

На правах рукописи



Емельянов Денис Андреевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ НАВЕСНОЙ ВЕНТИЛИРУЕМОЙ
ФАСАДНОЙ СИСТЕМЫ С УЗЛОВЫМ ЗУБЧАТЫМ КРЕПЛЕНИЕМ
ОБЛИЦОВКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

Специальность 05.23.01 – «Строительные конструкции,
здания и сооружения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Туснина Валентина Матвеевна

Официальные оппоненты: **Ватин Николай Иванович**
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ
ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого», директор
Инженерно-строительного института,
заведующий кафедрой «Строительство
уникальных зданий и сооружений»

Киселев Дмитрий Александрович
кандидат технических наук, ООО «Фишер
Крепежные Системы Рус», директор по
обучению и развитию

Ведущая организация: **АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий»**

Защита состоится «04» июля 2016 года в 14 час 00 мин, на заседании диссертационного совета Д 212.138.04, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, «Открытая сеть» ауд. № 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» <http://www.mgsu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Каган Павел Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время в строительстве вновь возводимых и реконструируемых зданий широко применяются навесные вентилируемые фасадные системы. Их конструкции позволяют эффективно решать задачи энергосбережения, а наличие большого количества материалов разнообразного цвета и фактуры, используемых для выполнения внешнего отделочного слоя – подчеркивать архитектурную выразительность зданий.

Одним из наиболее распространенных видов облицовки, используемой в навесных фасадных системах, являются панели, изготовленные из алюминиевых композитных материалов. Однако эффективное применение таких систем для зданий повышенной этажности, возводимых в нашей стране, в том числе в сейсмоопасных районах, ограничено отсутствием данных о несущей способности их с учетом совместного влияния динамических (сейсмических нагрузок) и температурных воздействий. В этом аспекте исследование несущей способности разработанной навесной фасадной системы с зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей представляется **актуальной** задачей.

Степень разработанности темы диссертации. Исследованиями, направленными на оптимизацию конструктивных решений ограждающих конструкций, с целью повышения их несущей способности и эксплуатационных качеств занимались такие отечественные и зарубежные ученые как: Я.М. Айзенберг, А.В. Грановский А.Н., С.М. Гликин, А.Ю. Кудряшов, Э.Н. Кодыш, П.В. Леденёв, А.Н. Машенков, А.В. Сусаров, Е.В. Чебурканова, Г.Н. Шмелев, Л.Р. Хайруллин, M. Z. Rousseau, Christoph Tanner, Christoph Zürcher и др.

Следует отметить что, несмотря на существующие исследования работы навесных вентилируемых фасадных систем с различными типами облицовки, вопрос повышения несущей способности системы со скрытым креплением алюминиевых композитных панелей с учетом температурных воздействий и динамических, в том числе сейсмических, нагрузок на сегодняшний день остается не решенным

Научно-техническая гипотеза диссертации заключается в возможности повышения несущей способности навесной вентилируемой фасадной системы за счёт применения узлового зубчатого крепления облицовки из алюминиевых композитных панелей.

Цель диссертационной работы. Разработка конструкции навесной вентилируемой фасадной системы с зубчатым узловым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей, обладающей повышенной несущей способностью при неизменной материалоемкости в сравнении с существующими системами.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Анализ существующих конструктивных решений систем навесного вентилируемого фасада с облицовкой алюминиевыми композитными материалами.

2. Конструирование зубчатых узлов крепления облицовки на основе испытаний тестовых образцов.

3. Экспериментальные исследования прочности и деформативности разработанной конструкции.

4. Конечно-элементное моделирование работы системы навесного вентилируемого фасада с зубчатым узловым креплением облицовки.

5. Анализ напряженно-деформированного состояния и несущей способности фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки, с использованием нормативной методики расчета.

6. Испытания фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки на действие динамических нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия.

7. Разработка методики расчёта вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.

Объект исследования. Навесная вентилируемая фасадная система с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.

Предмет исследования. Несущая способность навесной вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением алюминиевых композитных панелей.

Научная новизна работы:

– теоретически и экспериментально установлена повышенная несущая способность разработанной конструкции (в сравнении с существующими системами) в условиях повышенных ветровых и динамических (сейсмических) нагрузок;

– установлено влияние зубчатого узлового крепления облицовки на несущую способность и материалоемкость навесной фасадной системы;

– впервые экспериментально получены данные о прочности и деформативности заклёпочного соединения узловых элементов фасадной системы с учетом влияния температурных воздействий;

– экспериментально определены оптимальные геометрические параметры конструктивных элементов зубчатого крепления облицовки, повышающие экономичность и технологичность изготовления и монтажа разработанной навесной фасадной системы.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использованы: фундаментальные принципы строительной механики и общеизвестные методы расчета строительных конструкций; научные работы отечественных и зарубежных ученых; метод конечно-элементного моделирования. Работа выполнена с использованием экспериментальных и теоретических методов исследования.

Теоретическая значимость работы заключается в получении данных о влиянии зубчатого узлового крепления облицовки на несущую способность и материалоемкость навесной фасадной системы, подтвержденных экспериментально-теоретическими исследованиями.

Практическая значимость работы:

– разработана новая конструкция с зубчатым узловым креплением панелей из композитного материала, характеризующаяся повышенной несущей способностью и меньшей материалоемкостью в сравнении с существующими фасадными системами, с аналогичным типом облицовки;

– получены данные о несущей способности навесной вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей при действии статических, а также динамических нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия;

– разработана методика расчета вентилируемых фасадных систем с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.

Достоверность результатов и выводов обеспечивается: использованием общепринятых методов проведения эксперимента с применением аттестованных испытательных машин и инструментов; проведением численных расчетов на апробированном вычислительном комплексе «Лира»; проведением исследований, основанных на положениях строительной механики; сравнительным анализом результатов численных и теоретических исследований с экспериментальными данными.

Реализация результатов работы:

Результаты работы использованы ООО «СК Современный дом» при проектировании и монтаже навесных вентилируемых фасадных систем с облицовкой из алюминиевых композитных панелей. Эффективность применения разработанной конструкции фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки, характеризующейся малой материалоемкостью и низкой трудоемкостью монтажа в сравнении аналогичными системами, подтверждена на практике.

На защиту выносятся:

– результаты экспериментально-теоретического обоснования конструктивного решения навесной вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей;

– результаты экспериментальных и теоретических исследований напряженно-деформированного состояния и несущей способности навесной вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей;

– разработанная методика расчёта вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.

Личный вклад автора диссертации заключается в разработке методики расчета конструкции вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением алюминиевых композитных панелей, проведении экспериментальных исследований, анализе результатов экспериментальных и теоретических исследований и в формулировке заключений, определяющих практическую значимость и научную ценность работы.

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертационной работы представлены на научно-практических конференциях:

– Пятнадцатая Международной межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», Москва, МГСУ, апрель 2012 г.;

– Семнадцатая Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», Москва, МГСУ, апрель 2014г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано семь работ, в том числе пять статей в научных журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК РФ и одна статья в журнале, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (189 наименования), двух приложений и содержит 189 страниц машинописного текста, 94 рисунка и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика диссертации, обоснована актуальность темы, степень её разработанности, сформулирована научно-техническая гипотеза, поставлены цель и задачи, определены объект и предмет исследований, научная новизна и практическая ценность работы.

Первая глава посвящена изучению состояния вопроса, постановке цели и задач исследования. Глава носит обзорный характер, содержит сведения о современном уровне развития науки в области исследований несущей способности навесных вентилируемых фасадных систем и практических методах их расчета и проектирования.

Исследованиями, направленными на оптимизацию конструктивных решений ограждающих конструкций, с целью повышения их несущей способности и других эксплуатационных качеств занималось большое количество отечественных и зарубежных ученых. Среди них: Я.М. Айзенберг, А.В. Грановский, С.М. Гликин, А.Ю. Кудряшов, Э.Н. Кодыш, П.В. Леденёв, А.Н.Машенков, А.В. Сусаров, Е.В. Чебурканова, Г.Н. Шмелев, Л.Р. Хайруллин, M. Z. Rousseau, Christoph Tanner, Christoph Zürcher и др.

Обзор работ этих авторов показал, что вопрос повышения несущей способности навесных вентилируемых фасадных систем с облицовкой из алюминиевых композитных панелей с учетом совместного влияния динамических (сейсмических нагрузок) и температурных воздействий на сегодняшний день остается открытым и требует изучения.

На основе проведенного анализа исследований отечественных и зарубежных ученых по изучаемому вопросу сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Во второй главе приведены результаты экспериментально-теоретических исследований прочности и деформативности узлового зубчатого крепления облицовки навесной вентилируемой фасадной системы, разработанной автором.

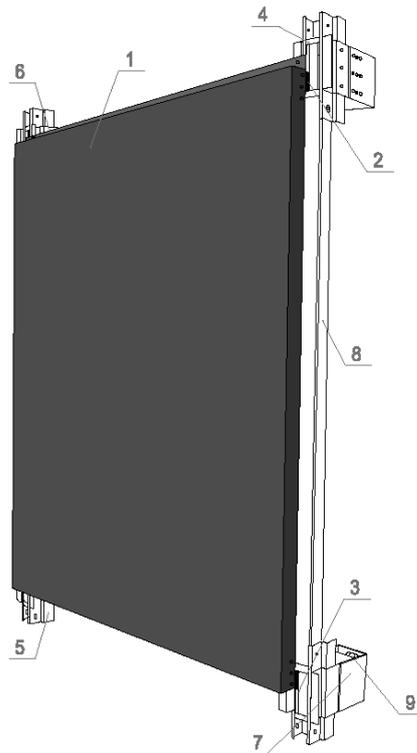


Рисунок 1 – Общий вид навесной фасадной системы с зубчатым узловым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1- кассета из композитного материала; | 7- кронштейн; |
| 2- зубчатая икля; | 8- дренажный профиль; |
| 3- зубчатый кронштейн каретки; | 9- анкерный дюбель. |
| 4- каретка; | 5- обратная часть удлинителя; |
| 5- обратная часть удлинителя; | 6- удлинитель; |
| 6- удлинитель; | 7- кронштейн. |

В разработанной системе отсутствуют вертикальные и горизонтальные направляющие. Алюминиевые композитные панели крепятся к несущей конструкции непосредственно в узловых точках (местах расположения кронштейнов). Крепление элементов облицовки к подсистеме осуществляется за счет устройства зубчатого соединения икли с

кронштейном каретки (рис. 1). Конструкция зубчатых узлов, за счет Г-образной формы иклей, зеркально расположенных относительно друг друга, способно воспринимать все горизонтальные и вертикальные нагрузки, в том числе и вертикальные толчки, перпендикулярные плоскости земли, которые имеют место при землетрясениях.

Благодаря отсутствию вертикальных и горизонтальных направляющих в конструкции отпадает необходимость устройства температурно-деформационных швов, которые предусмотрены в традиционных фасадных системах.

В системе имеются специальные вентилируемые каналы, предназначенные для притока воздуха, осуществляемые с помощью вырезов в нижних бортах кассет.

Все элементы системы изготавливаются из алюминиевого сплава АМг6.

В отличие от кассетного метода крепления облицовки в предлагаемом конструктивном решении кассеты не «навешиваются», а «вставляются» в зубчатое соединение, что снижает трудозатраты монтажа.

При разработке конструктивного решения зубчатого узла, определение оптимальных геометрических параметров соединяемых элементов производилось на основе тестовой сборки узла (рис. 2). Сборка узла осуществлялась пошаговой установкой зубчатой икли в зубчатый кронштейн каретки с усилием $5 \div 10$ кг. Определялись: размер входной части икли, величина основного металла полок кронштейна и количество зубьев в нем, которые составили 3,58 мм, 1 мм и 8 зубьев, соответственно.

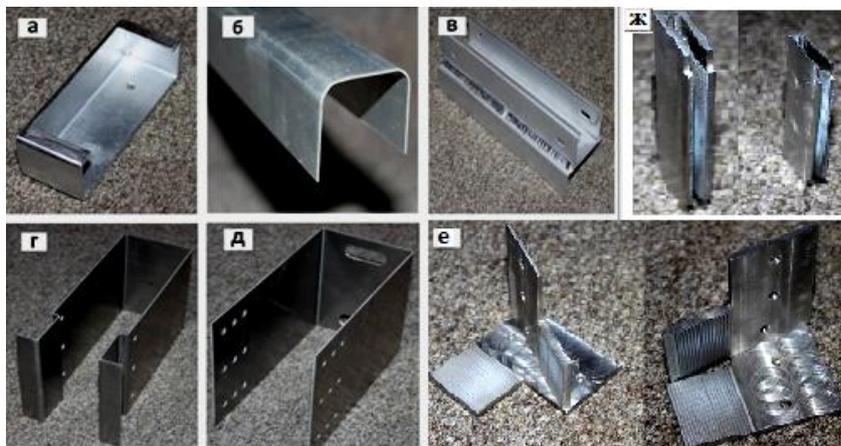


Рисунок 2 – Конструктивные элементы системы:

каретка (а); дренажный профиль (б); обратная часть удлинителя (в); удлинитель (г); кронштейн (д); зубчатая икля (слева – до эксперимента, справа – после эксперимента (с входной частью) (е); зубчатой икли (слева – до эксперимента, справа – после эксперимента (с входной частью) (ж)

Узловое соединение системы испытывалось на растяжение. Имитировалось воздействие от ветровой нагрузки «отсоса». Испытание производилось на испытательной машине Instron 3382 (рис.3).

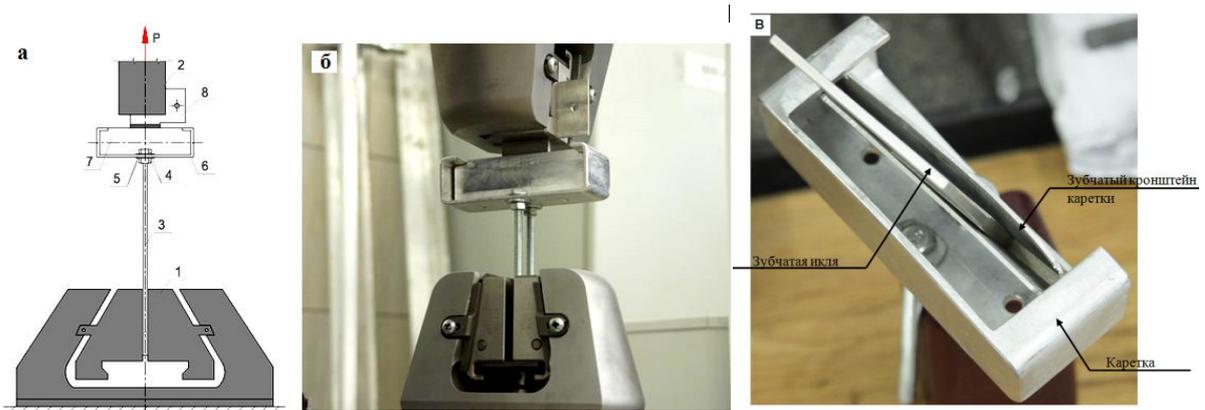


Рисунок 3 – Схема испытания зубчатого соединения системы (а); общий вид установки с испытываемым образцом (б); образец после испытания (в):

- | | |
|---|--------------------------------|
| 1.-неподвижные захваты машины Instron 3382 ; | 4- гайки; |
| 2- захваты машины Instron 3382; | 5- шайбы; |
| 3- болт $\text{Ø}6\text{мм}$ $L=120\text{мм}$ для крепления узлового соединения в захватах; | 6- каретка; |
| | 7- зубчатый кронштейн каретки; |
| | 8- зубчатая икля; |
| | 9- P – прикладываемое усилие. |

На основании анализа результатов эксперимента получена картина напряженно-деформированного состояния и несущей способности зубчатого узла конструкции (рис. 4):

- разрушающая нагрузка составила 3,850 кН;
- максимальные напряжения при растяжении узлового соединения – 3,725 кН/см²;
- на момент разрушения суммарное удлинение составило 4,1 мм;
- деформации зубчатого кронштейна каретки (как показали испытания, наиболее нагруженного элемента узла) составили: раскрытие полок – 4,9 мм; смятие углов полок – 3 мм; поворот кронштейна – 3°;
- прогиб задней стенки каретки составил 3,0 мм;
- выявлено, что зубья кронштейна и зубчатая икля видимых деформаций (сколов и вмятин) не имели (рис.3 в).

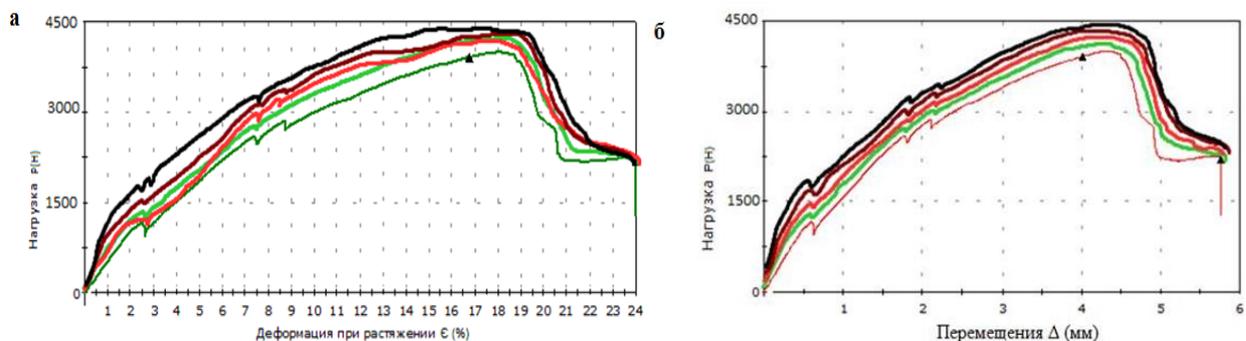


Рисунок 4 – График зависимости относительных деформаций ε (%) узлового соединения от нагрузки (а); график зависимости абсолютных деформаций Δ (мм) узлового соединения от нагрузки (б).

Учитывая, что дренажный профиль испытывает значительные деформации при температурных воздействиях, имеющих место в фасадной системе, его соединение с опорным узлом не должно препятствовать свободным перемещениям узловых элементов, испытывающих деформации от температурных воздействий. Для обеспечения податливости такого соединения, дренажный профиль крепится к опорному узлу с помощью заклёпки, устанавливаемой в овальное отверстие.

Податливость заклепочного крепления дренажного профиля в разработанной конструкции была изучена на основе эксперимента. Соединение испытывалось на растяжение. Имитировалось деформированное состояние заклепочного соединения элементов в узле от действия температурных воздействий.

Экспериментальные исследования прочности и деформативности заклепочных соединений с овальными отверстиями на сдвиг, проводились с помощью крепежного тестера Hydrajaws, предназначенного для измерения силы и линейных деформаций (рис 5).

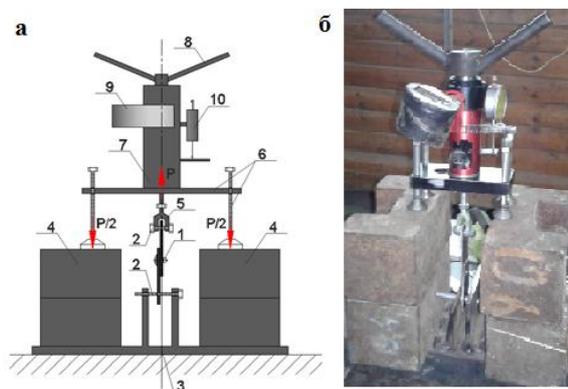


Рисунок 5 – Расчетная схема (а) и установка для испытания заклепочного соединения (б):

- | | |
|---|---|
| 1 -испытываемое заклепочное соединение ; | 6 - пирамидная опора; |
| 2 - болт Ø6мм для крепления заклепочного соединения в захватах; | 7 - гидравлический домкрат; |
| 3 - неподвижные захваты; | 8 - рычаг приложения усилия; |
| 4 - металлические призмы; | 9 – измерительное устройство (регистрация нагрузки); |
| 5 - неподвижные захваты тестера Hydrajaws; | 10 – измерительное устройство (регистрация деформаций); |
| | 11- P – прикладываемое усилие. |

В ходе эксперимента моделировалось два варианта заклепочного соединения. В первом варианте «головка» заклёпки размещалась в круглом отверстии, а запрессовка стержня выполнялась в овальном отверстии. Во втором варианте «головка» заклёпки размещалась в овальном отверстии, а запрессовка стержня выполнялась в круглом отверстии.

Экспериментально установлено, что при размещении «головки» заклёпки в овальном отверстии и запрессовки стержня в круглом отверстии,

максимальное усилие, при котором происходит сдвиг заклёпки в овальном отверстии, составляет 9 кг (0,088 кН). При размещении «головки» заклёпки в круглом отверстии и запрессовки стержня в овальном отверстии, максимальное усилие, при котором происходит сдвиг заклёпки в овальном отверстии, составляет 93 кг (0,912 кН).

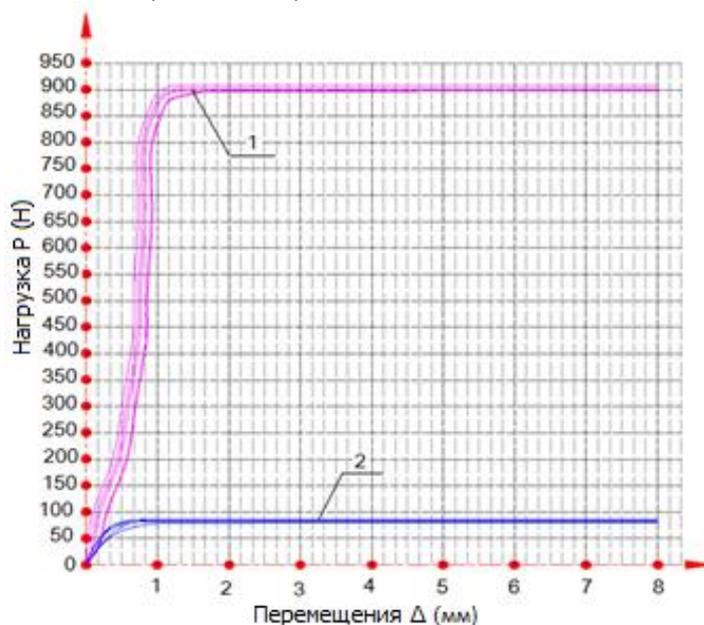


Рисунок 6 – График зависимости абсолютных деформаций Δ (мм) заклёпочного соединения от нагрузки:

- 1 – «головка» заклёпки устанавливается в круглом отверстии;
- 2 – «головка» заклёпки устанавливается в овальном отверстии;

Результаты эксперимента показали, что заклёпочное соединение элементов с размещением «головки» заклёпки в овальном отверстии является достаточно податливым при действии температурной нагрузки. Такое заклёпочное соединение не препятствует свободным перемещениям элементов, испытывающих температурные деформации (рис.6).

Для анализа напряженно-деформированного состояния и несущей способности разработанной конструкции с зубчатым узловым креплением облицовки в сравнении с результатами экспериментальных исследований был произведен расчет системы на действие эксплуатационных нагрузок, в том числе температурных воздействий, с использованием нормативной методики.

Максимально допустимый изгибающий момент из условия прочности в кронштейне системы составил – $M \leq 0,858 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Предельно допустимая из условия прочности вертикальная сила составила – $P \leq 2,539 \text{ кН}$. Предельно допустимый прогиб кронштейна системы составил – $V \leq 42 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Предельно допустимая вертикальная сила из условия деформативности составила – $P = 9,436 \text{ кН}$

Величина температурных деформаций дренажного профиля (линейное удлинение) $\Delta L = 2,304 \text{ мм}$ с запасом компенсируется проектным зазором

(который составляет 130 мм), следовательно, силовых воздействий при изменении температуры не возникает.

Дополнительные напряжения в несущем кронштейне от температурной нагрузки, меньше предельно допустимых из условия прочности:

$$\sigma = 1,8 \text{ МПа} \ll [\sigma] = 117 \text{ МПа}$$

Следовательно, дополнительные напряжения в несущих кронштейнах от действия усилий, возникающих от температурных воздействий, составляют ~ 1,5 % от предельно допустимых, что позволяет ими пренебречь.

Выполнен прочностной расчёт на действие эксплуатационных нагрузок для 1 и 7 ветрового районов России, при различной высоте здания с использованием нормативной методики.

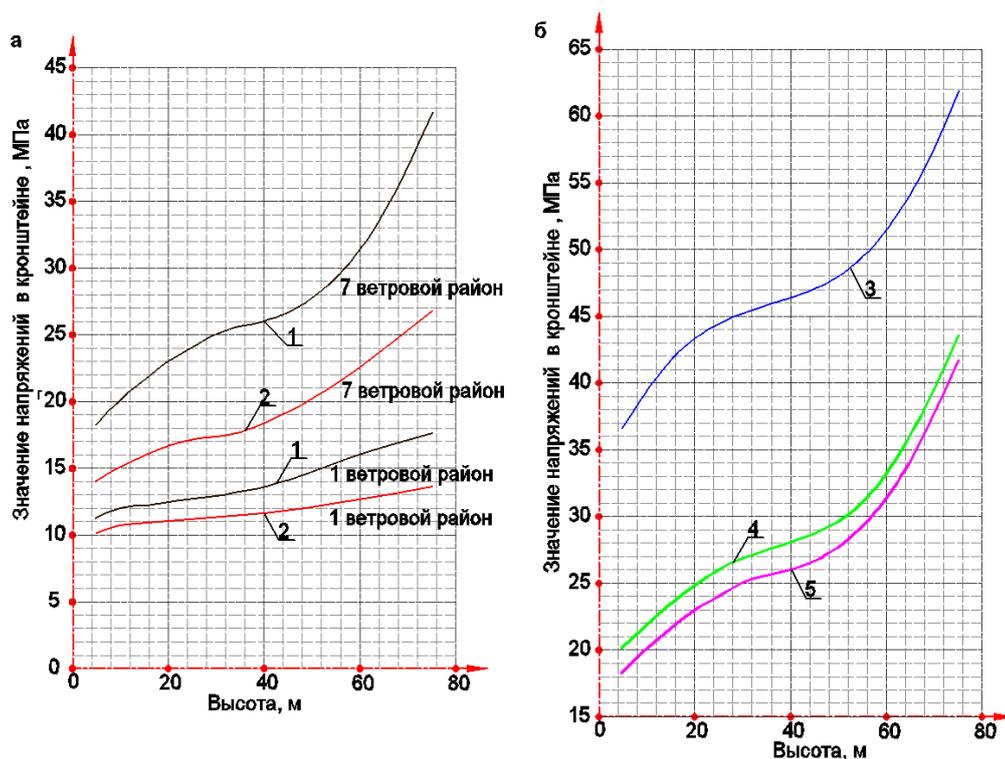


Рисунок 7 – Распределение максимальных напряжений в кронштейне в рядовой и угловой зонах фасада на высоте 75м для 1 и 7 ветровых районов (а); графики распределения максимальных напряжений в кронштейне в угловой зоне фасада на высоте 75м с учетом и без учета влияния температурной нагрузки (б).

- 1 – угловая зона фасада (расчёт по нормативной методике);
- 2 – рядовая зона фасада (расчёт по нормативной методике);
- 3 – угловая зона фасада (расчёт с учётом температурных деформаций, «головка» заклёпки устанавливается в круглом отверстии);
- 4 – угловая зона фасада (расчёт с учётом температурных деформаций, «головка» заклёпки устанавливается в овальном отверстии);
- 5 – угловая зона фасада (расчёт без учёта температурных деформаций);

Графики распределения максимальных напряжений, возникающих в кронштейне в угловой и рядовой зонах фасада на высоте 75м для 1 и 7

ветровых районов, наглядно демонстрируют напряженное состояние конструкции при действии ветровой нагрузки (рис. 7).

На рис. 7 (а) изображены графики распределения максимальных напряжений в кронштейне в угловой зоне фасада на высоте 75 м с учетом и без учёта температурных воздействий при разных способах заклепочного соединения конструктивных элементов в узлах.

Проведенный расчет позволяет заключить, что максимально допустимая нагрузка на узловое соединение системы ограничивается прочностью и составляет 2,539 кН при максимальном вылете облицовки 340 мм. Допустимая нагрузка на несущий L-образный кронштейн в существующих типовых системах составляет от 0,022 кН до 0,029 кН, что значительно ниже допустимой нагрузки на узловое соединение разработанной системы. Учитывая, что фактическая нагрузка от веса наледи, собственного веса облицовки и несущей конструкции ($N = 0,465$ кН) значительно ниже предельно допустимой нагрузки ($N = 2,539$ кН), можно заключить, что прочность узлового соединения обеспечивается с запасом.

Для оценки напряженно-деформированного состояния системы выполнен численный расчёт в программном комплексе «ЛИРА» версии 9.6. Узел крепления подсистемы формировался универсальными линейными треугольными и четырехугольными конечно-элементными оболочками. Расчётная модель узлового соединения приведена на рис. 8.

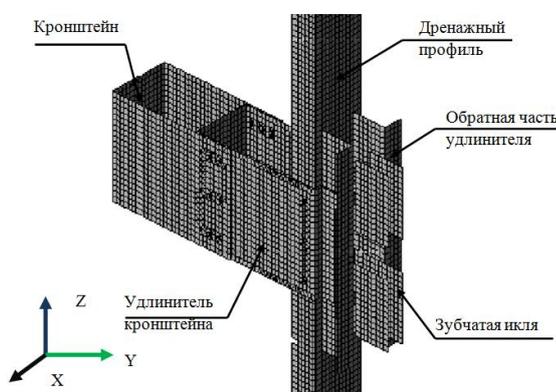


Рисунок 8 – Расчётная модель узлового соединения

По результатам численного расчета получена картина напряженно-деформированного состояния навесной вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки:

- величина максимальных напряжений в кронштейне (в угловой зоне фасада на высоте 75 м) составила 38,72 МПа, что значительно ниже максимально допустимой величины, составляющей 117 МПа;
- максимальные перемещения кронштейна составили 2,0 мм, что ниже предельно допустимых перемещений, равных 4,2 мм.

Сравнительный анализ результатов численного расчета с экспериментальными данными показал, что величина деформаций элементов узлового соединения, полученных экспериментально, \approx на 5 % ниже расчетных значений (рис.9).

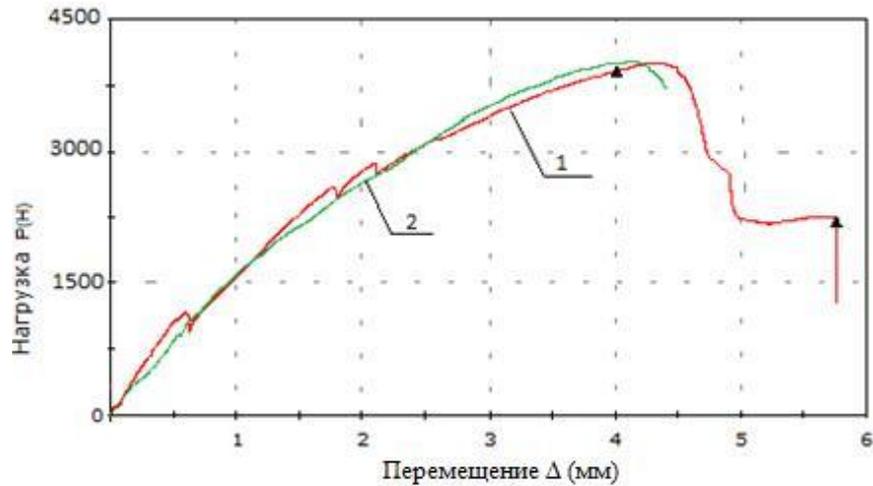


Рисунок 9 – Графики зависимости абсолютных деформаций удлинения узла системы Δ от нагрузки P :

- 1- результаты экспериментальных исследований;
- 2- результаты численного расчета

Как видно из графика (рис. 10), значения напряжений, полученные в результате расчета по нормативной методике, превосходят значения напряжений, полученные численным расчетом на 7%. Это можно объяснить тем, что численный расчет системы является более точным и учитывает совместную пространственную работу всех элементов системы.

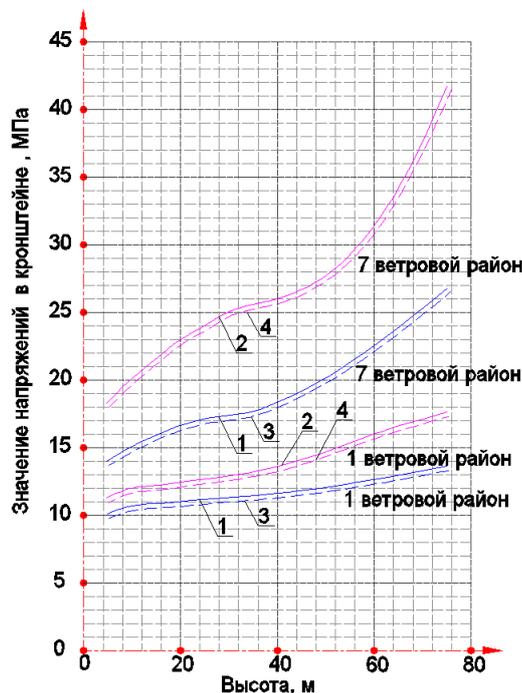


Рисунок 10 – График распределения максимальных напряжений в кронштейне (сравнение результатов расчета по нормативной методике и расчета в программном комплексе «ЛИРА»)

- 1 – рядовая зона фасада (расчёт по нормативной методике);
- 2 – угловая зона фасада (расчёт по нормативной методике);
- 3 – рядовая зона фасада (расчёт в программном комплексе «ЛИРА»);
- 4 – угловая зона фасада (в программном комплексе «ЛИРА»);

Экспериментальные и численные исследования подтвердили возможность применения разработанной системы во всех ветровых районах РФ для зданий повышенной этажности (высотой до 75 м).

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям по определению резервов несущей способности разработанной фасадной системы при действии динамических нагрузок (моделирующих сейсмические воздействия).

Экспериментальные исследования несущей способности разработанной системы навесного вентилируемого фасада при действии динамических нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия при землетрясениях 7 ÷ 9 баллов по шкале MSK-64, проводились в лаборатории ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко на виброплатформе маятникового типа. Автоматизация процесса обработки данных тензометрирования осуществлялась с помощью программного комплекса WinПОС.

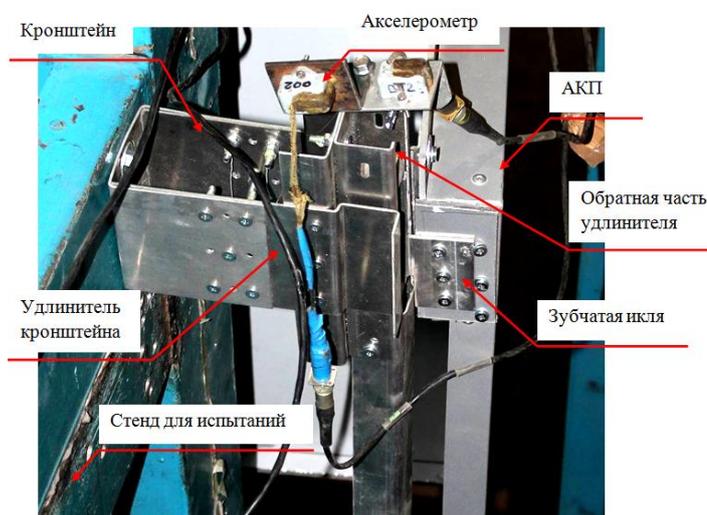


Рисунок 11 – Крепление датчика на системе

Изучение работы фасадной системы с зубчатыми узлами крепления облицовки проводилось в два этапа. Вначале испытывался макет разработанной системы, представлявший угловой элемент облицовки в виде одной панели. Затем, с целью сравнительного анализа сейсмостойкости разработанной конструкции с существующими системами аналогичной материалоемкости был проведен второй этап испытаний на экспериментальном кубе, с двух сторон которого монтировались фрагменты исследуемых систем: разработанной и типовой.

В начале испытаний частотный спектр изменялся от 0 до 10 Гц при неизменной амплитуде перемещений виброплатформы. Далее изменялось значение амплитуды с заданием частот в этом же спектре. Продолжительность каждого этапа динамического нагружения фрагмента системы составляла от 20 до 25 секунд. По результатам 1-го этапа испытаний устанавливались уровни ускорений виброплатформы, соответствующие 7 ÷ 9-ти балльным воздействиям по шкале MSK-64 и уровни воздействий, соответствующие резонансным колебаниям системы. Затем проводились повторные испытания системы при сочетаниях амплитудно-частотных

параметров виброплатформы, соответствующих резонансным колебаниям системы при 7 ÷ 9-ти балльных воздействиях. Продолжительность испытаний составляла 40 ÷ 50 сек.

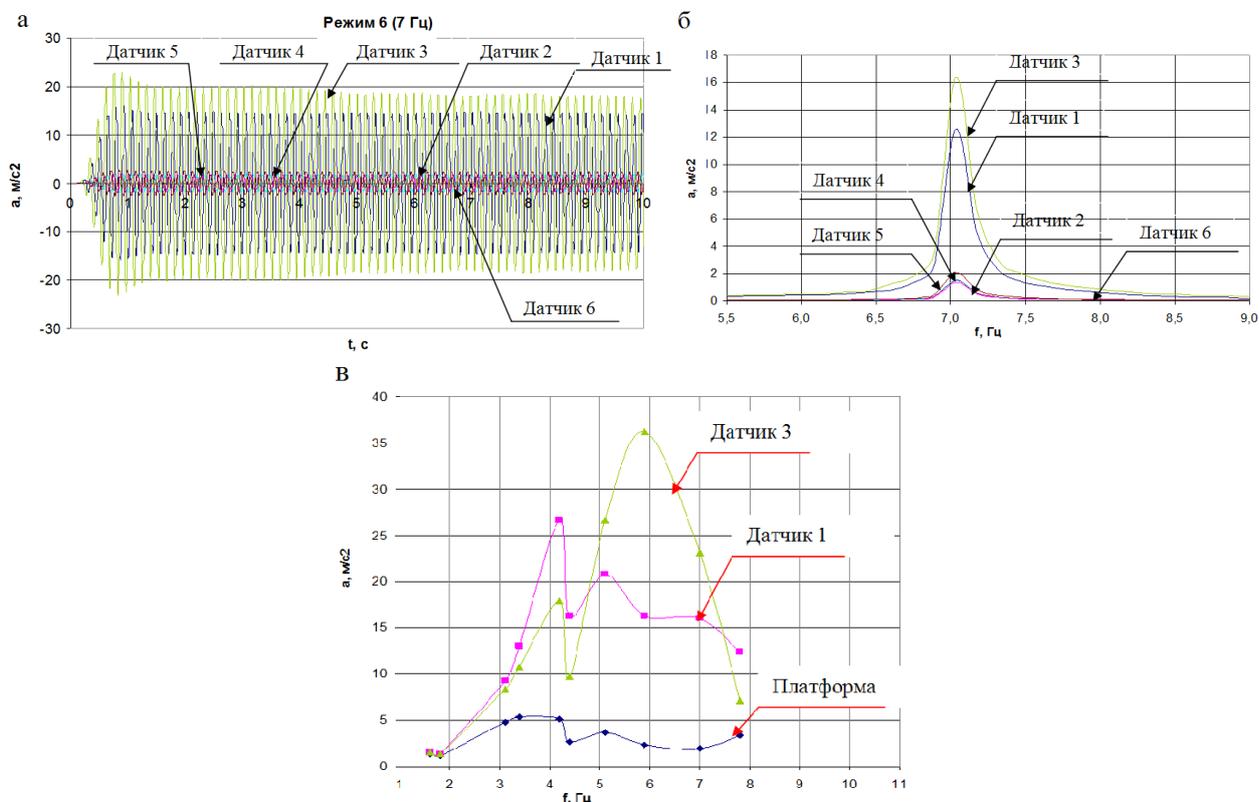


Рисунок 12 – Акселерограммы (мм), записанные с датчиков (а); спектры пиковых значений ускорений (м/с²) для датчиков (б); графики зависимости ускорения от частоты при горизонтальных колебаниях для фрагмента системы (в)

С помощью быстрого преобразования Фурье построены спектры пиковых значений ускорений для датчиков на различных режимах испытания.

На рисунке 12б приведены спектры пиковых значений ускорений для одного из режимов испытаний. На акселерограммах (рис.12а) приведены ускорения в уровне платформы и на элементах фасадных систем при различных режимах испытания. Построены амплитудно-частотные характеристики системы, которые позволяют оценить разность перемещений и ускорений в различных точках испытываемого фрагмента системы при колебаниях с заданной частотой. Графики зависимостей ускорений и перемещений от частот при горизонтальных колебаниях для фрагмента системы приведены на рисунке 12в.

Анализ графиков зависимостей ускорений и перемещений от горизонтальных и вертикальных колебаний систем НВФ под действием динамических (сейсмических) нагрузок позволил отметить следующее:

- частоты собственных колебаний систем составили: испытанный макет – 2÷3 и 5 Гц, фрагмента системы – 3÷4 и 6 Гц, существующей системы, получившей повреждение во время испытания – 5÷6 Гц;

– максимальные ускорения при испытаниях составили: испытанный макет – 32 и 12 м/с² для горизонтальных и вертикальных колебаний соответственно; фрагмент системы – 37 и 7 м/с²; существующая система, получившая повреждение во время испытания – 19 и 7,5 м/с²;

– максимальные перемещения при испытаниях составили: испытанный макет – 45 и 15 мм для горизонтальных и вертикальных колебаний соответственно; фрагмент системы – 37 и 5 мм для горизонтальных и вертикальных колебаний соответственно; существующая система, получившая повреждение во время испытания – 55 и 5,5 мм для горизонтальных и вертикальных колебаний соответственно.

По результатам экспериментальных исследований сейсмостойкости разработанной системы с зубчатыми узлами крепления облицовки можно заключить:

– ускорение виброплатформы в процессе испытания по данным акселерометров, установленных на ней, изменялось в интервале от 0,4 до 5,05 м/с². Частоты колебания системы изменялись в интервале от 1,6 до 7,8 Гц, амплитуды колебаний виброплатформы – от 0,6 до 3,8 мм. Ускорение в разных точках системы изменялось в интервале от 0,01 до 30,82 м/с²;

– в момент, когда собственные частоты колебаний системы совпали с вынужденными частотами колебаний виброплатформы, наблюдалось явление резонанса. Явление резонанса наблюдалось на разных этапах загрузки при частоте $f = 6,4 \div 6,6$ Гц;

– эксплуатационная надежность разработанной системы при резонансе не была нарушена;

– установлено демпфирование колебаний за счет зубчатого узлового крепления облицовки к несущей конструкции разработанной системы, обладающей повышенной жесткостью и меньшей материалоемкостью в сравнении с существующими навесными фасадными системами.

В четвёртой главе представлены анализ методики инженерного расчёта типовых фасадных систем и разработанная методика расчета конструкции с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.

На основе сравнительного анализа результатов эксперимента и численных расчетов системы разработана методика расчета и проектирования навесной вентилируемой фасадной системы с зубчатым узловым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.

Шаг узловых точек крепления облицовки (с) определяется исходя из прочности собственно узлового крепления кассеты к конструкции и прочности самой несущей конструкции фасадной системы.

Формулу по расчету количества узлов несущей конструкции для одной облицовочной кассеты можно представить в следующем виде:

$$n = \frac{2 \cdot (A - 0,037)}{c}, \text{ (шт.)}$$

где:

A – геометрический размер облицовочной кассеты (высота);
 $0,037$ – расстояние от края борта кассеты до центра икли крепления кассеты;

c – шаг узлов несущей конструкции (для одной облицовочной кассеты).

Для одной облицовочной кассеты шаг узлов несущей конструкции (c) следует принимать минимальным исходя из прочности крепления облицовки (c_1) и прочности кронштейнов системы (c_2).

Несущая способность зубчатого узлового крепления облицовки зависит от следующих факторов:

- прочности соединения при сдвиге;
- прочности соединения на смятие;
- прочности лапок кронштейна при внецентренном растяжении.

По результатам экспериментальных исследований и численных расчётов выявлено, что разрушение соединения исходя из нарушения условия прочности крепления облицовки на срез и смятие маловероятно.

Исходя из характера разрушения соединения по результатам экспериментальных исследований, наибольший вклад в нарушение работоспособности зубчатого соединения крепления облицовки вносит внецентренное растяжение лапок кронштейна.

Разрушающая нагрузка по результатам эксперимента составила $3,85$ кН, что значительно выше расчетной допустимой нагрузки, равной $0,14$ кН. Объясняется это тем, что борта каретки зубчатого узлового соединения воспринимают часть нормальных напряжений при внецентренном растяжении кронштейна.

Учесть совместную работу кронштейна каретки с кареткой при их внецентренном растяжении можно за счёт введения в расчет понижающего коэффициента k_1 , определяемого по формуле:

$$k_1 = \frac{P_{\text{общ}}}{P_{\text{разр}}} = \frac{0,14}{3,85} = 0,037$$

Формула для определения шага узлов несущей конструкции исходя из прочности крепления облицовки имеет вид:

$$c_1 \leq \frac{k_1 \cdot q_y \cdot A \cdot B \cdot (W_z \cdot \gamma_f + e_z \cdot A_y)}{4 \cdot A_y \cdot W_z \cdot \gamma_f \cdot R_y \cdot \gamma_c}, \text{ где:}$$

q_y – расчётная ветровая нагрузка на соединение при коэффициенте $\gamma_f=1,4$;

A и B – геометрические размеры облицовочной кассеты;

W_z – момент сопротивления сечения лапки кронштейна относительно оси «z»;

A_y – площадь поперечного сечения лапки кронштейна относительно оси «y»;

R_y – расчётное сопротивление алюминиевого сплава растяжению;

Как показали результаты численных исследований прочности узлов несущей конструкции фасада, наибольшие деформации и напряжения при действии эксплуатационных нагрузок возникают в кронштейне.

Для расчета несущей способности навесной фасадной системы с зубчатым креплением облицовки вводится понижающий коэффициент $k_2 = 0,93$ (7%), учитывающий совместную пространственную работу всех элементов системы, полученный по результатам сравнительного анализа результатов эксперимента и численных исследований.

Таким образом, формула определения прочности кронштейна при растяжении с изгибом примет вид:

$$\left(\frac{N_y}{A_{кр}} + \frac{M_x}{W_x} \right) \cdot \gamma_n \cdot k_2 \leq R_y \cdot \gamma_c$$

Формула для определения шага узлов несущей конструкции исходя из прочности кронштейнов системы имеет вид:

$$c_2 \leq \frac{q_y \cdot W_x \cdot A \cdot B \cdot \gamma_n \cdot k_2}{R_y \cdot \gamma_c \cdot A_{кр} \cdot W_x - A \cdot M_x \cdot \gamma_n \cdot k_2}$$

В заключение следует отметить, что проектирование конструкции с зубчатыми узловыми креплениями облицовки на основе разработанной методики, позволит расширить область эффективного применения навесных фасадных систем с отделкой панелями из композитных материалов для зданий, возводимых во всех районах РФ, в том числе с сейсмичностью до 9 баллов по шкале МСК-64.

В приложении 1 диссертации приведены основные конструктивные детали и узлы разработанной навесной фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.

В приложении 2 приводится справка о внедрении результатов диссертационной работы в практику проектирования и монтажа навесных вентилируемых фасадных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. Разработана принципиально новая конструкция навесной вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей.
2. Экспериментально определены оптимальные геометрические параметры конструктивных элементов зубчатого узла (для точного изготовления конструктивных элементов и технологичного их сопряжения в узле):
 - величина входной части икли – 3,58 мм (3 зуба);
 - толщина полок кронштейна каретки – 1 мм;
 - количество зубьев кронштейна каретки – 8 шт.
3. На основании анализа результатов эксперимента получена картина напряженно-деформированного состояния и несущей способности зубчатого узла конструкции:
 - разрушающая нагрузка составила 3,850 кН (что достаточно для использования системы во всех ветровых районах в зданиях повышенной этажности);
 - максимальные напряжения при растяжении узлового соединения – 3,725 кН/см²;
 - на момент разрушения суммарное удлинение составило 4,1 мм;
 - деформации зубчатого кронштейна каретки (как показали испытания, наиболее нагруженного элемента узла) составили: раскрытие полок – 4,9 мм, смятие углов полок – 3 мм; поворот кронштейна – 3°;
 - прогиб задней стенки каретки составил 3,0 мм;
 - выявлено, что зубья кронштейна и зубчатая икля видимых деформаций (сколов и вмятин) не имели.
4. По результатам экспериментальных исследований выявлено, что для обеспечения свободных перемещений при температурных воздействиях в заклёпочных соединениях необходимо размещать «головку» заклёпки в овальном отверстии и производить запрессовку стержня в круглом отверстии. Максимально возможное усилие, возникающее в дренажном профиле от температурных воздействий, составляет 0,088 кН. Дополнительными напряжениями в несущих кронштейнах от температурных воздействий, ввиду их небольшой величины (~ 1,5 % от предельно допустимых) в расчете можно пренебречь.
5. По результатам численного расчета получена картина напряженно-деформированного состояния навесной вентилируемой фасадной системы с узловым зубчатым креплением облицовки:
 - максимальные напряжения в кронштейне (в угловой зоне фасада на высоте 75 м) составили 38,72 МПа, что значительно ниже максимально допустимого 117 МПа;
 - максимальные перемещения кронштейна составили 2,0 мм, что ниже предельно допустимых перемещений, равных 4,2 мм.

6. Сравнительный анализ результатов расчета по нормативной методике с результатами эксперимента и численного расчета позволяет заключить:

– напряжения, полученные численным расчетом на 7% ниже напряжений, определенных по нормативной методике, что объясняется совместной работой всех элементов системы, учтенной в численном расчете;

– напряжения и деформации, определенные экспериментально ниже на 5 % в сравнении с результатами численного расчета.

7. Экспериментальные и численные исследования подтвердили возможность эффективного использования разработанной конструкции фасадной системы в зданиях повышенной этажности (высотой до 75 м) для всех ветровых районов РФ.

8. По результатам испытания на вибростенде установлено, что разработанная система навесного вентилируемого фасада с облицовкой алюминиевыми композитными панелями обладает повышенной сейсмостойкостью в сравнении с типовыми системами. Использование узлового крепления облицовки к несущей конструкции и наличие дополнительных связей в конструктивной схеме привело к рассеиванию энергии системы от действия динамической нагрузки и, как следствие этого – к гашению энергии колебаний. Система фасада с облицовкой элементами кассетного типа из алюминиево-композитного материала может быть рекомендована для применения в районах с сейсмичностью $7 \div 9$ баллов по шкале MSK-64.

9. На основе экспериментальных и численных исследований прочности элементов системы при действии статических и динамических нагрузок разработана методика расчёта количества узлов несущей конструкции. Получено значение понижающего коэффициента $k_1 = 0,037$, учитывающего совместную работу кронштейна каретки с кареткой при их внецентренном растяжении. Определено значение понижающего коэффициента $k_2 = 0,93$ (7 %), учитывающего совместную пространственную работу всех элементов системы. Получена формула для определения шага узлов конструкции в зависимости от прочности элементов крепления облицовки (c_1). Получена формула для определения шага узлов конструкции в зависимости от прочности кронштейнов системы (c_2).

10. На основе численных исследований определены технико-экономические показатели системы. Материалоемкость системы для глухой части стены составляет 2 кг/м^2 , что значительно ниже материалоемкости существующих типовых систем, составляющей $3,5 \text{ кг/м}^2$.

11. Разработаны конструктивные детали и узлы системы с зубчатым узловым креплением облицовки, которые можно использовать при проектировании навесных вентилируемых фасадов конкретных объектов.

Перспективами дальнейшей разработки темы могут являться:

– исследования повышения тепловой эффективности наружных стен зданий с применением навесных фасадных систем, включая

разработанную конструкцию с зубчатыми узловыми креплениями панелей из композитных материалов;

– исследования огнестойкости и пожарной безопасности навесного вентилируемого фасада с зубчатым узловым креплением облицовки из алюминиевых композитных панелей;

– исследования несущей способности и эксплуатационной надёжности навесного вентилируемого фасада с облицовкой алюминиевыми композитными панелями с учётом температурно-влажностных воздействий.

Основные положения диссертационной работы содержатся в следующих публикациях:

Публикации в журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Емельянов Д.А. Предложение по совершенствованию несущей системы навесного вентилируемого фасада из композитного материала / Д.А. Емельянов // Промышленное и гражданское строительство. – 2012, - №12. - С. 28-30.

2. Емельянов Д.А. Узловые соединения элементов в несущих системах навесных вентилируемых фасадов / Д.А. Емельянов, В.М. Туснина // Промышленное и гражданское строительство. – 2013, - №9. - С. 11-13.

3. Емельянов Д.А. Исследование сейсмостойкости навесной фасадной системы с облицовкой кассетами из композитного материала / В.М. Туснина, Д.А. Емельянов // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, - №7. - С. 62-65.

4. Емельянов Д.А. Экспериментальные исследования узлов крепления отделочных кассет для систем навесных вентилируемых фасадов / В.М. Туснина, Д.А. Емельянов // Промышленное и гражданское строительство. – 2015, - №3. - С. 46-49.

5. Емельянов Д.А. К вопросу расчёта и проектирования навесных вентилируемых фасадных систем / В.М. Туснина, Д.А. Емельянов // Промышленное и гражданское строительство. – 2016, - №3. - С. 38-42.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus:

6. Emelyanov D.A. Design of a Suspended Ventilated Fasade with composite Fasing / V.M. Tushina, D.A.Emelyanov, O.A. Tushina // Scopus. Applied Mechanics and Materials Vols. 578-579 (2014) – pp 226-229.

Публикации в других научных журналах и изданиях:

7. Емельянов Д.А. Разработка конструктивного решения навесного вентилируемого фасада с облицовкой из композитного материала. / Д.А. Емельянов // Семнадцатая международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной фундаментальным научным исследованиям в строительстве: «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». Материалы докладов / Москва, 2014. – С. 226-229.