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции затеняющих листов. Наибольшие напряжения наблюдаются в зоне крепления поворотного шарнира к листу. Напряжения не превышают предела текучести (57,6 МПа < 100 МПа) — прочность обеспечена.

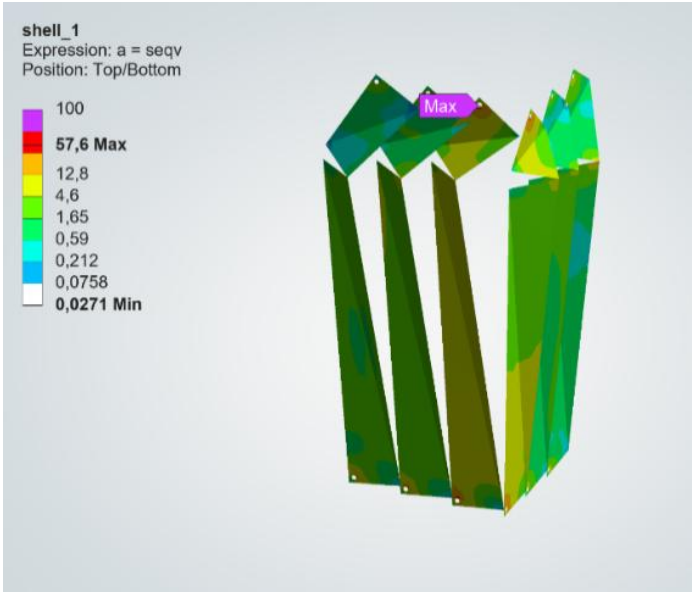



***Рисунок 2.13.*** *Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции затеняющих листов при воздействии нагрузки от собственного веса и ветровой нагрузки (южное направление ветра), МПа (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Так как максимальное значение напряжений составляет 57,6 МПа, то минимальный коэффициент запаса листов равен 1,73 (100 МПа / 57,6 МПа). Таким образом, расчётным способом подтверждена прочность алюминиевых листов АМг2 толщиной 14 мм.

На рисунке 2.14 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции швеллеров. Наибольшие напряжения наблюдаются в зоне контакта швеллера и поворотного шарнира. Напряжения не превышают предела текучести (207 МПа < 290 МПа) — прочность обеспечена.

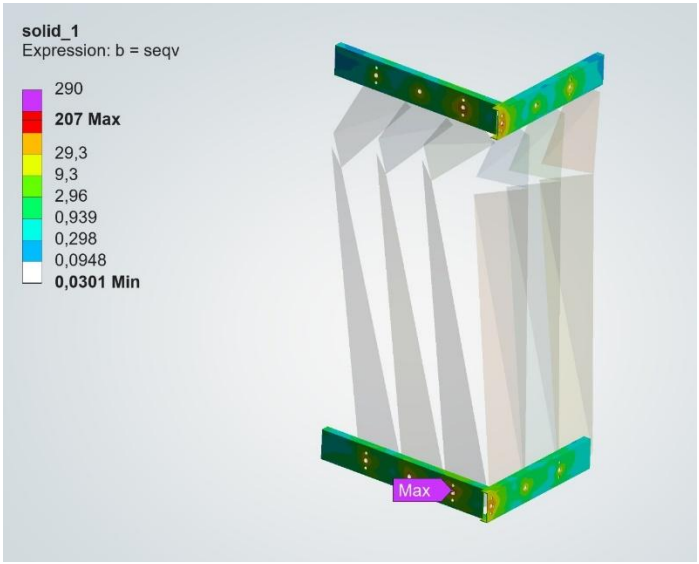



***Рисунок 2.14.*** *Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции швеллеров при воздействии нагрузки от собственного веса и ветровой нагрузки (южное направление ветра), МПа (составлено автором)*

Так как максимальное значение напряжений составляет 207 МПа, то минимальный коэффициент запаса листов равен 1,4 (290 МПа / 207 МПа). Таким образом, расчётным способом подтверждена прочность швеллера 440485.

### *Визуализации спроектированного динамического фасада*

На рисунках 2.15–2.18 представлены визуализации спроектированного динамического фасада.

***Рисунок 2.15.*** *Визуализация спроектированного динамического фасада (южный фасад) (составлено автором)*

***Рисунок 2.16.*** *Визуализация спроектированного динамического фасада (восточный фасад) (составлено автором)*

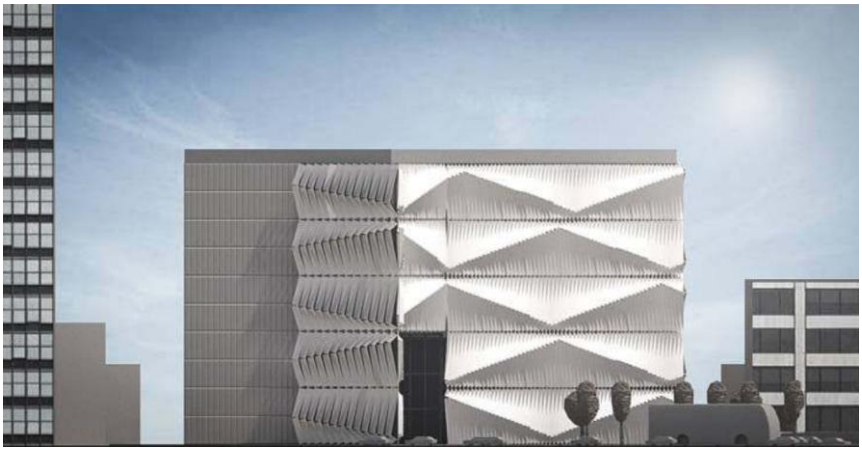


***Рисунок 2.17.*** *Визуализация спроектированного динамического фасада (западный фасад) (составлено автором)*

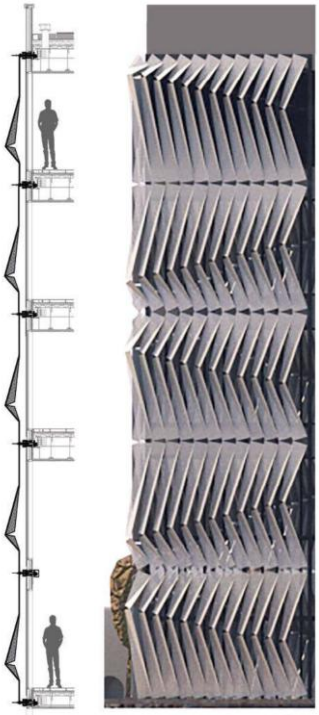


***Рисунок 2.18.*** *Визуализация спроектированного динамического фасада и разрез (восточный фасад) (составлено автором)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

На рисунках 2.19–2.21 представлены визуализации спроектированного динамического фасада изнутри здания.

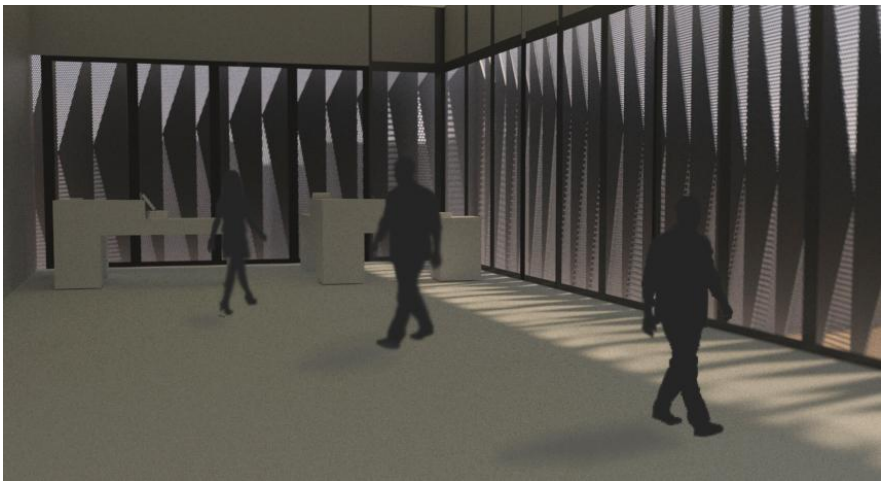


***Рисунок 2.19.*** *Визуализация динамического фасада изнутри офисного помещения (составлено автором)*

***Рисунок 2.20.*** *Визуализация динамического фасада изнутри офисного помещения (составлено автором)*

***Рисунок 2.21.*** *Визуализация динамического фасада изнутри помещения столовой (пример визуализации)*



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

**Заключение**

В рамках развития ранее представленной в статьях [2; 4] авторской ИПДФ-методики по проектированию динамических фасадов в данной работе доказана ее практическая применимость и эффективность.

Работа предлагает конкретное решение одной из основных проблем, сдерживающих широкое применение динамических фасадов — сложности интеграции аналитической модели в реальную ограждающую конструкцию. Разработаны и успешно апробированы четыре критерия для обеспечения такого перехода, касающиеся механических свойств, интеграции в существующую конструкцию, доступности материалов и простоты приводного механизма.

Проведено детальное аэродинамическое моделирование для III ветрового района (г. Сочи), выявлены зоны максимальных ветровых нагрузок и градиентов давления. Выполнен прочностной расчет конструкции (листов, шарниров, швеллеров) на сочетание статических и динамических (пульсационных) ветровых нагрузок. Расчеты подтвердили достаточную прочность и надежность выбранных материалов и сечений.

На основе концепции «двери Клемена Торгглера» разработана конструктивно проработанная и визуально проиллюстрированная модель динамического фасада, сочетающая плоскостное вращение и внеплоскостное складывание элементов. Визуализации демонстрируют не только внешний вид, но и интеграцию системы в здание и ее влияние на внутреннее пространство.

В исследовании теоретическая методика (ИПДФ) получила практическое воплощение в виде детально проработанного инженерного проекта динамического фасада. Работа вносит значительный вклад в преодоление разрыва между цифровым моделированием и физической реализацией энергоэффективных адаптивных ограждающих конструкций, доказывая их техническую осуществимость и надежность даже в условиях значительных ветровых нагрузок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Akimov, L. Shading System Design and Solar Gains Control for Buildings Passive Energy-Efficiency Improvement / L. Akimov [et al.] // Technological Advancements in Construction: Selected Papers. — Cham: Springer International Publishing, 2021. — С. 13–24.
2. Акимов, Л.И. Методика проектирования динамических фасадов с учётом светотехнических условий района строительства / Л.И. Акимов, Т.М. Бугаева, В.Л. Баденко // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 6. — EDN DMKEDI.
3. Акимов, Л.И. Динамический фасад: от концепции до реализации с использованием парадигмы параметрического проектирования / Л.И. Акимов, В.Л. Баденко // Неделя науки ИСИ. — 2022. — С. 244–246. — EDN IHIXAF.
4. Akimov, L. Example-based dynamic façade design using the façade daylighting performance improvement (FDPI) indicator / L. Akimov [et al.] — DOI 10.1007/s12273-023-1073-6 // Building Simulation. — 2023. — Т. 16, № 12. — С. 2261–2283. — EDN HERJYB.
5. Akimov, L. Evaluation of EN15193-1 on energy requirements for artificial lighting against Radiance-based DAYSIM / L. Akimov [et al.] — DOI 10.1016/j.jobe.2021.102698 // Journal of Building Engineering. — 2021. — Т. 40. — С. 102698. — EDN TMZVVL.



66SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

6. Attia, S. Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems / S. Attia [et al.] // Energy and Buildings. — 2018. — Т. 179. — С. 165–182.
7. Wienold, J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras / J. Wienold, J. Christoffersen // Energy and buildings. — 2006. — Т. 38, № 7. — С. 743–757.
8. Zhang, X. Adaptive Façades: Review of Designs, Performance Evaluation, and Control Systems / X. Zhang [et al.] — DOI 10.3390/buildings12122112 // Buildings. — 2022. — Т. 12, № 12. — С. 2112. — EDN LBONXG.
9. Struck, C. An investigation of the option space in conceptual building design for advanced building simulation / C. Struck [et al.] // Advanced Engineering Informatics. — 2009. — Т. 23, № 4. — С. 386–395.
10. Attia, S. Development and validation of a survey for well-being and interaction assessment by occupants in office buildings with adaptive facades / S. Attia, S. Garat, M. Cools // Building and Environment. — 2019. — Т. 157. — С. 268–276.
11. Bolshakov, N. Digital asset in the system of real estate management / N. Bolshakov, A. Plyako, A. Celani, L. Azhimova, L. Akimov // E3S web of conferences. — 2021. — Т. 263. — С. 04039.
12. Dunaieva, I. Spatial and temporal databases for decision making and forecasting / I. Dunaieva, E. Barbotkina, V. Vecherkov, V. Popovych, V. Pashtetsky, V. Terleev, L. Akimov [et al.] // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. — Cham: Springer International Publishing, 2019. — С. 198–205.
13. Анисимова, В.Ю. Энергосбережение и энергоэффективность в промышленности региона / В.Ю. Анисимова [и др.]. — Самара: Самарама, 2022. — Т. 1. — EDN AJTIFH.
14. Borg, N. Guidelines for integrating sustainable summer comfort into public procurement schemes for office equipment and lighting / N. Borg // Keep cool program, Deliverable. — 2009. — Т. 3. — С. 18–26.
15. Montoya, F.G. Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving / F.G. Montoya [et al.] // Energy and buildings. — 2017. — Т. 140. — С. 50–60.
16. Lee, E.S. The New York Times Headquarters daylighting mockup: Monitored performance of the daylighting control system / E.S. Lee, S.E. Selkowitz // Energy and buildings. — 2006. — Т. 38, № 7. — С. 914–929.
17. Батурин, О.В. Расчёт течений жидкости и газа с помощью универсального программного комплекса Fluent / О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев. — Самара: СГАУ, 2009. — 152 с.
18. Шкловец, А.О. Работа в CAE-пакете ANSYS MECHANICAL: конструкционный анализ методом конечных элементов / А.О. Шкловец, В.С. Мелентьев. — Самара: Издательство Самарского университета, 2018. — 76 с.
19. Бруяка, В.А. Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH. Часть I / В.А. Бруяка. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. — 271 с. — EDN QMHFYZ.
20. Бруяка, В.А. Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH. Часть II / В.А. Бруяка. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. — 149 с.

21. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. Том 1 / Л.И. Седов. — Москва: Наука, 1973. — 536 с.

22. Шилов, С.С. Численное моделирование и оптимизация ориентации высотного здания по розе ветров / С.С. Шилов, Е.С. Кашкина, П.А. Хазов // Приволжский научный журнал. — 2023. — № 3. — EDN FCMGPK.

23. Годунов, С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов. — Москва: Наука, 1976. — 400 с. — EDN UESERL.

24. Белостоцкий, А.М. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов. — Москва: АСВ, 2017. — 720 с.

25. Феодосеев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосеев. — Москва: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 1999. — 592 с.

26. Zaretsky, E.V. Rolling bearing service life based on probable cause for removal-a tutorial / E.V. Zaretsky, E.V. Branzai // Tribology Transactions. — 2017. — Т. 60, № 2. — С. 300–312.

27. Guenther, A. Introduction of a new bevel gear measurement standard / A. Guenther [et al.] // CIRP Annals. — 2013. — Т. 62, № 1. — С. 515–518.

28. Goch, G. Gear metrology-an update / G. Goch [et al.] — DOI 10.1016/j.cirp.2023.05.008 // CIRP Annals. — 2023. — Т. 72, № 2. — С. 725–751. — EDN JAJGWQ.

**Akimov Luka Igorevich**
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: lukakimov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8603-1956
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=795716

**Vasileva Daria Gennadievna**
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: vasileva.dasha19962015@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9914-014X

**Kozinets Galina Leonidovna**
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
Higher School of Hydraulic and Power Engineering
E-mail: kozinets_gl@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6877-8420
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=624625

**Badenko Vladimir Lvovich**
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: vbadenko@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3054-1786
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=131728

# Dynamic facade design — a physical model development

**Abstract.** Improving the energy efficiency of buildings is a critical task, especially in the context of high costs for artificial lighting, which can reach up to 45 % of total energy consumption. One promising direction is the use of dynamic facades capable of adapting to changing environmental conditions to optimize the use of natural light and reduce energy costs. However, their widespread implementation is hindered by the problem of transitioning from an analytical model to physical realization.

This paper presents the practical application of the author's FDPI methodology (Façade Daylighting Performance Improvement) for the design and integration of a dynamic facade into a building's envelope. The main focus is on the engineering development of this transition. Four criteria for ensuring feasibility were developed and applied, concerning mechanical properties, integration into the structure, material availability, and simplicity of the actuation mechanism.

Using a building in Sochi (wind region III) as an example, comprehensive numerical modeling was conducted: aerodynamic analysis to determine wind loads and structural strength calculations. Based on the «Clemens Torggler door» concept, a physical model of the facade with rotational and folding aluminum elements was designed, an actuation mechanism was selected, and all load-bearing elements (hinges, channels) were calculated. The modeling results confirmed the strength and reliability of the structure under static and dynamic wind loads.

The work demonstrates the effectiveness of the methodology as a tool that bridges the gap between digital design and the physical realization of energy-efficient adaptive facades, proving their technical feasibility and reliability.

**Keywords:** dynamic facade; adaptive facade; wind load calculation; aerodynamic modeling; building envelope; wind loads; wind flow around a building; material selection; design criteria