



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

На правах рукописи

**Зимин Сергей Сергеевич**

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ЛИЦЕВОГО СЛОЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КАМЕННЫХ СТЕН  
ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Корсун Владимир Иванович**  
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, профессор

**Официальные оппоненты** доктор технических наук, доцент  
**Савин Сергей Николаевич**  
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра техносферной безопасности, профессор

кандидат технических наук  
**Антаков Алексей Борисович**  
ФГБОУ ВО Казанский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра железобетонных и каменных конструкций, доцент

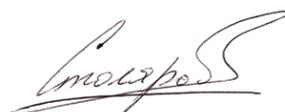
**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»

Защита состоится «15» декабря 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.05.23.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Автореферат разослан "13" ноября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук



Столяров О.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** С начала 2000-х годов, в связи с резким ужесточением требований по энергоэффективности, в практике российского строительства получили широкое распространение железобетонные здания с наружными ненесущими многослойными каменными стенами с гибкими связями между слоями (далее – многослойные стены). Не обладая достаточно развитой отечественной нормативной базой по устройству подобных стен, многие проектные решения были заимствованными из европейских стран, где многослойные стены начали применяться на несколько десятилетий ранее. При этом не было проведено необходимых экспериментально-теоретических исследований, направленных на изучение температурных деформаций многослойных стен и, в первую очередь, лицевых слоев, применительно к климатическим условиям России, где амплитуда сезонных колебаний температуры в определенных регионах может достигать 80°С.

Опыт эксплуатации зданий с наружными многослойными стенами показал, что, во многих случаях, уже в первые годы после завершения строительства, в лицевых слоях образуются и, в ряде случаев, с течением времени получают дальнейшее развитие, повреждения в виде локальных трещин и сколов кирпича в кладке. При этом повреждения образуются и получают дальнейшее развитие в весенний и осенний периоды при смене температурного режима окружающего воздуха, что свидетельствует о существенном вкладе температурных деформаций кладки в поврежденность лицевых слоев.

Сдерживание температурных деформаций кладки лицевого слоя обусловлено отсутствием или недостаточным количеством горизонтальных и вертикальных деформационных швов в лицевом слое, гибкими связями и зависит от конструктивных особенностей (далее – конструктивных параметров) многослойной стены (свес лицевого слоя с плит и пр.), влияние чего на напряженно-деформированное состояние (далее – НДС) лицевого слоя не имеют четкого отражения в СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции». Кроме этого, данный документ позволяет дать оценку прочности кладки только при простых видах ее деформирования, что, зачастую, не соответствует фактической работе лицевого слоя в составе многослойной стены. В СТО 36554501-013-2008 «Методы расчета лицевого слоя из кирпичной кладки наружных облегченных стен с учетом температурно-влажностных воздействий» распределение температуры по толщине лицевого слоя принимается равномерным, а изгиб лицевого слоя игнорируется, что не согласуется с фактической картиной деформирования и требует уточнений. Прямое заимствование решений по многослойным стенам из европейских стран неприемлемо из-за различий в параметрах климатических воздействий.

Актуальность темы исследования определяется необходимостью установления закономерностей формирования НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях в зависимости от конструктивных параметров многослойной стены и законов распределения температуры по толщине лицевого слоя, а также необходимостью развития и совершенствования

инженерной методики расчета лицевых слоев наружных многослойных стен при климатических температурных воздействиях.

**Степень разработанности темы исследования.**

Анализу НДС многослойных каменных стен, а также разработке критериев прочности кладки и моделей ее деформирования посвящены работы следующих ученых и исследователей: Malyszko L, Hendry A.W., Онищик Л.И., Поляков С.В., Семенцов С.А., Page A.W., Гениев Г.А., Lourenco P.V., Гроздов В.Т., Ищук М.К., Орлович Р.Б., Деркач В.Н., Найчук А.Я., Жерносек Н.М., Mann W., Muller H., Mojsilovic N., Marti P. Пангаев В.В., Лобов О.И., Ананьев А.И., Курбатов А.С., Самедов Ф.А., Sinha B.P., Davies S.R., Rots J.G.

Основные вопросы расчета и проектирования многослойных каменных стен отображены в следующих отечественных нормативных документах: СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции», СТО 36554501-013-2008 «Методы расчета лицевого слоя из кирпичной кладки наружных облегченных стен с учетом температурно-влажностных воздействий» и в европейских нормативных документах: EN 1996-2: 2006 «Design of masonry structures. Design considerations, selection of materials and execution of masonry», национальные приложения европейских норм.

**Цель исследования:** установление закономерностей формирования НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях в зависимости от конструктивных параметров многослойной стены и законов распределения температуры по толщине лицевого слоя, а также развитие и совершенствование инженерной методики расчета лицевых слоев наружных многослойных стен при климатических температурных воздействиях.

**Задачи исследования:**

1. Установление закономерностей образования и развития повреждений лицевого слоя, а также определяющих НДС лицевого слоя конструктивных параметров многослойной стены.

2. Установление определяющих для прочности кладки параметров НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях с обоснованием выбора критериев прочности.

3. Определение прочностных характеристик кладки в соответствии с выбранными критериями прочности, а также максимальных усилий в гибких связях.

4. Исследование распределения температуры по толщине лицевого слоя и температурных деформаций лицевого слоя с уточнением значений коэффициентов линейного температурного расширения кладки.

5. Установление закономерностей изменения параметров НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях в зависимости от факторов влияния.

6. Развитие и совершенствование метода расчета лицевого слоя наружных многослойных стен при климатических температурных воздействиях.

**Объект исследования:** лицевой каменный слой наружных многослойных стен с гибкими связями современных железобетонных зданий.

**Предмет исследования:** параметры НДС и характеристики прочности кладки лицевого каменного слоя наружных многослойных стен с гибкими связями при климатических температурных воздействиях.

**Научная новизна:**

1. Численно установлены определяющие для прочности кладки параметры НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях в зависимости от наличия/отсутствия горизонтальных и вертикальных деформационных швов в лицевом слое с обоснованием выбора критериев прочности кладки.

2. Экспериментально определена несущая способность гибких связей на вытягивание из швов кладок лицевого кирпичного и внутреннего газобетонного слоев многослойной стены.

3. Экспериментально установлены законы распределения температуры по толщине лицевого слоя при одностороннем замораживании.

4. Экспериментально уточнены значения коэффициентов линейной температурной деформации кладки лицевого слоя.

5. Численно установлены закономерности изменения параметров НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях в зависимости от факторов влияния.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в установлении закономерностей формирования НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях в зависимости от конструктивных параметров многослойной стены и законов распределения температуры по толщине лицевого слоя.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в развитии и совершенствовании инженерной методики расчета лицевых слоев наружных многослойных стен при климатических температурных воздействиях, что нашло отражение в практике проектирования после выхода в 2016 г. регионального методического документа РМД 51-25-2015 Санкт-Петербург «Рекомендации по проектированию, монтажу и эксплуатации фасадных систем для нового строительства, реконструкции и ремонта жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге», в который включены результаты исследований в части указаний по расчету лицевых слоев, определению расстояния между деформационными швами в лицевых слоях и рекомендаций по проектированию наружных многослойных стен с гибкими связями.

**Методология и методы исследования** базировались на аналитическом обобщении экспериментальных и теоретических результатов исследований касаемых многослойных стен, физическом и математическом моделировании, обработке экспериментальных данных, сопоставлении полученных автором результатов экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных условиях, с соответствующими теоретическими результатами, а также с результатами, полученными другими авторами.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности образования и развития повреждений лицевого слоя многослойных стен и определяющие НДС лицевого слоя конструктивные параметры многослойной стены.

2. Определяющие для прочности кладки параметры НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях и обоснование выбора критериев прочности.

3. Результаты экспериментального определения прочностных характеристик кладки в соответствии с выбранными критериями прочности, а также максимальных усилий в гибких связях.

4. Результаты экспериментального исследования распределения температуры по толщине лицевого слоя и температурных деформаций лицевого слоя с уточненными значениями коэффициентов линейного температурного расширения кладки.

5. Закономерности изменения параметров НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях в зависимости от факторов влияния.

6. Метод расчета лицевого слоя наружных многослойных стен при климатических температурных воздействиях.

**Степень достоверности результатов** обоснована применением базовых понятий сопротивления материалов, теории упругости, строительной механики, а также общепринятых гипотез и допущений современной теории каменных конструкций; подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями лицевого слоя в составе многослойной стены; обеспечена применением стандартных методов испытаний, использованием метрологически аттестованного испытательного оборудования и измерительных приборов.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: конференция «Фасады зданий – проблемы долговечности, ремонт, обслуживание» (2015 г., Жилищный комитет г. Санкт-Петербург); XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (2017 г., МГСУ); Международная научно-практическая конференция «Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям» (2018 г., МГСУ); IX научно-практическая конференция «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения» (2018 г., СПбПУ); V Международная конференция «Белый камень-2019» (2019 г., СПб).

**Внедрением исследований соискателя** явился вышедший в 2016 г. региональный методический документ РМД 51-25-2015 Санкт-Петербург «Рекомендации по проектированию, монтажу и эксплуатации фасадных систем для нового строительства, реконструкции и ремонта жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге», в который включены результаты исследований в части указаний по расчету лицевых слоев и определению расстояния между

деформационными швами в лицевых слоях, а также рекомендаций по проектированию наружных многослойных стен с гибкими связями.

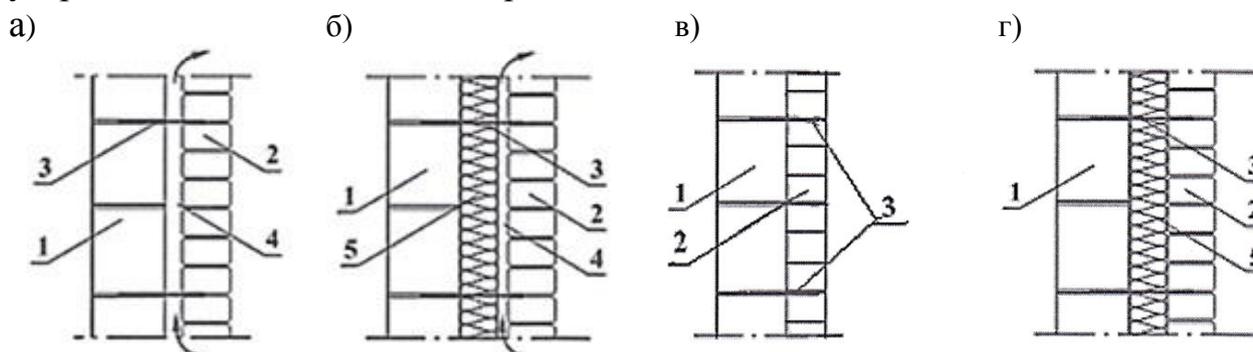
**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 13 печатных работах, общим объемом 5,35 п.л., в том числе 10 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 121 наименования, в том числе 22 зарубежных источников. Работа представлена на 119 страницах печатного текста, содержит 71 рисунок, 11 таблиц, 31 формулу.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимого исследования, представлены степень разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и апробация работы.

В **первой главе** дается анализ конструктивных решений многослойных каменных стен современных железобетонных зданий, основных типов повреждений лицевого слоя, а также анализ результатов исследований и норм проектирования многослойных каменных стен. Наибольшее распространение получили наружные многослойные стены, состоящие из наружного (лицевого) слоя, представленного кирпичной кладкой толщиной 120 мм из пустотелого кирпича с высокой пустотностью (до 40%), внутреннего слоя, представленного кладкой из газобетонных блоков толщиной 400 мм (рисунок 1). Лицевой и внутренний слои соединяются между собой при помощи гибких связей, представленных отдельными стержнями или сетками. Лицевой слой устраивается с поэтажным опиранием со свесом или без свеса с плит.



1 – внутренний каменный слой; 2 – лицевой каменный слой; 3 – гибкие связи;  
4 – вентилируемая воздушная прослойка; 5 – слой теплоизоляции

Рисунок 1 – Схема устройства многослойных каменных стен (разрезы):

а, б – с вентилируемой воздушной прослойкой; в, г – без вентилируемой воздушной прослойки

Наиболее характерными типами повреждений лицевого слоя являются (рисунок 2): вертикальные трещины в угловых зонах стен, повреждения деструктивного характера (сколы кирпича) при сопряжении с плитами перекрытий, выгиб из плоскости стены с вытягиванием гибких связей из швов вплоть до обрушения фрагментов лицевого слоя.

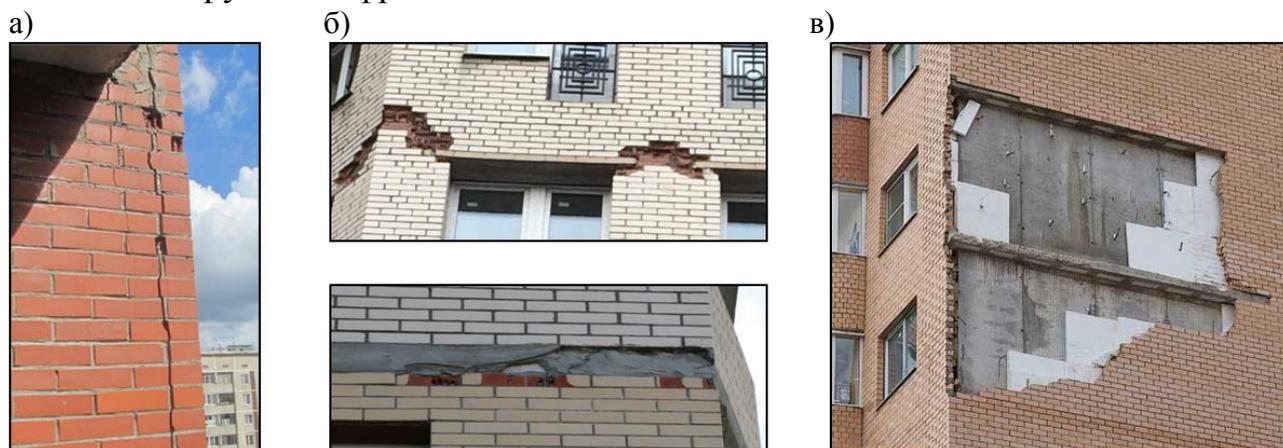


Рисунок 2 – Наиболее характерные повреждения лицевого слоя: а – вертикальные трещины в угловых зонах стен; б – повреждения деструктивного характера (сколы кирпича) при сопряжении с плитами перекрытий; в – выгиб из плоскости стены с обрушением фрагментов лицевого слоя

Существенный вклад в появлении и развитии повреждений вносят: отсутствие горизонтальных деформационных швов между плитами перекрытий и лицевым слоем, что ведет к защемлению лицевого слоя между плитами при реализации его температурных деформаций в вертикальном направлении (рисунок 3 а), и отсутствие вертикальных деформационных швов, что ведет к препятствию реализации температурных деформаций лицевого слоя в горизонтальном направлении (рисунок 3 б).

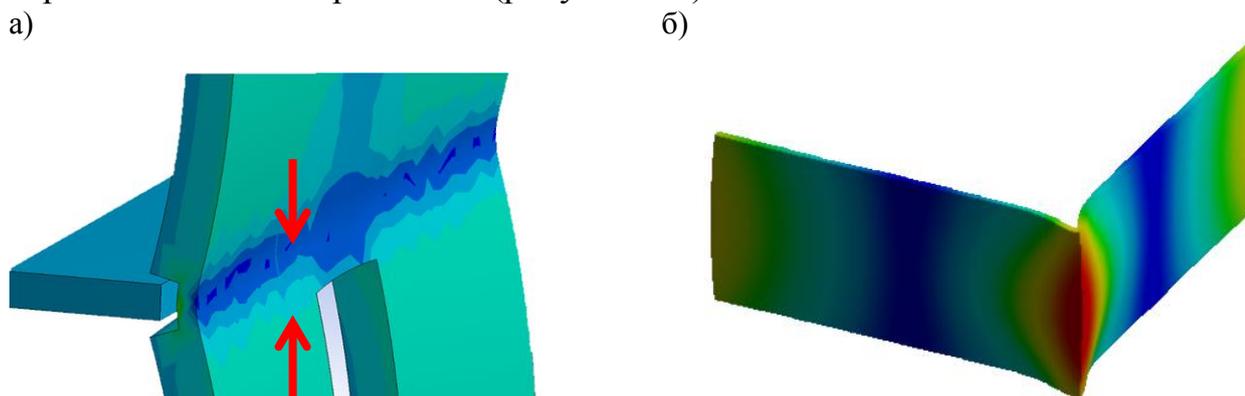


Рисунок 3 – Схема реализации механизма образования повреждений лицевого слоя при повышении температуры: а – выгиба из плоскости стены и сколов при сопряжении с плитами перекрытий; б – вертикальных трещин в угловых зонах

В EN 1996-2: 2006 «Design of masonry structures. Design considerations, selection of materials and execution of masonry» максимальное расстояние между вертикальными деформационными швами  $l_m$  принимается в зависимости от материала кладки (для керамических камней  $l_m=12$  м). В национальных

приложениях европейских норм приводятся уточненные значения  $I_m$  для страны их применения. В соответствии с СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции» рекомендуемое максимальное расстояние между деформационными швами в лицевых слоях для прямолинейных участков составляет 6-7 м, что, учитывая разнообразие климатических условий России, нельзя признать обоснованным.

Во **второй главе** представлено обоснование выбора критериев прочности для лицевого слоя в зависимости от параметров его НДС, результаты лабораторных исследований теплофизических свойств каменной кладки

Для оценки прочности кладки лицевого слоя рационально использовать частные критерии прочности, учитывающие конкретный вид НДС:

- при отсутствии горизонтальных деформационных швов кладка в зоне сопряжения с плитами перекрытий испытывает от стесненных температурных деформаций сжатие. Для данного напряженного состояния применим критерий прочности на основе сжимающих напряжений (1):

$$\sigma_{\alpha c} \leq R_c \quad (1)$$

где  $R_c$  – сопротивление кладки сжатию, определяемое согласно СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции».

- при отсутствии вертикальных деформационных швов определяющими для прочности кладки являются растягивающие напряжения, действующие вдоль растворных швов либо под углом  $\alpha$  к ним. В этом случае применим критерий на основе растягивающих напряжений (2):

$$\sigma_{\alpha t} \leq R_{\alpha t} \quad (2)$$

где  $R_{\alpha t}$  – сопротивление кладки растяжению под углом  $\alpha$  к горизонтальным растворным швам.

Значение  $R_{\alpha t}$  для кладки, выполненной из пустотелого кирпича, можно определять из выражения (3):

$$R_{\alpha t} = \frac{R_{t0}}{1 + (n - 1) \cdot \sin^{\lambda} \alpha} \quad (3)$$

где  $R_{t0}$  – расчетные сопротивление кладки на растяжение вдоль горизонтальных растворных швов;

$n, \lambda$  – коэффициенты, определяемые экспериментально.

- при одновременном отсутствии горизонтальных и вертикальных деформационных швов кладка может испытывать одновременно сжатие перпендикулярно горизонтальным растворным швам и растяжение параллельно швам. Этому виду напряженного состояния более полно соответствует критерий прочности Гениева Г.А. (4):

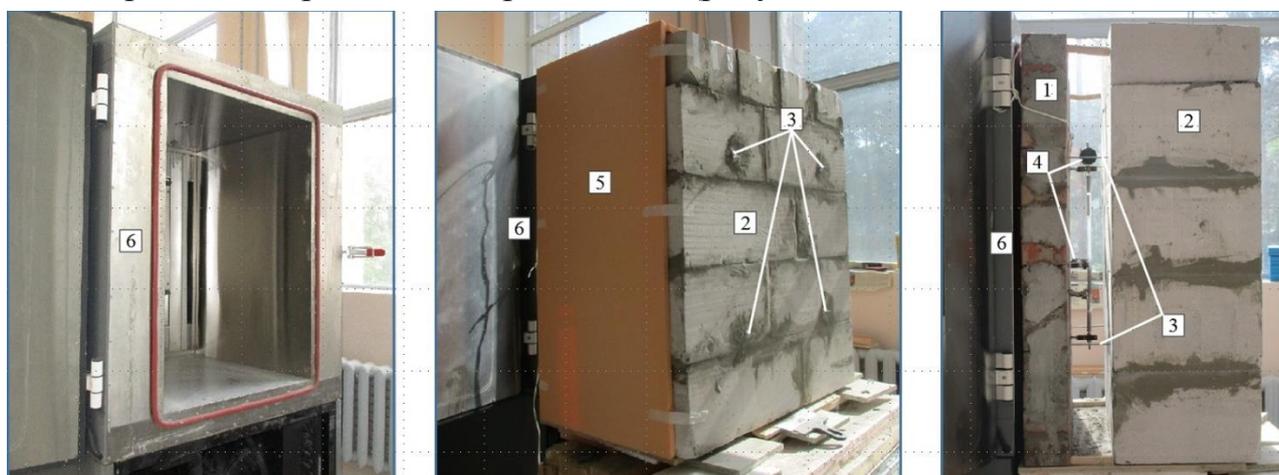
$$\sigma_1^2 - 2(1+k^2)\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 - 2k(f_{xv} + f_{yv})(\sigma_1 + \sigma_2) + 2(f_{xv} - f_{yv})(\sin 2\theta + k \cos 2\theta)(\sigma_1 - \sigma_2) - 4f_{xv}f_{yv} \leq 0 \quad (4)$$

где  $f_{xv}$ ,  $f_{yv}$  – пределы прочности кладки на сдвиг по перевязанному и неперевязанному сечениям соответственно;

$k$  – коэффициент внутреннего трения;

$\theta$  – угол наклона главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  относительно горизонтальных растворных швов.

В СТО 36554501-013-2008 «Методы расчета лицевого слоя из кирпичной кладки наружных облегченных стен с учетом температурно-влажностных воздействий» распределение температуры по толщине лицевого слоя принимается равномерным, а изгиб лицевого слоя игнорируется, что требует уточнений. Для определения действительных значений и характера распределения температуры и деформаций кладки лицевого слоя многослойных стен выполнены экспериментальные исследования опытного образца фрагмента стены при одностороннем замораживании (рисунок 4).



1 – лицевой слой из кирпича; 2 – внутренний слой из газобетона; 3 – гибкая связь;  
4 – индикаторы часового типа; 5 – теплоизоляция; 6 – климатическая камера

Рисунок 4 – Общий вид опытного фрагмента стены в процессе испытания

В результате экспериментальных исследований (рисунок 5):

- выявлен характер распределения температуры по толщине лицевого слоя, криволинейный в начальный период с дальнейшим приближением к линейной зависимости. В качестве расчетного температурного перепада между гранями лицевого слоя принято значение  $\Delta T = \pm 25^\circ\text{C}$ , а расчетная зависимость нарастания/падения температуры от одной грани к другой принята линейной;

- установлено, что неравномерность распределения температуры по толщине лицевого слоя и стеснение его температурных деформаций связями обуславливает, кроме деформаций укорочения кладки, также деформаций изгиба, что не учитывается действующими нормами. При этом циклическое замораживание-оттаивание лицевого слоя приводит к накоплению необратимых деформаций, достигающих порядка 30% от максимальных значений при первом замораживании конструкции;

- уточнены значения коэффициентов линейной температурной деформации каменной кладки лицевого слоя, выполненной из пустотелого керамического кирпича пустотностью 40% (марка кирпича М150, марка раствора М100), составляющие  $\alpha^V=6,0 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> – для вертикального направления и  $\alpha^H=4,5 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> – для горизонтального направления (в СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции» приводится значение коэффициента линейного температурного расширения кладки, равное  $\alpha=5 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, одинаковое для кирпича керамического полнотелого, пустотелого и керамических камней и без учета направления температурного деформирования).

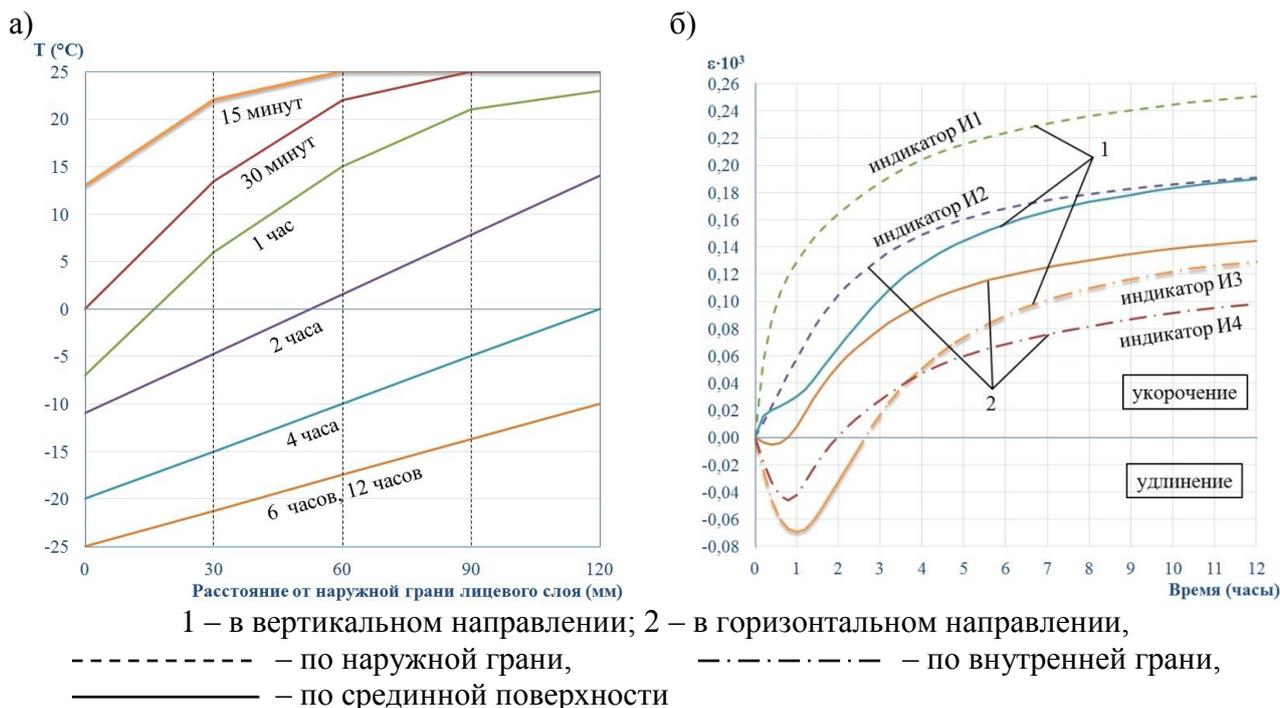


Рисунок 5 – Результаты исследования опытного образца фрагмента стены при одностороннем замораживании: а – распределение температуры по толщине лицевого слоя; б – температурные деформации лицевого слоя в процессе испытания

В третьей главе представлены результаты натурных исследований повреждений кладки лицевого слоя, результаты лабораторных исследований характеристик НДС кладки лицевого слоя и максимальных усилий в гибких связях.

Результаты натурных исследований представлены в форме обобщения результатов обследований и мониторинга зданий, накопленного автором, а также обобщения результатов исследований других авторов.

Натурными исследованиями установлены закономерности, свидетельствующие о существенном вкладе в образование и развитие повреждений в лицевом слое климатических температурных воздействий:

- повреждения в лицевых слоях стен, ориентированных на южную и юго-восточную стороны, проявляются более интенсивно по сравнению с другими сторонами света, что связано с большим нагревом указанных стен в дневное время;

- большая интенсивность появления повреждений в лицевых слоях зафиксирована в весенний период при переходе температурного режима лицевых слоев с зимнего на летний, а также в осенний период при переходе температурного режима, соответственно, с летнего на зимний. Также повреждения проявляют себя в мягкие зимы, когда происходит большое количество перехода через «температурный ноль»;

- при образовании трещин, дальнейшие сезонные колебания температуры не приводят к их закрытию (уменьшается ширина раскрытия трещин), а после прохождения годичного температурного цикла фиксируется дальнейший прирост раскрытия трещин. Аналогичные тенденции фиксируются для повреждений деструктивного характера и выгибов лицевого слоя;

- большая интенсивность поврежденности лицевых слоев деструктивного характера зафиксирована на стенах, к которым примыкают помещения с повышенной влажностью. Непосредственно к повреждениям кладки деструктивного характера приводят знакопеременные климатические температурные воздействия.

Также установлено, что при применении в лицевом слое камней с большой пустотностью (наибольшее распространение получили кирпичи с пустотностью 40%) степень поврежденности лицевого слоя больше относительно лицевого слоя выполненного из полнотелого кирпича.

Для определения коэффициентов  $n$  и  $\lambda$  входящих в зависимость (3) для определения прочности кладки растяжению  $R_{at}$  при действии усилий  $\alpha$  под углом к горизонтальным растворным швам выполнены испытания образцов кладки на диагональное сжатие и изгиб из плоскости (рисунок 6).

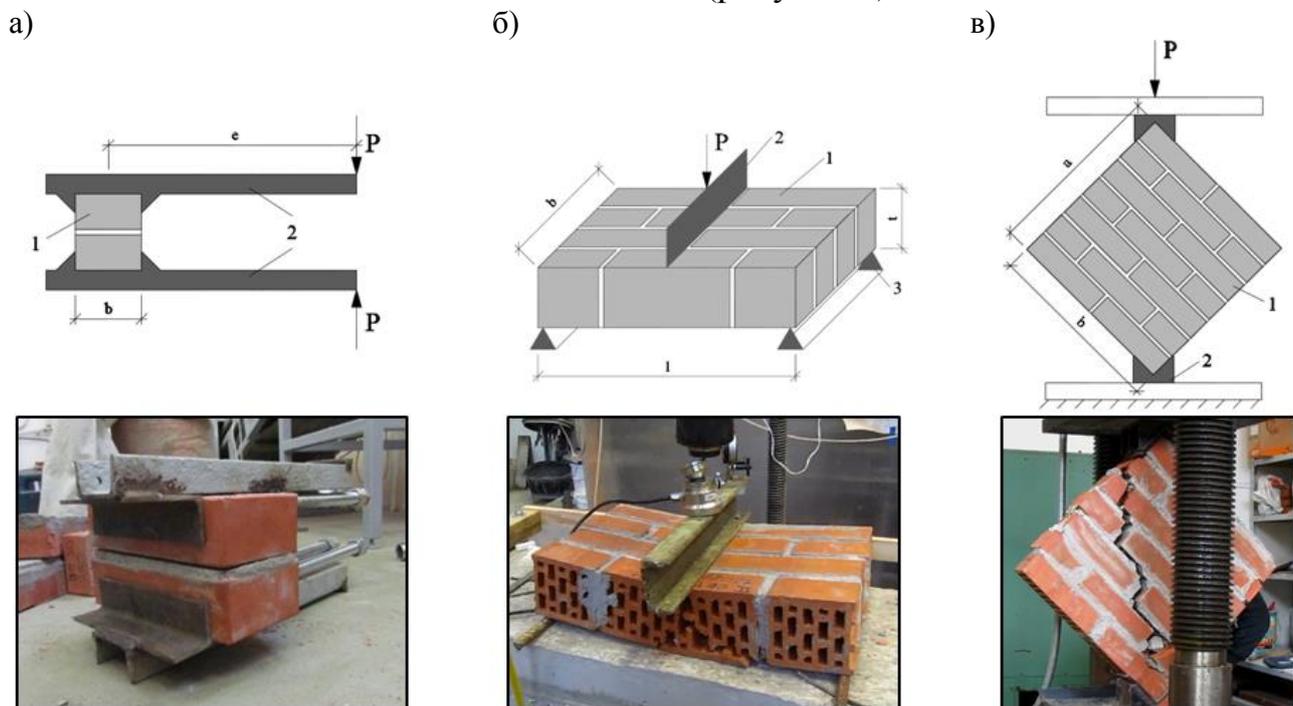


Рисунок 6 – Испытания образцов: а – на изгиб из плоскости для определения прочности на растяжение поперек горизонтальных растворных швов; б – на изгиб из плоскости для определения прочности на растяжение вдоль горизонтальных растворных швов; в – на диагональное сжатие для определения соответствующей прочности на растяжение

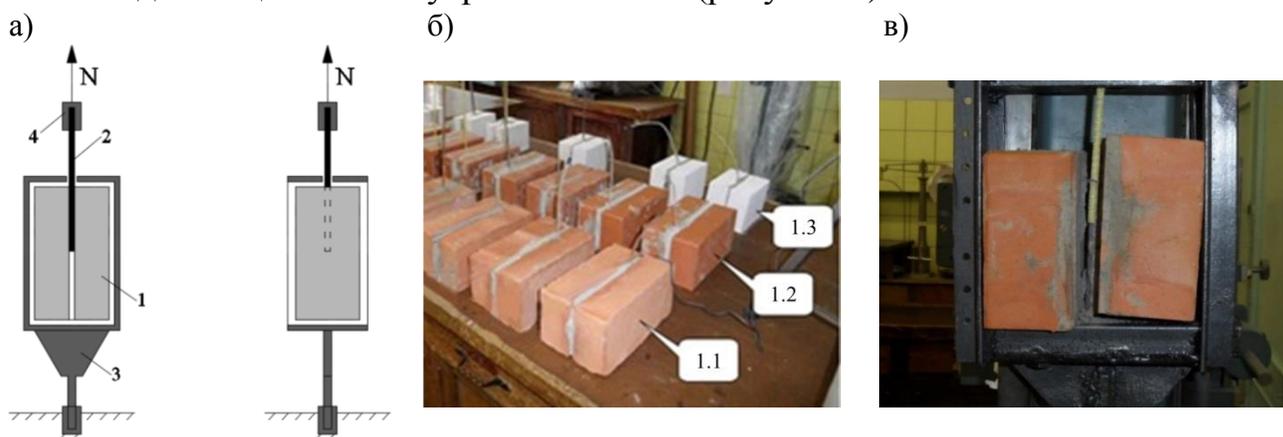
По результатам испытаний:

- определены расчетные сопротивления кладки на растяжение: вдоль горизонтальных растворных швов  $R_{t0}=0,45$  МПа, под углом  $45^\circ$  к горизонтальным растворным швам  $R_{t45}=0,39$  МПа, поперек горизонтальных растворных швов  $R_{t90}=0,14$  МПа (полученные значения хорошо согласуются с результатами экспериментов ряда исследователей);

- на основе данных расчетных сопротивлений определены коэффициенты  $n=R_{t0}/R_{t90}=3,5$  и  $\lambda=2,1$ , входящие в выражение для вычисления прочности кладки на растяжение при действии усилий под углом  $\alpha$  к горизонтальным растворным швам (3). После этого данное выражение (3) приняло вид (5):

$$R_{t\alpha} = \frac{R_{t0}}{1 + (3,5 - 1) \cdot \sin^{2,1}\alpha} = \frac{R_{t0}}{1 + 2,5 \cdot \sin^{2,1}\alpha} \quad (5)$$

Для определения максимальных усилий в гибких связях при их работе в многослойной стене выполнены испытания гибких связей на вытягивание из швов кладки лицевого и внутреннего слоев (рисунок 7).



1 – образец кладки; 2 – испытываемый стержень; 3 – испытательное устройство; 4 – зажим разрывной машины; 1.1 – образцы из полнотелого кирпича; 1.2 – образцы из пустотелого кирпича; 1.3 – образцы из газобетона

Рисунок 7 – Испытание связей на вытягивание: а – схема испытания; б – образцы со связями; в – разрушение образцов при вытягивании связей

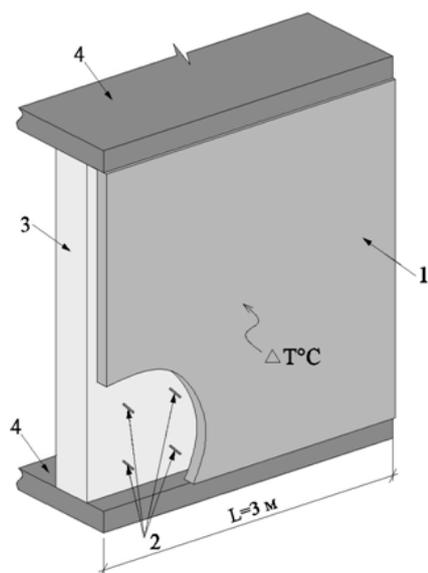
Установлено, что несущая способность гибких связей на вытягивание лимитируется анкерующей способностью кладки из газобетонных блоков внутреннего слоя. Предложено приближенное выражение (6) для вычисления расчетной вытягивающей нагрузки гибкой связи из кладки:

$$N_{\max}=0,7 \cdot (d/6) \text{ кН} \quad (d - \text{диаметр гибкой связи (мм), } 0,7 \text{ кН/мм} - \text{коэффициент}) \quad (6)$$

В четвертой главе представлены результаты теоретических исследований НДС лицевого слоя, выполненных путем отработки расчетных моделей фрагментов наружной стены на прямолинейном и Г-образном угловом участках (рисунок 8). Для моделирования использовался комплекс конечноэлементного

моделирования ANSYS (v.2019), где возможно вести оценку несущей способности кладки в условиях плоского НДС и учитывать многообразие параметров, влияющих на НДС лицевого слоя для конкретной расчетной ситуации. При моделировании лицевого слоя применена макромодель, в которой каменная кладка рассматривается как выполненная из однородного материала, значения деформационных характеристик которого определяются в соответствии с СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции».

а)



б)

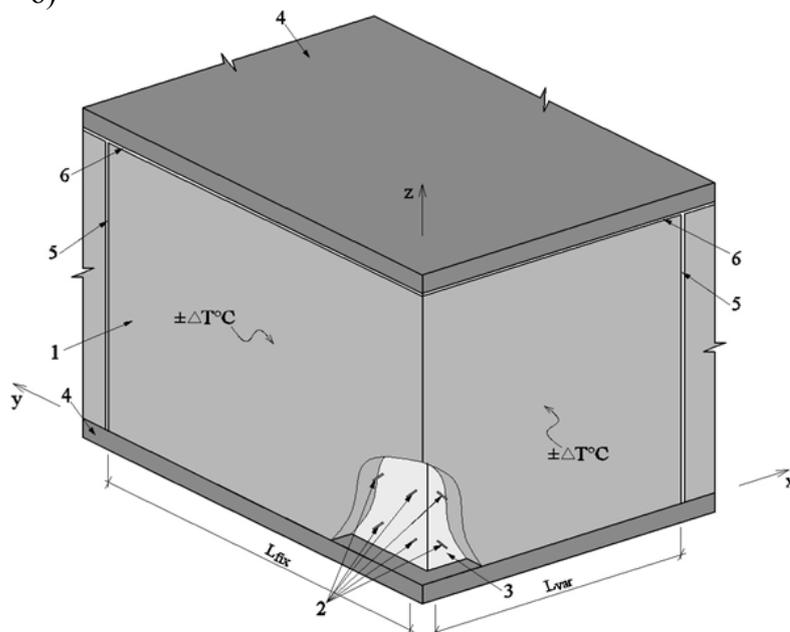


Рисунок 8 – Расчетно-конструктивные модели фрагментов наружной многослойной стены: а – на прямолинейном участке; б – на Г-образном угловом участке

В расчетной модели приняты: толщина лицевого слоя – 120 мм (кирпич М150 пустотностью 40%, раствор М100), толщина внутреннего слоя – 400 мм (кладка из газобетона D500), шаг гибких связей в двух направлениях – 500 мм, расстояние от плит перекрытий до первых связей и от внутреннего угла и вертикальных деформационных швов до первых связей – 250 мм.

Расположение вертикальных деформационных швов в лицевом слое в модели М2 определялось длиной участков лицевого слоя с каждой стороны от угла. При этом в модели с одной стороны от угла значение длины участка принято фиксированным  $L_{\text{fix}}=9$  м, с другой стороны от угла значение длины участка варьировалось в пределах  $L_{\text{var}}=(1\div 9)$  м.

В результате теоретических исследований:

- установлены зависимости распределения контактных сжимающих напряжения  $\sigma_y$  при сопряжении лицевого слоя с плитами перекрытий и усилий  $N_s$  в связях от факторов влияния:

- контактные сжимающие напряжения  $\sigma_y$  не зависят от жесткости гибких связей, однако существенно зависят от величины свеса лицевого слоя с плит перекрытий  $f$ . При наличии свеса напряжения  $\sigma_y$  концентрируются в зоне торцов плит;

- усилия в первых от плит связях  $N_s$  находятся в обратной зависимости от погонной изгибной жесткости связей  $EI/l_s$ ;

- значения напряжений  $\sigma_y$  и усилий  $N_s$  при равномерном и линейном распределении температуры по толщине лицевого слоя отличаются незначительно;

- значения напряжений  $\sigma_y$  и усилий  $N_s$  при отсутствии горизонтального деформационного шва между лицевым слоем и верхней плитой перекрытия на порядок больше соответствующих значений при наличии горизонтального деформационного шва.

- установлены зависимости растягивающих напряжений  $\sigma_x$  в угловой зоне и усилий  $N_s$  в наиболее нагруженных связях от жесткости связей и размера  $L_{var}$  (рисунок 9):

- растягивающие напряжения  $\sigma_x$  в лицевом слое и усилия в первых от угла связях  $N_s$  находятся в обратной зависимости от погонной изгибной жесткости связей  $EI/l_s$ ;

- при заданной длине связей, растягивающие напряжения  $\sigma_x$  в лицевом слое и усилия в первых от угла связях  $N_s$  находятся в зависимости от диаметра связей близкой к линейной;

- растягивающие напряжения  $\sigma_x$  в лицевом слое и усилия в первых от угла связях  $N_s$  линейно возрастают при увеличении расстояния от угла до первого деформационного шва  $L_{var}$ .

Зависимости, представленные на рисунке 9, рекомендовано использовать при практическом установлении расстояния между вертикальными деформационными швами или расстояния от угла до первого вертикального деформационного шва  $L_{var}$ , а также шага и жесткости гибких связей.

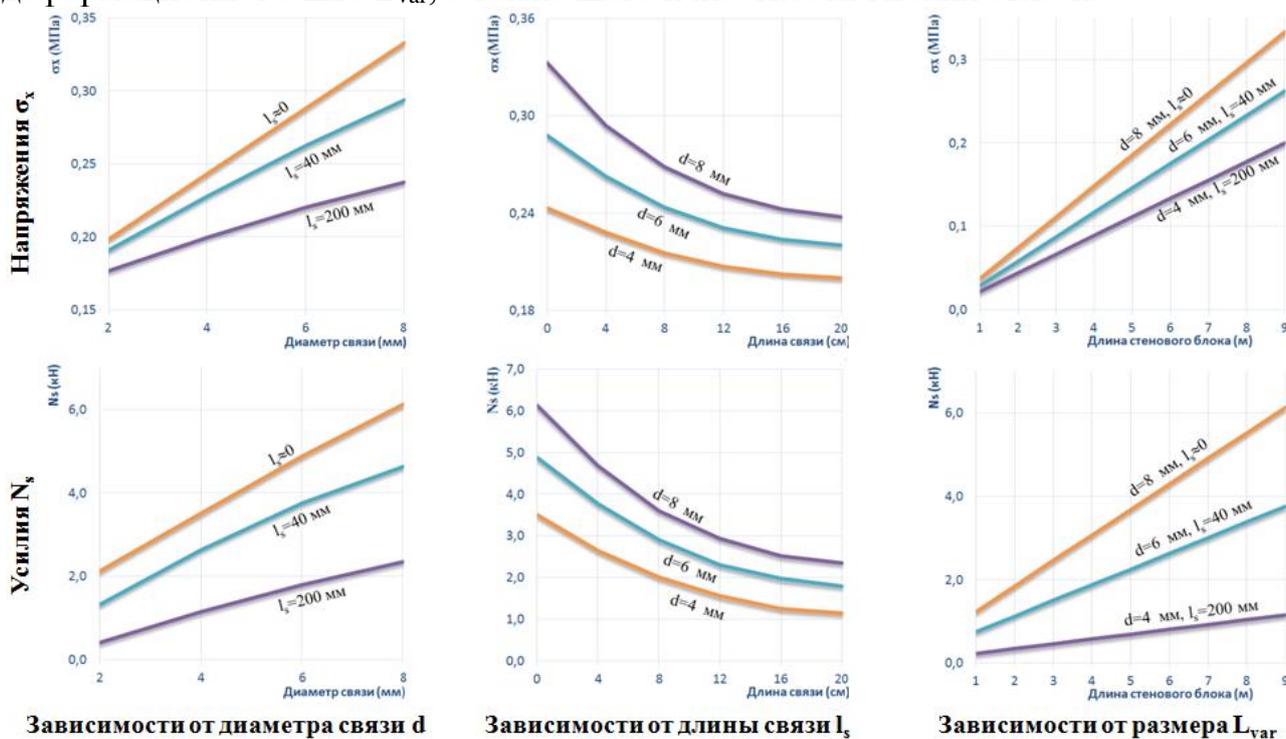


Рисунок 9 – Зависимости растягивающих напряжений  $\sigma_x$  в угловой зоне и усилий  $N_s$  в наиболее нагруженных связях от жесткости связей и размера  $L_{var}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненного экспериментально-теоретического исследования:

1. Установлены закономерности образования и развития повреждений лицевого слоя, свидетельствующие о существенном вкладе в образование и развитие повреждений в лицевом слое климатических температурных воздействий. Установлено, что определяющими для НДС лицевого слоя являются следующие конструктивные параметры многослойной стены: расстояние от угла до первого вертикального деформационного шва в лицевом слое, отсутствие/наличие горизонтальных деформационных швов между лицевым слоем и плитами перекрытий, величина свеса лицевого слоя с плит перекрытий, жесткость гибких связей.

2. Установлено, что определяющими для прочности кладки лицевого слоя при климатических температурных воздействиях являются растягивающие напряжения  $\sigma_{\alpha}$ , действующие вдоль горизонтальных растворных швов либо под углом  $\alpha$  к ним. Обосновано, что для анализа прочности кладки наиболее приемлемым является критерий главных растягивающих напряжений (2).

3. Определены коэффициенты, входящие в выражение критерия главных растягивающих напряжений (5). Установлено, что несущая способность гибких связей на вытягивание лимитируется анкерующей способностью кладки из газобетонных блоков внутреннего слоя и отличается широким разбросом значений. Предложено приближенное выражение для определения несущей способности гибких связей на вытягивание (6).

4. Установлено, что при изменении температуры наружного воздуха лицевой слой кроме линейных деформаций испытывает также деформации изгиба. Установлен закон распределения температуры по толщине кладки лицевого слоя. Уточнены значения коэффициентов линейной температурной деформации каменной кладки лицевого слоя в вертикальном  $\alpha^V=6,0 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> и горизонтальном  $\alpha^H=4,5 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> направлениях.

5. Установлены закономерности изменения параметров НДС лицевого слоя при климатических температурных воздействиях в зависимости от факторов влияния:

- увеличение расстояния от угла до первого вертикального деформационного шва в лицевом слое увеличивает значения растягивающих напряжений в зоне сопряжения слоев по линейной зависимости, а также увеличивает значения усилий в первых от угла и от вертикального деформационного шва гибких связях;

- отсутствие горизонтальных деформационных швов между лицевым слоем и плитами перекрытий существенно (на порядок) увеличивает значения контактных сжимающих напряжений на их границе, а также значения усилий в первых от плит гибких связях;

- наличие свеса лицевого слоя с плит перекрытий приводит к концентрации напряжений в лицевом слое у торцов плит, что наиболее сказывается при выполнении лицевого слоя из пустотелого кирпича высокой пустотности;

- при заданной длине связей (задается конструктивно), растягивающие напряжения в лицевом слое и усилия в гибких связях находятся в линейной зависимости от диаметра связей.

6. На основе результатов экспериментально-теоретического исследования сформулированы рекомендации по расчету лицевого слоя и проектированию наружных многослойных стен при климатических температурных воздействиях, основными из которых являются:

- об обязательной необходимости поэтажного устройства горизонтальных деформационных швов при сопряжении лицевого слоя с вышерасположенными плитами перекрытий;

- об ограничении величины свеса лицевого слоя с плит перекрытий;

- об ограничении пустотности кирпича лицевого слоя;

- о необходимости определения максимального расстояния от угла до первого вертикального деформационного шва в лицевом слое на основе результатов расчета в зависимости от жесткости гибких связей, величины свеса лицевого слоя с плит перекрытий и других конструктивных особенностей наружной стены.

Обосновано, что расчет лицевых слоев, в частности определение расстояния от угла до первого вертикального деформационного шва в лицевом слое, следует выполнять с помощью программных комплексов основанных на методе конечных элементов и на отдельных фрагментах стены, например, в пределах одного этажа или в пределах участка между вертикальными деформационными швами.

## **ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Публикации в журналах, включенных в перечень ВАК, Web of Science, Scopus, РИНЦ**

1. Орлович Р.Б. Применение камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных стен / Р.Б. Орлович, А.С. Горшков, С.С. Зимин // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №8 (43). – С. 14-23.

2. Орлович Р.Б. О работе анкеров в многослойных ограждающих конструкциях с наружным кирпичным слоем / Р.Б. Орлович, Н.М. Рубцов, С.С. Зимин // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №1 (36). – С. 3-11.

3. Орлович Р.Б. Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями / Р.Б. Орлович, В.Н. Деркач, С.С. Зимин // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №8 (60). – С. 30-37.

**Публикации в журналах, включенных в ВАК, РИНЦ**

4. Орлович Р.Б. Ремонт кирпичного лицевого слоя в современных каркасно-монолитных домах / Р.Б. Орлович, С.С. Зимин, П.А. Начкина, А.А. Трусова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №8 (23). – С. 128-140.

5. Орлович Р.Б. Дефекты защитно-декоративной кирпичной облицовки фасадов каркасных зданий / Р.Б. Орлович, С.С. Зимин, С.Б. Серикхалиев // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №5 (20). – С. 28-38.

6. Зимин С.С. Причины деструкции кладки наружных стен технического этажа / С.С. Зимин, О.В. Аверьянова, Н.П. Романов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №12 (27). – С. 112-122.

7. Орлович Р.Б. О работе облицовочного каменного слоя наружных стен каркасно-монолитных зданий при силовых воздействиях / Р.Б. Орлович, С.С. Зимин, Н.М. Рубцов // Строительство и реконструкция. – 2014. – №4 (54). – С. 26-30.

8. Орлович Р.Б. О расположении вертикальных деформационных швов в каменной облицовке наружных стен каркасно-монолитных зданий / Р.Б. Орлович, С.С. Зимин, Н.М. Рубцов // Строительство и реконструкция. – 2014. – №3 (53). – С. 15-20.

9. Зимин С.С. Механизмы образования вертикальных трещин в угловой зоне на пересечении наружных стен / С.С. Зимин, Н.П. Романов, О.В. Романова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – №9 (36). – С. 33-43.

10. Зимин С.С. Напряженно-деформированное состояние кирпичной облицовки в области сопряжения с плитами перекрытия при отсутствии деформационного шва / С.С. Зимин, А.Ю. Сударь, Е.И. Васильева // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – №8 (71). – С. 13-21.

#### **Публикации в журналах, включенных в РИНЦ**

11. Zimin S. Causes of formation of cracks in the outer masonry of multilayer walls in the zone interwindow belts and partition / S. Zimin, R. Alzhanova, V. Litovchenko // International Scientific Conference Week of Science in SPbPU – Civil Engineering (SPbWOSCE-2015). – 2016.

12. Зимин С.С. Обоснование расположения деформационных швов в лицевом слое многослойных наружных стен в российских климатических условиях / С.С. Зимин // Строительство – формирование среды жизнедеятельности. Сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – 2017. – С. 296-299.

#### **Прочие публикации**

13. Зимин С.С. Экспериментальные исследования температурных деформаций лицевого слоя многослойных наружных стен при одностороннем замораживании / С.С. Зимин, В.И. Корсун // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям». – 2018. – С. 116-121.