

*На правах рукописи*



**Емельянов Алексей Андреевич**

**РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ФАСАДНОЙ СИСТЕМЫ  
С ГИБКИМИ СВЯЗЯМИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
СТЕНОВОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015

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: **ФГБОУ ВПО «Казанский государственный  
архитектурно-строительный университет»**

Защита состоится «21» декабря 2015 года в 14 час 00 мин, на заседании диссертационного совета Д 212.138.04, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, "Открытая сеть" (аудитория №9).

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Каган Павел Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Высокие темпы роста монтажа навесных фасадных систем в России обуславливаются возросшей потребностью утепления наружных стен зданий и придания архитектурной выразительности фасаду.

В настоящее время существует большое количество конструкций, применяемых для отделки наружных стен зданий, которые отличаются конструктивным решением несущей и ограждающей частей фасадной системы. Широкое распространение в России получили навесные фасадные системы с использованием в качестве облицовочного материала керамогранитных плит. Применение в навесных фасадах материалов с различной теплопроводностью (металлических элементов несущей конструкции и теплоизоляционного материала) приводит к тому, что не обеспечивается теплотехническая однородность наружных стен и снижается приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции.

Актуальность диссертационных исследований обусловлена необходимостью усовершенствования системы навесного вентилируемого фасада с целью повышения теплотехнической однородности наружных стен зданий, снижения материалоемкости несущих конструктивных элементов и расширения области применения таких систем в зданиях повышенной этажности в условиях динамических воздействий.

Известно, что наружные стены с применением навесных фасадных систем являются многослойными неоднородными конструкциями, подвергающимися комплексу силовых и не силовых воздействий, влияющих не только на их несущую способность, но и на срок службы ограждающих конструкций зданий. Однако, пришедшие с Запада и широко применяемые сегодня в нашей стране, навесные фасадные системы остаются недостаточно изученными с точки зрения адаптации их к условиям строительства в России. В связи с чем, исследование влияния конструктивных особенностей фасадной системы с гибкими связями на несущую способность и тепловую

эффективность стенового ограждения в зданиях повышенной этажности для различных ветровых и сейсмических районов России представляется сегодня важной актуальной задачей.

**Степень разработанности темы диссертации.** Исследованиями в области совершенствования ограждающих конструкций зданий с целью повышения их несущей способности и эксплуатационных качеств занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Известны работы по изучению прочности и деформативности навесных фасадных систем А.В. Грановского, Д.А. Киселева, М.Г. Александрия, А.Б. Крутилина, И.Л. Корчинского, А.Ю. Кудряшова и др. Исследованиям теплофизических свойств посвящены работы В.Г. Гагарина, Н.И. Ватина, А.Р. Туснина, В.В. Козлова, М.В. Петроченко, В.А. Езерского, В.М. Тусниной, Christoph Tanner, Christoph Zürcher и др.

Однако влияние конструктивных особенностей фасадных систем на их несущую способность и тепловую эффективность наружных стен до настоящего времени остается недостаточно изученным.

**Научно-техническая гипотеза** – применение гибких связей взамен жестких кронштейнов несущей конструкции навесного фасада позволит повысить теплотехническую однородность и, как следствие, приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен зданий.

**Цель работы** – повышение тепловой эффективности стенового ограждения зданий за счет применения фасадной системы с гибкими связями несущей конструкции и узловым креплением облицовки.

**В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:**

1. Анализ существующих навесных фасадных систем для выявления конструктивных особенностей, влияющих на теплотехническую однородность системы утепления наружных стен зданий, материалоемкость несущей конструкции фасада и область применения в зависимости от высоты здания и района строительства.

2. Исследование влияния неоднородных включений в конструкциях фасадных систем на теплотехнические свойства наружных стен зданий на основе численного расчета трехмерного температурного поля.

3. Разработка конструкции на гибких связях с узловым креплением облицовки на основе анализа результатов теоретических и численных исследований несущей способности и эксплуатационной надежности фасадной системы с учетом влияния особенностей района строительства и этажности здания.

4. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния и несущей способности разработанной фасадной системы при действии динамических нагрузок.

5. Исследование прочностных и деформационных характеристик конструкции с гибкими связями.

6. Изучение напряженно-деформированного состояния разработанной конструкции с гибкими связями при действии динамических нагрузок на основе конечно-элементного моделирования.

**Объектом исследования** является конструкция навесной фасадной системы на гибких связях с узловым креплением облицовки.

**Предметом исследования** является тепловая эффективность конструкции навесной фасадной системы на гибких связях с узловым креплением облицовки.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- установлено влияние геометрических параметров конструкции гибких связей фасадной системы на тепловую эффективность наружных стен зданий;

- получена трехмерная картина распределения температуры в стационарном поле наружных стен с фасадными системами на гибких и жестких связях;

- усовершенствована методика теплотехнического расчета наружных стен зданий с фасадными системами на гибких связях;

- получены данные о несущей способности фасадной системы с гибкими связями при действии динамических нагрузок.

**Методология и методы диссертационного исследования** обеспечиваются использованием экспериментальных и теоретических исследований отечественных и зарубежных ученых, согласованием исходных положений с общеизвестными методами научных исследований, базирующихся на фундаментальных принципах строительной механики и теплофизики.

**Теоретическое и практическое значение исследования.**

1. Предложена навесная фасадная система на гибких связях с узловым креплением керамогранитных плит для строительства и реконструкции зданий высотой до 75 метров в различных климатических районах России, характеризующаяся повышенным сопротивлением теплопередаче и меньшей материалоемкостью в сравнении с существующими аналогами.

2. Разработан альбом конструктивных решений предлагаемой фасадной системы для практического использования при проектировании и строительстве зданий повышенной этажности в различных климатических районах России.

3. Усовершенствована методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен зданий с фасадными системами на гибких связях.

4. Предложены критерии оценки параметров предельных состояний систем для идентификации их технического состояния в зависимости от характерных особенностей и количественных показателей повреждений на основе анализа базы данных результатов испытаний на виброплатформе существующих конструкций навесных фасадов с облицовкой керамогранитными плитами.

5. Установлено, что предложенная конструктивная система хорошо демпфирует колебания. Конструкция гибких связей обеспечивает рассеивание энергии системы от действия динамических нагрузок и, как

следствие этого, приводит к уменьшению ускорений несущей конструкции навесного фасада, что важно учитывать для повышения безопасности эксплуатации зданий.

**Достоверность результатов и выводов** заключается в корректности постановки задач, строгостью применяемых методов строительной физики, статики и динамики строительных конструкций. Результаты численных расчетов в вычислительных комплексах подтверждаются хорошей сходимостью экспериментальных данных и расчетов по инженерной методике.

### **Реализация результатов работы.**

Конструктивное решение на гибких связях с узловым креплением облицовки использовано при модернизации навесной фасадной системы «Альт-фасад-02» на объекте: «Торгово-офисный центр по адресу: г. Тверь, ул. Красина, д. 70» для решения задач по улучшению характеристик системы с облицовкой керамогранитными плитами. В результате внедрения разработанной конструкции на гибких связях установлено, что затраты на отопление здания в зимний период снизились на 8%.

### **На защиту выносятся:**

1. Разработанное конструктивное решение навесной фасадной системы на гибких связях с узловым креплением облицовки.
2. Результаты численного анализа тепловой эффективности фасадной системы на гибких связях.
3. Усовершенствованная методика определения приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции с навесной фасадной системой на гибких связях.
4. Результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния системы на гибких связях при действии динамических нагрузок.
5. Результаты экспериментальных исследований несущей способности системы с гибкими связями на действие динамических нагрузок.

**Личный вклад** автора диссертации заключается в совершенствовании конструкции навесного фасада с облицовкой из керамогранитных плит; совершенствовании методики теплотехнического расчета навесных фасадных систем и получении коэффициентов теплотехнической однородности стенового ограждения для различных типов крепления облицовочных плит; в проведении экспериментальных исследований и обработке их результатов; в выполнении численного анализа на основе конечно-элементного моделирования системы и сравнении экспериментальных и теоретических результатов; в формулировке заключений и выводов диссертационного исследования, имеющих научную новизну и практическую значимость.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на международных научно-практических конференциях:

– Пятнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», Москва, МГСУ, апрель 2012г.;

– Семнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», Москва, МГСУ, апрель 2014г.

**Публикации.** Основные положения диссертации и результаты исследований опубликованы в шести печатных трудах, из них четыре в журналах, рекомендуемых ВАК РФ и одна статья в журнале, включенном в базу данных и систем цитирования Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (176 наименований), двух приложений и содержит 163 страницы машинописного текста, в том числе: 80 рисунков, 24 таблицы.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и степень её разработанности, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, названы объект и предмет исследования, отмечена методология исследования, поставлены цель и задачи диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу состояния изучаемого вопроса и обоснованию выбранного направления исследований. Проведен обзор экспериментально-теоретических научных исследований, выполненных Российскими и зарубежными специалистами в области конструктивного совершенствования навесных фасадных систем с целью повышения их несущей способности и тепловой эффективности.

Наиболее известными исследованиями в этой области являются работы М.Г. Александрия, В.Г. Гагарина, А.В. Грановского, Д.А. Киселева, А.В. Казакевича, Т.А. Корнилова, А.Б. Крутилина, А.Ю. Кудряшова, Г.А. Кузнецова, А.А. Рахматуллина, Т.И. Мамедова, Д.М. Лаковского, П.В. Леднева, А.Е. Пискуна, А.В. Сусарова, Л.Р. Хайруллина, Г.Н. Шмелева.

Проведенный анализ российских и зарубежных исследований теплотехнических свойств навесных фасадных систем показал, что важным фактором, влияющим на теплотехнические свойства конструкции, является наличие теплопроводных включений в виде крепежных элементов, главными из которых являются кронштейны, значительно снижающие коэффициент теплотехнической однородности конструкции.

Изучению теплофизических свойств неоднородных ограждающих конструкций зданий посвящены исследования российских ученых: Н.И. Ватина, В. Г. Гагарина, В.В. Козлова, В.Д. Мачинского, К.Ф. Фокиной, В.Н. Богословского, М.В. Петроченко, А.Р. Туснина, В.М. Тусниной, Ю.А. Табунщикова, Н.Н. Щербака, В.И. Лукьянова, Н.П. Умняковой, В.А. Езерского и др. В этих работах рассматриваются вопросы теплопроводности через наружные стены с навесными фасадными системами, как через сложные, неоднородные ограждения.

Среди зарубежных исследований в этой области следует выделить работы: Berger, Brown, Ciampi, Citterio, Christoph Tanner, Christoph Zürcher, Cziesielski, Dagnall, Elenbaas, Frank, Garden, Gertis, Kinzel, Liersch, Lopez Rivadulla, Meyer, Naylor, Peer, Rousseau, Salonvarra, Sparrow, Tanda, Tanner.

По результатам обзорного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены основные направления исследований.

**Вторая глава** посвящена разработке конструктивного решения навесной фасадной системы на гибких связях с узловым креплением керамогранитных плит на основе численного анализа и экспериментального исследования опытной партии проектируемой конструкции.

Анализ особенностей конструктивных решений существующих навесных фасадных систем показал, что во всех типовых конструкциях для крепления системы к основанию используются жесткие кронштейны, которые вносят существенный вклад в неоднородность ограждающей конструкции здания, так как являются «мостиками холода».

Конструктивные особенности разработанной системы (см. рис. 1) позволяют повысить теплотехническую однородность за счет сокращения количества несущих кронштейнов, которые устанавливаются в железобетонные перекрытия с шагом соответствующим высоте этажа. Важными отличительными особенностями конструкции с гибкими связями в отличие от существующих систем являются: отсутствие жестких направляющих в несущей конструкции и узловое крепление облицовки. Крепление облицовки осуществляется на анкерных резьбовых шпильках в узловых точках с шагом соответствующим размеру керамогранитных плит. В качестве гибких связей в конструкции используются перфоленты, устанавливаемые вертикально между анкерными резьбовыми шпильками и кронштейнами.

Изготовление экспериментальной партии элементов разработанной конструкции показало технологичность массового производства таких систем. Установлено, что затраты на изготовление несущей конструкции

составляют около 25% от стоимости системы, что значительно дешевле изготовления типовых конструктивных решений.

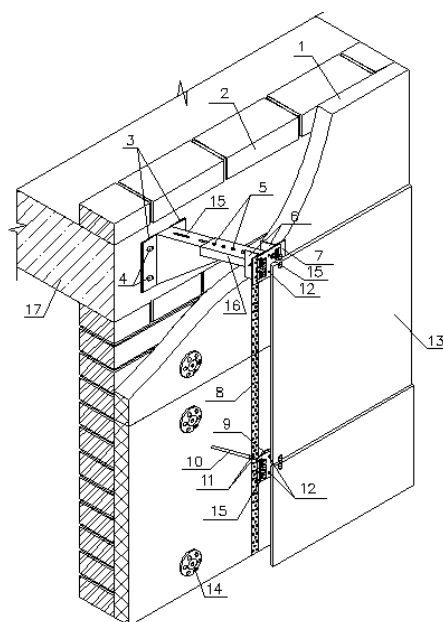


Рисунок 1 – Разработанная конструкция НФС с гибкими связями для облицовки керамогранитом

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1 – утеплитель;                                       | 9 – обратная часть резьбовой шпильки; |
| 2 – стена;  | 10 – анкерная резьбовая шпилька;      |
| 3 – паранитовая прокладка;                            | 11 – шайба с самоконтрящейся гайкой;  |
| 4 – анкерный дюбель;                                  | 12 – заклепка;                        |
| 5 – болт М8 с двумя шайбами и самоконтрящейся гайкой; | 13 – плита керамогранита;             |
| 6 – уголок крепления пластины;                        | 14 – тарельчатый дюбель;              |
| 7 – пластина крепления кляммера;                      | 15 – несущий кронштейн;               |
| 8 – перфолента;                                       | 16 – удлинитель кронштейна;           |
|   | 17 – перекрытие;                      |

**Третья глава** посвящена численным исследованиям теплотехнических свойств системы и совершенствованию методики теплотехнического расчета таких конструкций.

Как известно, навесные фасадные системы являются многослойными, теплотехнически неоднородными конструкциями в которых несущие элементы являются теплопроводными включениями (рис.2). Инженерная методика теплотехнического расчета ограждающей конструкции, базирующаяся на нормируемом уровне тепловых потерь, при определении приведенного сопротивления теплопередаче конструкции позволяет учесть потери тепла через неоднородные включения, имеющиеся в стене.

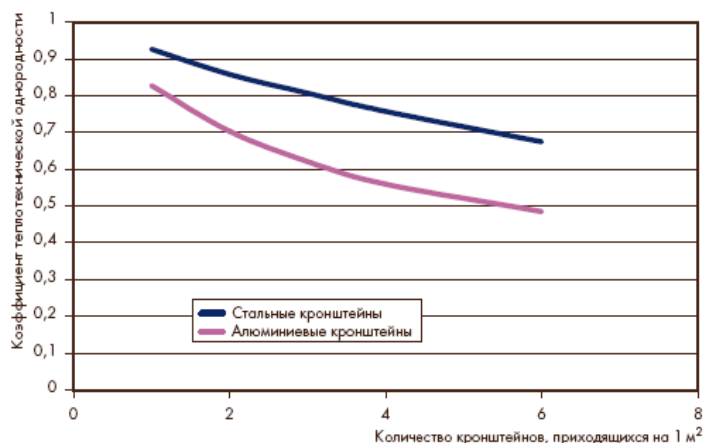


Рисунок 2 –График зависимости коэффициента теплотехнической однородности от количества кронштейнов, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> фасада (при площади поперечного сечения кронштейна 2 см<sup>2</sup>)

В этом случае приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции рассчитывается по формуле:

$$R_0^{\text{пр}} = \frac{1}{U + \sum l_i \cdot \varphi_i + \sum n_k \cdot x_k}, \quad (1)$$

где  $U$  – коэффициент теплопередачи по глади конструкции,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ ;

$\varphi_i$  – удельные потери теплоты через линейную неоднородность  $i$ -го вида,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$ ;

$l_i$  – протяженность линейной неоднородности  $i$ -го вида, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, м/м<sup>2</sup>;

$x_k$  – удельные потери теплоты через точечную неоднородность  $k$ -го вида,  $\frac{\text{Вт}}{\text{°C}}$ ;

$n_k$  – количество точечных неоднородностей  $k$ -го вида, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, шт./м<sup>2</sup>.

Значение величины  $U$  рассчитывается по формуле:

$$U = \frac{1}{R_0^{\text{усл}}} = \frac{1}{1/\alpha_{\text{в}} + \sum_s \frac{\delta}{\lambda} + 1/\alpha_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где  $R_0^{\text{усл}}$  – условное сопротивление теплопередаче по глади конструкции,  $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$ ; остальные условные обозначения в этой формуле хорошо известны и для краткости изложения опускаются.

Дополнительные потери теплоты через теплотехнические неоднородности ограждающих конструкций выражаются формулой:

$$\Delta U = \Sigma(l_i \cdot \Psi_i) + \Sigma(n_k \cdot x_k), \quad (3).$$

В действующих нормах приводится методика определения величины « $\psi$ » и « $x$ » с помощью численных расчетов двумерных температурных полей. Однако такая методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции не позволяет полноценно учесть все неоднородности конструкции, является неточной и трудоемкой для применения в практике проектирования.

Настоящие исследования тепловой эффективности разработанной конструкции в сравнении с существующими системами проводилось на основе теплотехнического расчета трехмерного температурного поля с использованием вычислительного комплекса «ТЕРЛ», который неоднократно тестировался сравнением результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в тепловой камере.

В результате численного расчета трехмерного температурного поля определяется приведенное сопротивление теплопередаче, являющееся основным теплотехническим показателем, определяющим способность конструкции сопротивляться прохождению через неё тепла.

Для сравнительного анализа тепловой эффективности конструкций теплотехнический расчет выполнялся для трех вариантов навесных фасадных систем: типовой (система 1), разработанной (система 2) и идеализированной (однородной), с облицовкой из керамогранитных плит размером 600×600мм.

Моделировалась регулярно повторяющаяся часть фасада по высоте между двумя соседними перекрытиями, по ширине – один ряд кронштейнов. С целью учета тепловых потерь, происходящих через угловые зоны сопряжения стены с перекрытием, моделировались соответствующие части перекрытий.

Для получения достоверных результатов расчет трехмерного температурного поля исследуемых систем выполнялся при различной точности (0.1 – 0.00001 град).

Результаты расчета представлены в табличном (табл.1) и графическом (рис. 3) видах.

Как видно из графиков, с повышением точности расчета, результаты для всех трех систем сходятся к определенному пределу. Увеличение точности расчета более 0.001 град, практически не влияет на изменение сопротивления теплопередаче. Из чего можно сделать вывод, что достаточно достоверный результат можно получить при точности расчета 0.001 град. В таблице 1 строка, соответствующая выбранной оптимальной точности расчета, выделена жирным шрифтом.

Как видно из таблицы 1, приведенное сопротивление теплопередаче разработанной системы ( $1,352 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$ ) превосходит сопротивление типовой системы ( $1,199 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$ ) на 11.3%.

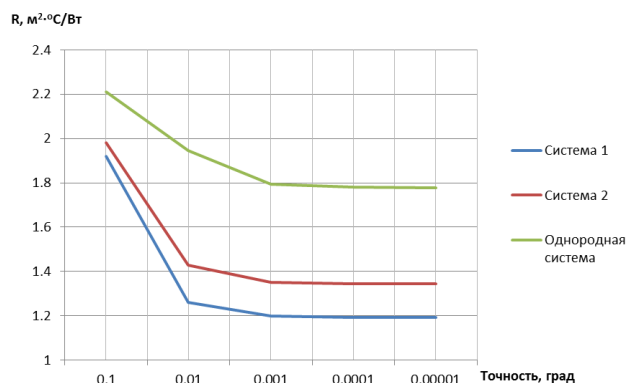


Рисунок 3 – Графики зависимости приведенного сопротивления теплопередаче от заданной точности расчета температурного поля

Таблица 1

Сравнение теплотехнических характеристик исследуемых систем

Точность расчета, град	Приведенное сопротивление теплопередаче $R, \text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$			Разница, %	Коэффициент однородности $r$	
	Система 1	Система 2	Однородная система		Система 1	Система 2
0.1	1.9186	1.9797	2.2122	3.1%	0.867	0.895
0.01	1.2602	1.4287	1.9462	11.8%	0.648	0.734
<b>0.001</b>	<b>1.1989</b>	<b>1.3518</b>	<b>1.7951</b>	<b>11.3%</b>	<b>0.668</b>	<b>0.753</b>
0.0001	1.1939	1.3449	1.7803	11.2%	0.671	0.755
0.00001	1.1934	1.3442	1.7791	11.2%	0.671	0.756

В результате численного расчета теплотехнических свойств исследуемых систем получены картины изополей температур: в местах установки типового кронштейна (рис. 4) и анкерной резьбовой шпильки (рис. 5). Как видно, области пониженных температур на поверхности стены в местах расположения шпилек (рис.5) намного меньше, чем в области кронштейнов (рис.4).

Теплотехнический расчет исследуемых систем показал, что разработанная конструкция с гибкими связями крепления облицовки обладает повышенным коэффициентом однородности (0.753) в сравнении с типовой конструкцией (0.668).

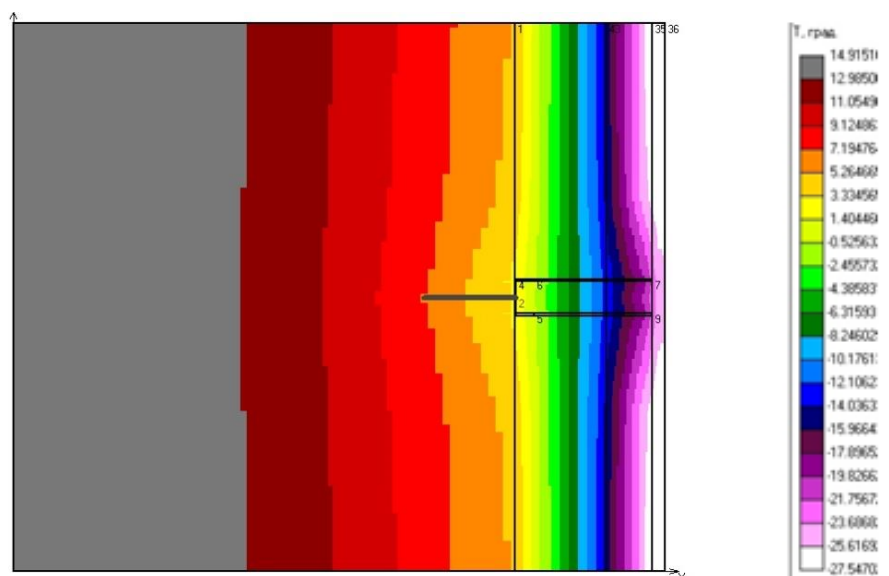


Рисунок 4 – Изополя температур в области установки типового кронштейна («система 1»)

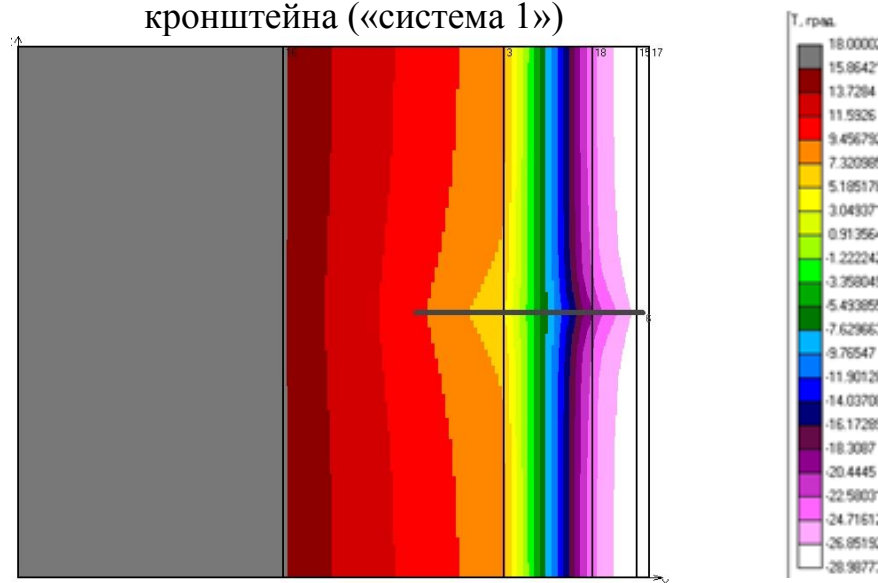


Рисунок 5 – Изополя температур в области установки анкерной резьбовой шпильки («система 2»)

На основе точного теплотехнического расчета с использованием вычислительного комплекса «ТЕРП»:

– установлено, что разработанная конструкция НФС с гибкими связями обладает большим приведенным сопротивлением теплопередаче, чем существующие системы, в среднем на 11%.

– изучено распределение температур в трехмерном тепловом поле исследуемых систем: картины изополей температур наглядно показали большую теплотехническую однородность разработанной конструкции в сравнении с существующими системами.

– получены значения коэффициентов теплотехнической однородности разработанной (0,753) и существующих (0,668) конструкций, которые можно рекомендовать для использования в инженерных теплотехнических расчетах при проектировании зданий.

Экономическая оценка тепловой эффективности разработанной НФС позволяет заключить, что применение гибких связей в конструкции позволяет снизить затраты на отопление здания на 6-10%.

Усовершенствована методика теплотехнического расчета наружной стены применительно к НФС на гибких связях, позволяющая учитывать все теплопроводные включения в ограждающей конструкции и снизить трудоемкость расчета.

**Четвертая глава** посвящена численным и экспериментальным исследованиям прочности и деформативности разработанной конструкции при действии статических и динамических нагрузок.

Численные исследования конструкции проводились на основе сравнительного анализа расчетов по инженерной методике и с использованием ВК ЛИРА.

Расчет производился для угловых и рядовых зон фасада при различных высотах здания и вылетах несущих кронштейнов системы применительно для 1 и 7 ветровых районов России.



Значения расчетных нагрузок в различных зонах фасада в зависимости от высоты здания и ветрового района приведены в табл. 2 – 5.

Таблица 2

Значения расчётной ветровой нагрузки в угловой зоне фасада в зависимости от высоты здания и ветрового района

Значение расчётной ветровой нагрузки в угловой зоне фасада, кПа		
Ветровой район	Высота здания Z = 5 м	Высота здания Z = 75 м
1	0,702	2,446
7	2,594	9,041

Таблица 3

Значения расчётной ветровой нагрузки в рядовой зоне фасада в зависимости от высоты здания и ветрового района

Значение расчётной ветровой нагрузки в рядовой зоне фасада, кПа		
Ветровой район	Высота здания Z = 5 м	Высота здания Z = 75 м
1	0,386	1,346
7	1,427	4,973

Таблица 4

Значения расчётной горизонтальной нагрузки в угловой зоне фасада в зависимости от высоты здания и ветрового района (для несущего кронштейна и анкерной резьбовой шпильки)

Значение горизонтальной нагрузки $N_y = q_{yx} \cdot S_{гр}$ кН в угловой зоне фасада (несущий кронштейн)		
Ветровой район	Высота здания Z = 5 м	Высота здания Z = 75 м
1	1,264	4,404
7	4,670	16,274
Значение горизонтальной нагрузки $N_y = q_{yx} \cdot S_{гр}$ кН в угловой зоне фасада (шпилька)		
Ветровой район	Высота здания Z = 5 м	Высота здания Z = 75 м
1	0,253	0,881
7	0,934	3,255

Таблица 5

Значения расчётной горизонтальной нагрузки в рядовой зоне фасада в зависимости от высоты здания и ветрового района (для несущего кронштейна и анкерной резьбовой шпильки)

Значение горизонтальной нагрузки $N_y = q_{yx} \cdot S_{гр}$ кН в рядовой зоне фасада (несущий кронштейн)		
Ветровой район	Высота здания Z = 5 м	Высота здания Z = 75 м
1	0,695	2,422
7	2,568	8,951
Значение горизонтальной нагрузки $N_y = q_{yx} \cdot S_{гр}$ кН в рядовой зоне фасада (шпилька)		
Ветровой район	Высота здания Z = 5 м	Высота здания Z = 75 м
1	0,139	0,484
7	0,514	1,790

Зависимость максимальных напряжений, возникающих в несущем кронштейне угловой зоны фасада, от высоты здания для 1 и 7 ветровых районов показана на рисунке 6. Видно, что при увеличении высоты здания возрастают напряжения в несущем кронштейне в среднем на 35÷54% в зависимости от ветрового района. Увеличение ветровой нагрузки от 1 до 7 ветрового района вызывает увеличение напряжений также на 35÷54% в зависимости от высоты здания.

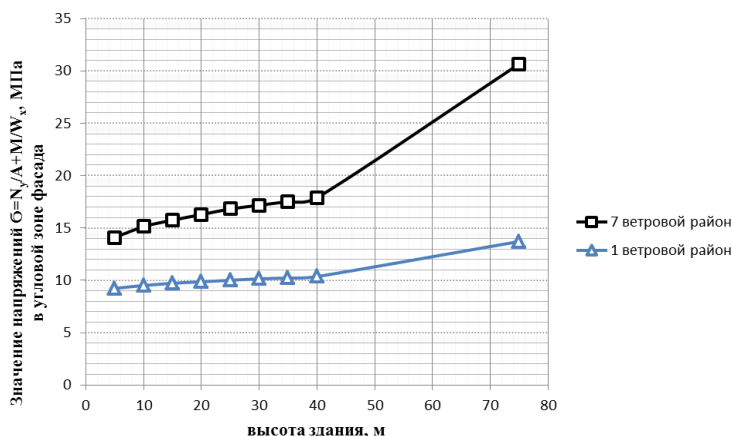


Рисунок 6 –Графики зависимости максимальных напряжений от высоты здания для 1 и 7 ветровых районов (в несущем кронштейне угловой зоны фасада).

Анализируя графики зависимости максимальных напряжений от высоты здания (рис. б) можно заключить, что напряжения в элементах системы, возникающие при действии эксплуатационных нагрузок в угловой и рядовой зонах фасада, значительно ниже предельно допустимых, которые составляют 230 МПа. Следовательно, прочность кронштейнов на растяжение обеспечивается при всех возможных вылетах облицовки в пределах 200мм.

Для оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности разработанной конструкции на гибких связях с учетом совместной работы всех ее элементов были проведены численные исследования системы с использованием ВК «ЛИРА».

Для достоверности результатов численного расчета решались тестовые задачи по назначению сетки разбиения расчетной модели системы на конечные элементы, позволившие принять сетку с размерами 2,5×2,5 мм.

Граничные условия в расчетной схеме задавались в соответствии с фактической работой конструкции и свойствами применяемых конечных элементов.

Характерная картина напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции приведена на рисунке 7. Наибольшие напряжения от действия изгибающего момента в несущем кронштейне возникают в заделке консоли элемента, где концентраторами напряжений являются отверстия под анкерные крепления. Наибольшие перемещения узлового соединения в месте установки несущего кронштейна системы по оси Z и Y фиксируются в пластине кляммера и перфоленте, а по оси X в лапках кляммера.

Численные исследования позволили выявить точную картину напряженно-деформированного состояния разработанной конструкции и заключить, что кронштейны, испытывающие максимальные напряжения, являются наиболее нагруженными элементами системы.

Сравнительный анализ результатов численного расчета с использованием ВК «ЛИРА» и расчета по инженерной методике показал, что значения напряжений, полученные в результате расчета по инженерной методике, превосходят значения напряжений, полученные численным методом в среднем на 10% (рис. 8). Это объясняется тем, что расчет с использованием ВК «ЛИРА» позволил учесть совместную работу всех элементов системы.

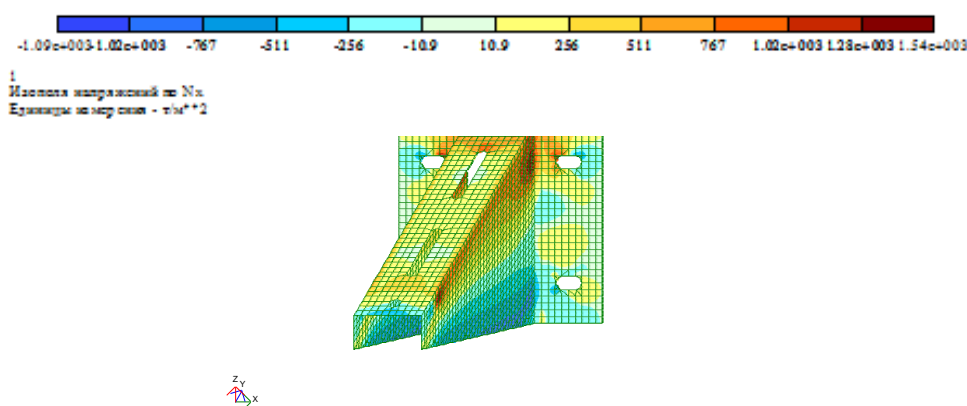


Рисунок 7 – Изополю погонных усилий, действующих в направлении оси Y несущего кронштейна

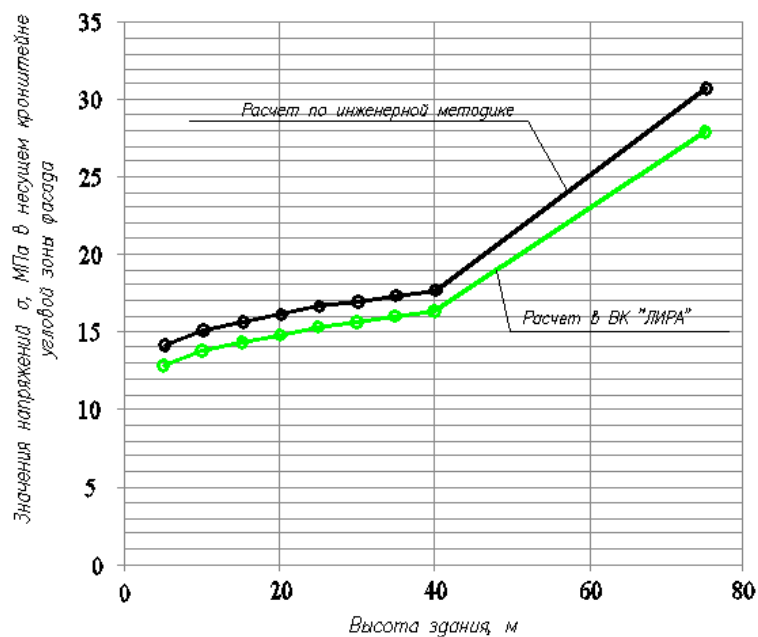


Рисунок 8 – Графики зависимости максимальных напряжений от высоты здания для 7 ветрового района (в несущем кронштейне угловой зоны фасада). Сравнение результатов численного расчета по инженерной методике и расчета в вычислительном комплексе «ЛИРА».

Экспериментальные исследования несущей способности разработанной конструкции фасадной системы с гибкими связями на действие динамических нагрузок, проводились в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко на специальной виброплатформе маятникового типа с использованием вибромашины ВИД-12М (рис.9). Моделировались нагрузки, соответствующие динамическим (сейсмическим) воздействиям 7÷9 баллов и пульсационному воздействию ветра на высоте 75 м от уровня земли.

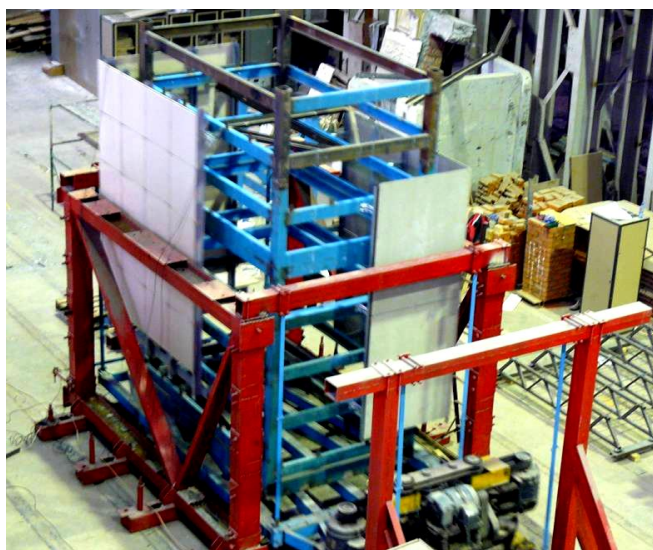


Рисунок 9– Общий вид виброплатформы, с установленным макетом системы

В процессе испытаний ускорение виброплатформы по данным акселерометров изменялось в интервале от 1,13 до 7,77 м/с<sup>2</sup>. Частоты колебания системы изменялись в интервале от 2,1 до 7,2 Гц, амплитуды колебаний системы – от 0,9 до 21,5 мм. При этом ускорение в разных точках фасадных систем изменялось в интервале от 0,01 до 24,84 м/с<sup>2</sup>.

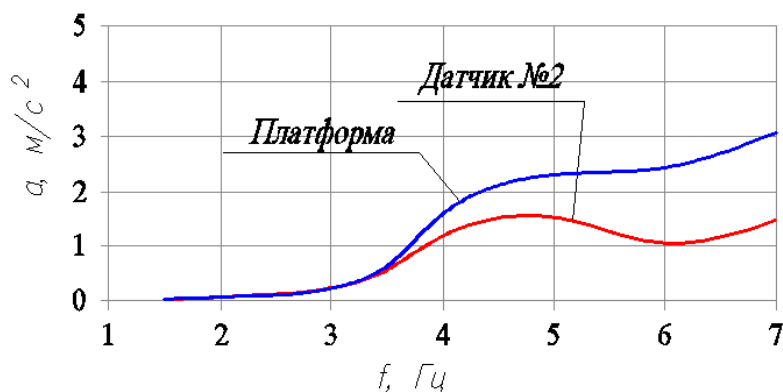


Рисунок 10 – Графики зависимости ускорения от частоты при вертикальных колебаниях. Испытание навесной фасадной системы на гибких связях

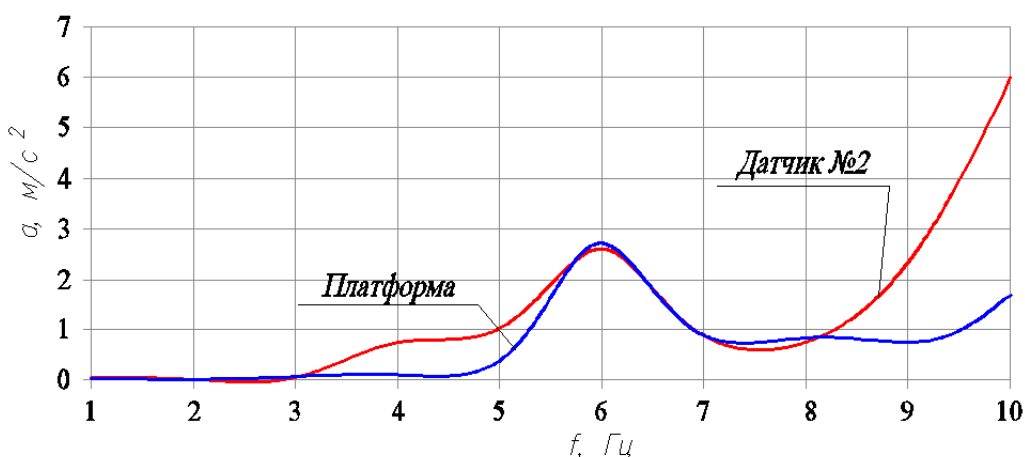


Рисунок 11 – Графики зависимости ускорения от частоты при вертикальных колебаниях. Испытание типовой навесной фасадной системы

Во время испытаний в момент, когда собственные частоты колебаний НФС совпали с вынужденными частотами колебаний виброплатформы, НФС вошла в резонанс. Это явление наблюдалось на разных этапах при частоте  $f=4.4$  Гц. При резонансе эксплуатационная надежность НФС не была нарушена.

Для выявления наиболее слабых элементов конструктивного решения. НФС при испытании была увеличена длительность цикла загрузки до 60-

90 секунд. Разрушение системы произошло в результате чрезмерных деформаций кляммеров.

Как показали испытания, предложенная конструктивная система с гибкими связями при использовании облицовки в виде керамогранитных плит хорошо демпфирует колебания. Наличие в конструктивной схеме НФС гибких связей привело к рассеиванию энергии системы от действия динамической нагрузки и, как следствие этого, к уменьшению ускорений НФС (см. рис. 10, 11). Указанный фактор весьма важен при проектировании конструкций зданий, возводимых в условиях динамических воздействий.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработана навесная фасадная система на гибких связях с узловым креплением керамогранитных плит для строительства и реконструкции зданий высотой до 75 метров, характеризующаяся повышенным сопротивлением теплопередаче и меньшей материалоемкостью в сравнении с существующими аналогами.

2. Получена картина трехмерного распределения температуры в стационарном поле разработанной конструкции (с гибкими связями) и существующей (с жесткими связями) на основе численного анализа тепловой эффективности наружных стен зданий с навесными фасадными системами.

3. Установлено, что разработанная конструкция фасадной системы с гибкими связями обладает большим приведенным сопротивлением теплопередаче, чем существующие системы с жесткими связями, в среднем на 11%.

4. Получены значения коэффициентов теплотехнической неоднородности разработанной ( $\gamma = 0,753$ ) и существующих ( $\gamma = 0,668$ ) конструкций, которые можно рекомендовать для использования в инженерных теплотехнических расчетах при проектировании зданий.

5. Усовершенствована методика теплотехнического расчета наружных стен применительно к навесной фасадной системе на гибких связях,

позволяющая учесть все теплопроводные включения в ограждающей конструкции и снизить трудоемкость расчета.

6. Установлено, что применение разработанной конструкции на гибких связях в навесных фасадных системах обеспечивает снижение затрат на отопление здания в среднем на 6-10%.

7. На основе анализа результатов испытаний существующих и разработанной систем на динамические нагрузки, предложены критерии оценки безопасной эксплуатации конструкций с облицовкой керамогранитными плитами, позволяющие определять группу предельных состояний испытываемой конструкции в зависимости от характерных особенностей и количественных показателей повреждений.

8. По результатам экспериментальных исследований установлено, что наличие в конструкции гибких связей позволяет хорошо демпфировать колебания от действия динамических нагрузок.

9. Выявлено, что материалоемкость системы на гибких связях до 30% ниже материалоемкости существующих фасадных систем с жесткими связями.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы:**

1. Исследования возможности использования стеклопластика в качестве материала несущей конструкции на гибких связях для обеспечения тепловой эффективности и несущей способности систем навесного фасада.

2. Совершенствование системы на гибких связях с узловым креплением облицовки применительно к другим видам отделки, в том числе и к кассетам из композитного материала.

**Основные положения диссертационной работы содержатся в следующих публикациях:**

#### **Публикации в журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Емельянов, А.А. К вопросу проектирования конструкции навесного вентилируемого фасада / А.А.Емельянов // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. - №12. - С. 22-24.

2. Емельянов, А.А. Разработка конструктивного решения фасадной системы из керамогранита / А.А.Емельянов, В.М.Туснина // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. - №12. - С. 87-88.

3. Емельянов, А.А. Анализ теплотехнических свойств различных конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов /О.А.Туснина, А.А.Емельянов, В.М.Туснина // Инженерно-строительный журнал. - 2013. - №8. - С. 54-63.

4. Емельянов, А.А. Пути повышения сейсмостойкости вентилируемых фасадных систем / В.М.Туснина, А.А.Емельянов, А.В.Грановский // Промышленное и гражданское строительство. - 2014. - №11. - С. 57-60.

**Публикации в изданиях, индексируемых Scopus:**

5. Emelyanov, A.A. A Joint of Ceramic Granite Mount by Threaded Anchor Studs in a Suspended Ventilated Façade / V.M. Tushina, A.A. Emelyanov, O.A. Tushina // Scopus. Applied Mechanics and Materials Vols. 578-579 (2014) – pp 615-618.

**Публикации в других научных журналах и изданиях:**

6. Емельянов, А.А. Узловое крепление керамогранита на анкерных резьбовых шпильках в навесном вентилируемом фасаде / А.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. 221-225.