

Мусорина Татьяна Александровна

**КОНСТРУКТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕНОВЫХ
ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ**

Специальность: 05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Санкт-Петербург
2021

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Петриченко Михаил Романович
Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства, профессор

доктор технических наук, профессор
Козинец Галина Леонидовна
Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства, директор Инженерно-строительного института, профессор

Внутренние рецензенты: доктор технических наук, профессор
Барabanщиков Юрий Германович
Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор

доктор технических наук, профессор
Лалин Владимир Владимирович
Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор

Директор института доктор технических наук, профессор
Козинец Галина Леонидовна
Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства, директор Инженерно-строительного института, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Снижение потерь теплоты в зданиях и сооружениях связано с точным определением потоков теплоты и температур ограждающих конструкций. Например, в термодинамической системе «внутренность здания (помещение) - ограждение - окружающий воздух (среда)» баланс теплотребления определяется такими потоками теплоты:

- потерями теплоты через наружные ограждающие конструкции в наружный воздух или в грунт (в случае подземного ограждения);
- поступлением теплоты за счет отопления;
- потерями теплоты за счет подогрева холодного наружного воздуха, поступающего в здание при инфильтрации с наветренной стороны конструкции, или потерями теплоты при инфильтрации теплого воздуха с подветренной стороны конструкции.

Экономия теплоты возможна по всем трем вышеперечисленным направлениям. При этом важно учитывать не только климатические параметры (температуру наружного воздуха зимой и продолжительность отопительного периода) региона, но и конструкцию стенового ограждения.

В отечественной и зарубежной практике активно решаются вопросы повышения класса энергоэффективности стеновых строительных конструкций. Традиционно увеличение энергоэффективности стеновой конструкции достигается за счет увеличения ее активного термического сопротивления.

Основными проблемами теплотехнического расчета ограждающих конструкций является влияние различного рода включений на термическое сопротивление:

- инородных включений (кронштейнов, дюбелей, углов и т.д.). Наличие инородных включений искажает температурное поле конструкции. Включения часто играют роль «мостиков» для потоков тепла;
- геометрических (изменение размерности области стены, возникающая при сопоставимости размеров стеновой конструкции или при нарушении связности конструкции за счет полостей, заполненных различным материалом и пр.);
- граничных (неоднородность распределения граничных температур стеновой конструкции, приводящая к появлению дополнительных компонент вектора теплового потока).

Теплоустойчивость и аккумуляционная способность стеновых ограждений здания важна для оценки теплотехнических свойств стенового ограждения при переменных, наиболее реалистических тепловых режимов.

Ошибки при оценке теплотехнических характеристик строительных конструкций могут привести к чрезмерному увеличению активного термического сопротивления, к усложнению конструкции стенового ограждения, а также увеличению капитальных затрат. Игнорирование реактивным сопротивлением стенового ограждения может привести к

увеличению эксплуатационных расходов, например, к избыточным затратам на отопление зданий и сооружений, к их «перетопу». Это важно не только для вновь проектируемых конструкций, но и для реновации эксплуатируемых зданий. Влияние включений, неоднородностей и геометрических, представляет интерес для разработки объективных и доступных методик теплотехнического расчета конструкций строительных ограждений.

Степень разработанности темы исследования. Первые научные попытки оценить метод расчета однослойных и многослойных ограждающих конструкций зданий на теплоустойчивость предпринимались в середине XX века. Содержательная часть приводимых результатов внесена В.Н. Богословским, К.Ф. Фокиным, А.Ф. Строем, В.Г. Гагариным, С.В. Корниенко, К.П. Зубаревым, В.И. Ливчаком, Г.П. Васильевым, О.А. Тусниной, О.Д. Самариним, А.С. Горшковым, О.С. Гамаюновой, М.Р. Петриченко, А. De Gracia, M. Naase, G. Thakur, A. Gagliano, F. Patania, V. Bianco, O. Manca, A.S. Al-Tamimi, A. Keyvanfar, A. Borodinecs, E. Barreira и др.

Исследования В.Г. Гагарина и его научной школы связывают одномерные схемы расчета температурного состояния стеновых ограждений с точными решениями путем введения корректирующих коэффициентов, учитывающих эффекты неоднородности температурного поля – включения, геометрические искажения формы стены, инсоляцию и прочие факторы неоднородности.

Одни из первых работ в теплоустойчивости были работы Г.А. Селиверстова, содержащая определение теплоустойчивости как реакции конструкции стены на изменение граничных температур по времени и А.М. Шкловера про простую элементарную интерпретацию периодических колебаний теплого потока и температуры стены. В работах последних десятилетий основное внимание уделяется адаптации одномерной схемы строительного ограждения для расчета реальных конструкций, в основном, для стационарных режимов теплопередачи.

Наиболее значимым направлением является разработка методов расчета ограждающих конструкций для одномерной и двумерной моделей, основанных на учете геометрических включений. Однако включения искажают одномерное температурное поле. Эффект включений, провоцирующих неоднородность температурного поля теплового потока, обусловлен не только неоднородностью материала стенового ограждения, но и ее размерами: в тонкой стенке распределение температуры линейное, тепловой поток одномерен и распространяется только поперек стены.

Данное обстоятельство, обосновывает дальнейшие исследования о влиянии включений. Возникает задача об определении границ применимости одномерной модели распространения тепла, а именно: как влияет относительный размер стены L/h , L – продольный размер, h – поперечный размер стены, на активное сопротивление стены; как искажает неоднородность распределения температуры по граням $y=0$ и $y=h$ одномерное температурное поле; влияние чередования слоев; определение толщины

пограничных слоев температурного и теплового поля стены и т.д. Наконец, остается нерешенной задача об определении полного и реактивного сопротивления стеновой конструкции.

Объектом исследования являются ограждающие стеновые конструкции: однослойные и многослойные.

Предметом исследования являются распределения температуры в стеновом ограждении в стационарном и нестационарном режимах, термическое сопротивление стенового ограждения.

Цель и задачи исследования. Цель исследования является теплотехнический расчет конструкции стенового ограждения, учитывающий геометрические включения и её теплоустойчивость.

Задачи исследования:

1 Найти распределение температуры в одномерной и двумерной стене. Определить активное и реактивное термические сопротивления стеновых ограждений для одномерной и двумерной областей.

2 Определить толщины температурного и теплового пограничных слоев стены. Найти связь термического сопротивления с теплоустойчивостью стенового ограждения.

3 Провести экспериментальное определение стационарного и нестационарного тепловых режимов стеновых ограждений для различных материалов, применяемых в строительстве.

4 Разработать бетонный композит, армированный сухой растительной добавкой, обладающий повышенным термическим сопротивлением и прочностью на изгиб.

Научная новизна работы заключается в:

1 Учете геометрических включений при определении температурного поля и количества тепла в стеновом ограждении.

2 Методике расчета термического сопротивления с учетом активной и реактивной составляющих.

3 Изготовлении и испытании энергоэффективного бетонного композита для стенового ограждения, армированного сухой растительной добавкой.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1 Разработана математическая модель распределения температуры теплового потока в одномерном и двумерном стеновых ограждениях, содержащая определение толщин пограничных слоев температурного поля и поля теплового потока для стенового ограждения.

2 Выведены формулы для определения активного и реактивного сопротивления. Определена связь термического сопротивления с теплоустойчивостью стенового ограждения.

3 Подобраны оптимальные комбинации чередования слоев с максимальной средней температурой по стеновому ограждению. Исследованы скорости изменения температуры в нестационарных, апериодических и периодических по времени температурных режимах стеновых ограждений.

4 Определены теплотехнические и механические свойства нового энергоэффективного композитного материала.

Методология и методы исследования:

1 Математический аппарат.

1.1 Фурье-анализ пульсации температуры; методы теории линейных дифференциальных форм; уединенные волны температуры и теплового потока.

1.2 Определение толщин температурного и теплового пограничных слоев стенового ограждения.

2 Моделирование температурных режимов в установке (лабораторный эксперимент): исследование образцов в холодильной камере «CHALLENGE 250» при постоянной и переменной температурах воздуха (минус 10°C до плюс 30°C).

3 Испытания разработанного материала на поперечный изгиб.

4 Оптическая микроскопия разработанного материала.

Положения, выносимые на защиту:

1 Математическая модель распределения температуры в полубесконечной и конечной полосах стенового ограждения; эффект «геометрических включений»; определение толщин пограничных слоев температурного и теплового поля стены.

2 Определение активного, реактивного и полного термических сопротивлений стеновых ограждений для одномерной и двумерной задач. Связь термического сопротивления и теплоустойчивости стеновых ограждений.

3 Расчетно-экспериментальное влияние чередования слоев на распределение температуры в толще стены. Стационарный и нестационарный тепловые режимы стеновых ограждений (лабораторный эксперимент) в холодильной камере.

4 Результаты исследования бетонного композита, армированного сухой растительной добавкой.

Степень достоверности и обоснованности результатов по предложенным методам расчетов нестационарного и стационарных режимов обосновывается использованием фундаментальных физических законов (непрерывности теплового потока и законов Фурье, Фика и Ньютона для потоков тепла и распределения температуры) и математических формул, применением фундаментальных законов и дифференциальных уравнений теории переноса тепла и массы, удовлетворительным совпадением расчетных прогнозов с экспериментальными результатами.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения: п. № 7 – Развитие теоретических основ строительно-акустических методов и средств, поиск рациональных решений освещения зданий и отдельных помещений, рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений,

направленных на повышение эффективности капиталовложений, энерго- и ресурсосбережение, создание комфортных условий для людей и оптимальных для технологических процессов.

Апробация работы. Положения и результаты работы были доложены и обсуждены на 17 конференциях, семинарах, симпозиуме и форумах в 2014-2020 г.: International scientific conference "Week of Science in SPbSPU - Civil Engineering". SPbWOSCE-2014, SPbWOSCE-2015, SPbWOSCE-2016. Труды публикуются в журналах, индексируемые в SCOPUS. Санкт-Петербург, ноябрь-декабрь (2014 г., 2015 г., 2016 г.); AMTESD-2016 Saint Petersburg, Russia. Civil Engineering Institute of Saint-Petersburg State Polytechnical University presents / Advanced Materials and Technologies for Energy Efficiency and Sustainable Development, апрель (2016 г.); Строительство - формирование среды жизнедеятельности. Организаторы: ФГБОУ ВО НИУ МГСУ Москва, 26-28 апреля (2017 г.); Второй Международный Форум «Энергоэффективность зданий». НИУ МГСУ, г. Москва. Октябрь (2017 г.); VII и VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции», НИУ МГСУ г. Москва, ноябрь (2018 г., 2020 г.); International Workshop on "Energy Efficient Buildings in the SMART CITY Technology, Economy, Entrepreneurship", Erasmus+project, Italy, 14-16 March (2018); Круглый стол «Зеленые технологии как основа устойчивого развития Санкт-Петербурга и Ленинградской области», г. Санкт-Петербург, март (2018 г.); Международная научная конференция «Энергетика, экология и строительство» ЕЕСЕ-2018 и ЕЕСЕ-2019, г. Санкт-Петербург (2018 г., 2019 г.); VI Международная научная конференция «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании», г. Москва (2018 г.); XXII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», г. Москва (2019 г.); «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», МГТУ им. Баумана, г. Москва, май (2019 г.); «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», г. Москва, июль (2019 г.); II Международная научно-техническая конференция «Инженерные системы и энергоэффективность в строительстве, природообустройстве», г. Евпатория, сентябрь (2019 г.).

Публикации. Материалы исследований опубликованы в 17-ти печатных работах. Из них: 10 статей в журналах из актуального перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 7 статей в журналах SCOPUS и WoS.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, вопросы энергоэффективности стеновых ограждений, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи, теоретическая и практическая

значимость, научная новизна работы. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена аналитическому обзору состояния вопроса в области теплопереноса, методам расчета стенового ограждения полубесконечных и конечных размеров, определению толщины пограничного слоя стены. Рассмотрена общая постановка задачи об области применимости принципа Сен-Венана (тепловой поток рассчитывается, как и в одномерном случае, по локальному перепаду температуры), определению активного, реактивного и полного термических сопротивлений стенового ограждения. Приведен пример расчета ограждающей конструкции [1-5].

Под геометрическими включениями понимаются факторы, влияющие на искажение одномерного температурного поля, такие как: продольные и поперечные размеры стены, искажения геометрии области, занятой теплопроводной средой и искажения её границы. Необходимо определиться с вопросом о существовании одномерного поля температуры в полосе $|x| < \infty$, $0 < y < h$, где x отчитывается вдоль стены, y поперек стены. Предполагается, что координаты x , y уже нормированы, например, по продольному размеру L стенового ограждения, $h/L \ll 1$, L, h – размеры стенового ограждения, продольный и поперечный (величины либо одного порядка, либо несоизмеримые). Приведена формула определения температуры:

$$T(x, y) = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} d\xi T_0(\xi) \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \frac{sh\omega(h-y)}{sh\omega h} \exp(-i\omega(x-\xi)) + \int_{-\infty}^{\infty} d\xi T_1(\xi) \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \frac{sh\omega y}{sh\omega h} \exp(-i\omega(x-\xi)), \right) \quad (1)$$

где $T_i = T_i(x)$, $i=0,1$ – предельные значения температуры на границах (на прямых);

$y=0, h$ соответственно, поперечная координата или толщина стены;

ξ, ω - переменные интегрирования.

Формуле (1) можно придать более компактный вид в алгебре неограниченных операторов:

$$T(x, y) = \cos e c(h\partial_x) \sin((h-y)\partial_x) T_0(x) + \cos e c(h\partial_x) \sin(y\partial_x) T_1(x), \text{cosech}(h\partial_x) := (sh(h\partial_x))^{-1}. \quad (2)$$

Если $h \ll 1$ (тонкая или одномерная стена), то из формулы (1) получается принцип Сен-Венана:

$$T(x, y) = T_0(x)(1 - y/h) + T_1(x)y/h, \quad (3)$$

Формула (3) справедлива только для линейного распределения пограничных температур: $\partial_x^m T_i(x) = 0, i = 0,1; m > 1$. Это означает, что все производные пограничных температур по координате x , выше первой, равны нулю. Из формулы (2) получается, что компоненты вектора ∇T составляют:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \cos e c(h\partial_x) \sin((h-y)\partial_x) \partial_x T_0(x) + \cos e c(h\partial_x) \sin(y\partial_x) \partial_x T_1(x),$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -\cos e c(h\partial_x) \cos((h-y)\partial_x) \partial_x T_0(x) + \cos e c(h\partial_x) \cos(y\partial_x) \partial_x T_1(x). \quad (4)$$

Рассмотрим случай, если $h \gg 1$, задача становится существенно двумерной. В этом случае возникает вторая, продольная, координата x ,

отсчитываемая вдоль конструкции. Справедлива формула с ядром Дирихле для распределения температуры в верхней полуплоскости $y>0$:

$$T(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T_0(x-ty)dt}{1+t^2} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-yt\partial_x)dt}{1+t^2} T_0(x). \quad (5)$$

где t - переменная интегрирования.

На рисунке 1 представлены схемы линий тока теплового потока через одномерную и двумерную стенки, иллюстрирующие эффект «растекания» теплового потока.

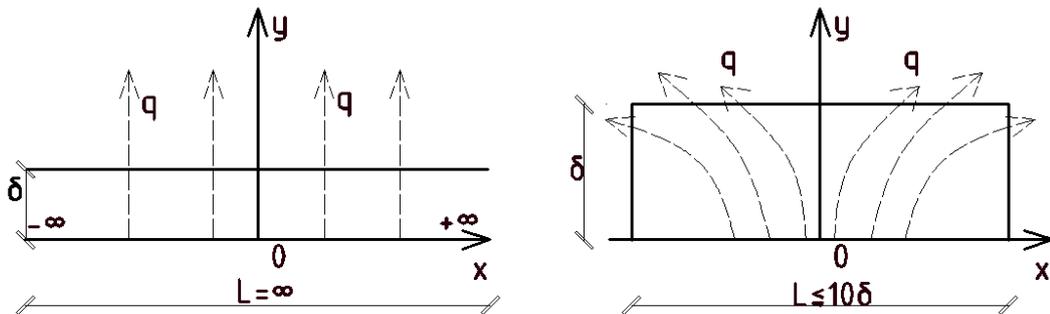


Рисунок 1 – Одномерная стена, $h \ll 1$, двумерная стена $h \gg 1$

Производная в направлении оси y много больше производной в направлении оси x , поэтому в тонкой стенке компоненты теплового потока в направлении оси x много меньше компонентов в направлении оси y (поперек стены) и температурное поле ведет себя как одномерное. В двумерной стенке существует ненулевая x -компонента градиента температуры, соизмеримая с y -компонентой градиента температуры. Неоднородность распределения пограничной температуры $T_0(x)$ на ординате $y=0$ играет роль включения, искажающего одномерную модель распространения тепла. Т.к. существует x -компонента теплового потока, то, при увеличении геометрической размерности стены вдвое, абсолютная величина теплового потока не уменьшается.

Мерой неоднородности распределения температуры служит толщина температурного пограничного слоя, определяемая для неограниченной области как среднее по температуре распределение:

$$\delta(x) := \frac{1}{T_0(x)} \int_0^{\infty} T(x, y) dy = \frac{1}{\pi T_0(x)} \int_0^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-ty\partial_x)}{1+t^2} dt T_0(x) \quad (6)$$

$$\delta(x) = \frac{1}{T_0(x)} \int_{-\infty}^x T_0(z) dz = \frac{\partial_x^{-1} T_0}{T_0}. \quad (7)$$

где z – переменная интегрирования.

Исходя из выражения (7), получается формула для толщины температурного пограничного слоя:

$$\delta_T = \frac{\delta (T_0 - T_1)}{2 (T_0 - T_1)_{\text{нач}}} \quad (8)$$

где $(T_0 - T_1)_{\text{нач}}$ – начальный перепад температуры.

Рассмотрено одномерное распространение тепла, т.е. динамическая система с двумя степенями свободы, t – время и y – поперечная координата.

Для удобства использования производных применяются представления (Дюгема) производных в виде функциональных определителей для изменения

температуры δ_T и плотности теплового потока на δ_q . Введены такие обозначения для частных производных, нижний значок означает фиксируемую степень свободы:

$$R := \frac{\delta T}{\delta q} = \frac{A\delta t + B\delta y}{C\delta t + D\delta y}, T = T(t, y); q = q(t, y) \quad (9)$$

$$A := \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_y = \frac{\partial(T, y)}{\partial(t, y)}, B := \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_t = \frac{\partial(T, t)}{\partial(y, t)}; C := \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial t}\right)_y = \frac{\partial(\dot{q}, y)}{\partial(t, y)}, D := \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial t}\right)_t = \frac{\partial(\dot{q}, t)}{\partial(y, t)}$$

где A, B, C, D — обозначения Монжа для производных первого порядка от температуры и теплового потока.

В строительной теплотехнике важную роль играет понятие (активного) термического сопротивления стены R_a [6-8] как меры термического качества стены в условиях стационарного температурного режима, определяющееся так:

$$R_a := \frac{B}{D} = \frac{\partial(T, t)}{\partial(q, t)} = \left(\frac{\partial T}{\partial q}\right)_t \quad (10)$$

Кроме того, R_a можно посчитать по общеизвестной формуле:

$$R_a = \frac{1}{a_{int}} + \frac{\delta_T(x)}{\lambda} + \frac{1}{a_{ext}} \quad (11)$$

Пример расчета. Имеется стена из керамического полнотелого кирпича толщиной 510 мм. Температура снаружи на поверхности стены изменяется от минус 30°C до плюс 40°C. Температура на внутренней поверхности стены помещения остается неизменной плюс 18°C. Термическое сопротивление для данной стены, которое рассчитывается по нормам, равно $R = 0,897 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Данная величина никак не связана с температурами внутри и снаружи помещения (с перепадом температуры на гранях стены). Необходимо посчитать по методике, представленной выше, как будет себя вести стеновое ограждение при изменении перепада температуры на гранях стены. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение теплотехнических параметров от температур на горячей и холодной поверхностях

| T на поверх. стены, °C | R_a , м ² ·°C/Вт | δ_T , м | δ_q , м | R , м ² ·°C/Вт | R_r , м ² ·°C/Вт | δ_q / δ_T |
|--------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| -30 | 0,528 | 0,255 | 0,510 | 0,829 | 0,301 | 2 |
| 0 | 0,297 | 0,095 | 0,510 | 0,466 | 0,169 | 5,368 |
| +18 | 0,158 | 0* | 0,510 | 0,248 | 0,09 | ∞ |
| +40 | 0,328 | -0,116** | 0,510 | 0,515 | 0,187 | 4,396 |

* При $T_0 = T_1$ температурный пограничный слой отсутствует;

** Знак минус появляется если: $T_1 > T_0$ и тепловой поток меняет направление, тепло направлено в помещение.

На рисунке 2 представлен разрез стены и границы температурного пограничного слоя при отрицательной и положительной температурах снаружи помещения.

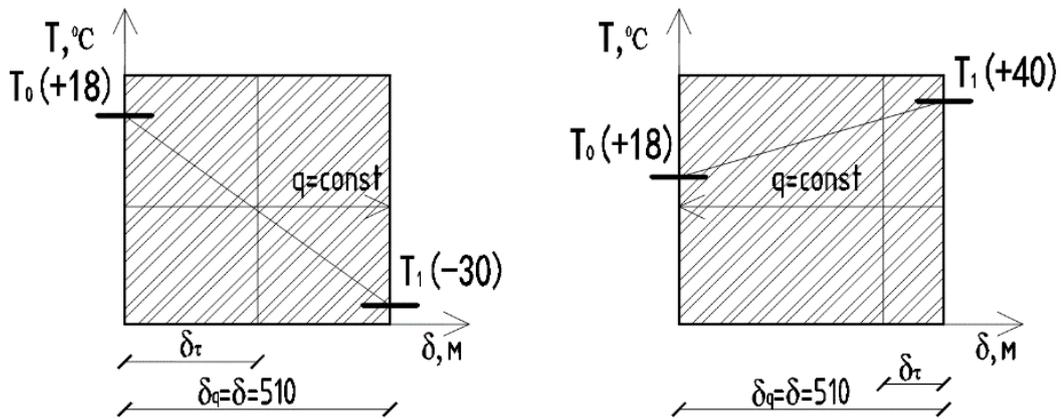


Рисунок 2 – Разрез стенового ограждения

В случае двумерной стены R_a не превосходит R_a одномерной стены при одинаковом перепаде температуры. В одномерной стене эффект растекания теплового потока исключается, тепловой поток распространяется только поперек стенки. В этом и состоит эффект геометрического включения.

Исходя из графика, при произвольном положительном перепаде температур, δ_T тоньше, чем толщина стены. Толщина же теплового пограничного слоя всегда равна толщине стены в условиях стационарного режима. Если перепад температур становится отрицательным, то толщина пограничного слоя должна отсчитываться от горячей грани $y=h$.

В большинстве случаев распространение теплового потока нестационарно и в передаче тепла вступает реактивное сопротивление R_r стены. Реакция ограждения R_r на изменение предельных температур проявляется в тепловой инерции стены (тепловой устойчивости) и в регенерации теплоты (ёмкостное сопротивление) стеной. Реактивное и полное сопротивления равны:

$$R_r := R - R_a = \frac{A}{c} - \frac{B}{D} \cdot R = \frac{A}{c} = \frac{\partial(T,y)}{\partial(q,y)} = \left(\frac{\partial T}{\partial q}\right)_y \cdot R_r = \left(\frac{\partial T}{\partial q}\right)_y - \left(\frac{\partial T}{\partial q}\right)_t \quad (12)$$

Вводятся понятия скорости распространения уединенных волн температуры и теплового потока. Скорость распространения температурной волны — это скорость перемещения возмущения температуры, аналогична скорости волны спада или подпора для водного потока. Скорость распространения теплового потока — это скорость волны расхода в нестационарном водном потоке. Условие неразрывности для теплового потока:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0, \quad \rho c A + D = 0 \quad (13)$$

где ρ — плотность среды;

c — удельная изобарная теплоемкость.

Активное и полное сопротивления можно записать в следующем виде:

$$R_a = \frac{B}{D} = -\frac{B}{(\rho c A)} = \frac{1}{\rho c} \frac{\partial(T,t)}{\partial(T,y)} = \frac{1}{\rho c W_T}, \quad R = \frac{A}{c} = \frac{1}{\rho c W_q}, \quad W_z = \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)_z \quad (14)$$

где W_T — скорость распространения уединенной волны температурного возмущения;

W_q – скорость распространения уединенной волны теплового потока.

Для нестационарного распространения тепла в одномерной стене, доказывается, что:

$$w_T = \frac{x}{2t}, w_q = w_T - \frac{a}{x} < w_T,$$

$$R_a = \frac{2at}{\lambda x}, R = R_a \left(1 - \frac{2at}{x^2}\right)^{-1} > R_a, x < \sqrt{2at}.$$

$$R = \frac{A}{c} = \frac{A B D}{B D c} = \frac{(\partial T / \partial t)_y}{(\partial T / \partial y)_t} R_a \frac{(\partial q / \partial y)_t}{(\partial q / \partial t)_y} = R_a \frac{(\partial y / \partial t)_T}{(\partial y / \partial t)_q} = R_a \frac{w_T}{w_q}. \quad (15)$$

$$R_r := R - R_a = \frac{AD - BC}{D(C + wD)}, w := \frac{\delta y}{\delta t}$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

a — коэффициент температуропроводности, м²/с;

t — время, с;

q — плотность теплового потока, Вт/м².

На рисунке 3 представлены графики скоростей распространения волн температурного возмущения и теплового потока в толще стены.

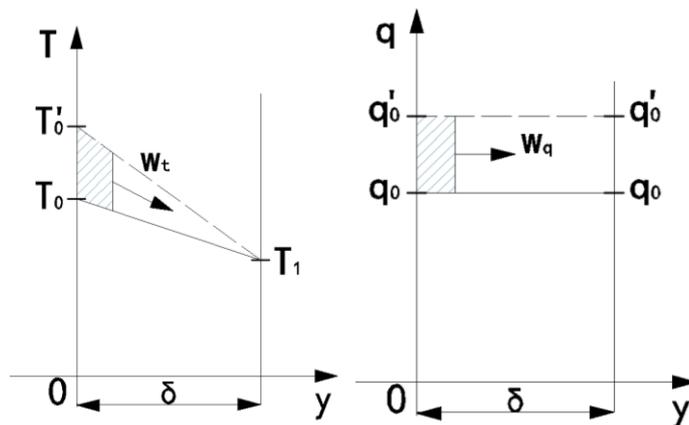


Рисунок 3 – Схема распространения уединенных волн W_T и W_q

За счет инерции потока $W_q < W_T$: для того, чтобы возникло изменение теплового потока необходима деформация температурного поля, температурная волна должна пройти сквозь стену. Возмущение температурного поля в любой момент времени занимает некоторую часть стены – область температурного пограничного слоя δ_T .

Для одномерной стены в нестационарных условиях, толщина температурного слоя всегда меньше общей толщины $\delta_T \ll \delta$. Можно показать:

$$R = R_a \cdot \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

Достаточно определить R_a , чтобы найти остальные составляющие термического сопротивления, R_r и R имеют следующие значения, представленные в таблице 1. О полном сопротивлении R можно судить по увеличению дроби δ_q / δ_T [9].

Поэтому δ_T при знакопеременном перепаде температуры между наружной и внутренней поверхностей стены характеризует не только активное, но и полное термическое сопротивление стены.

Для тонкой стены график зависимости отношения перепадов температуры текущей и начальной и отношение толщины пограничного слоя стены к полной толщине стенки представлена на рисунке 4.

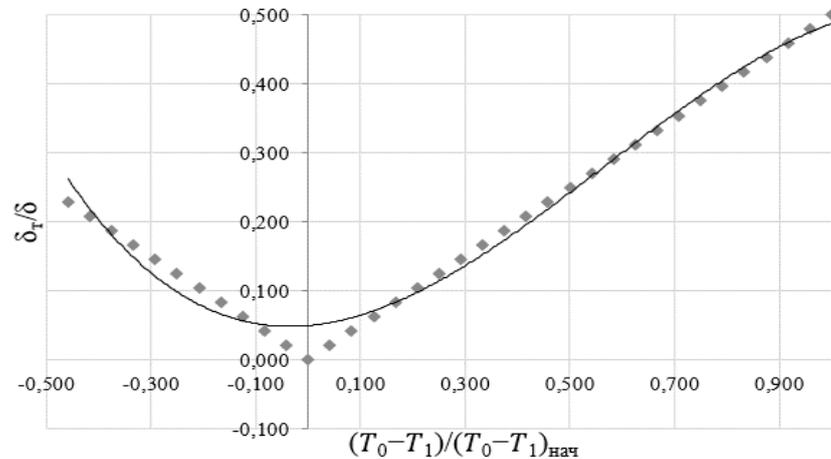


Рисунок 4 – Отношение толщин как функция температурного перепада

Для двумерной стены зависимость толщины температурного пограничного слоя от толщины стены представлено на рисунке 5.

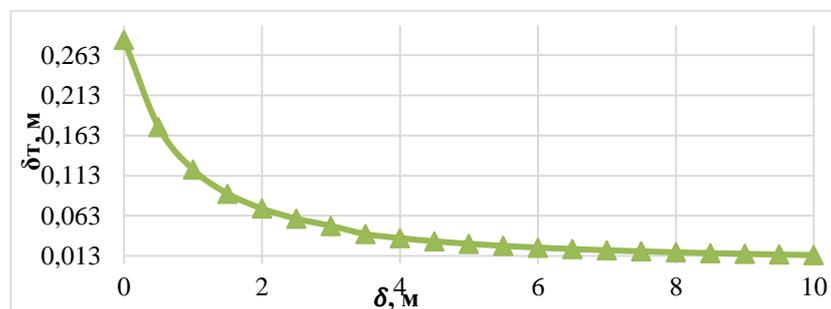


Рисунок 5 – Толщина температурного пограничного слоя как функция δ

Как видно, с увеличением толщины стены доля толщины, занимаемая пограничным слоем, монотонно уменьшается. Изменения температуры по времени не проходят внутрь твердого тела и локализованы внутри δ_T и R_a локализовано в пограничном слое температурного поля, определяемом как носитель распределения температуры. Если граничная температура $T_w(t, x)$ не зависит от x (температура распределена по граням стены равномерно), то δ_T определяется по формуле:

$$\delta(t) = \partial_t^{-1/2} T_w(t) / T_w(t), \quad (17)$$

а для двумерного пограничного слоя эта формула сохраняет смысл только если вместо $T_w(t)$ используется интегральное преобразование температуры $T_w(t, x)$ по продольной координате x .

Вторая глава содержит решения задач теплопроводности, осложненной диффузией влаги в пористой структуре стены. Решается совместная система

уравнений Фика и Фурье в условиях конечного конвективного переноса влаги в пористой структуре стены с различными значениями коэффициента пористости, в одномерной постановке, для стационарного и нестационарного переноса тепла. Далее определяется связь термического сопротивления и теплоустойчивости стенового ограждения.

Доказано [10-12], что распределение относительной влажности в пористой структуре стены описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial \ln D}{\partial y} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 = 0. \quad (18)$$

где φ – относительная влажность;

D – коэффициент диффузии (пропорционален коэффициенту влагопроницаемости материала).

Решение уравнения (18) имеет вид:

$$\varphi(y) - \varphi_h = \int_0^y \frac{dz}{cD + D \int_0^z \frac{ds}{D(s)}}. \quad (19)$$

где c – постоянная интегрирования;

φ_h – влажность в сечении с абсциссой $y=0$.

В диссертации приводятся результаты расчетов распределения влажности и потоков массы сквозь пористую структуру стены.

Рассмотрена задача Коши для одномерной нестационарной теплопроводности неоднородной стены с граничными условиями рода 3 (смешанные граничные условия). Доказано, что при конечной теплоотдаче на обеих гранях дифференциальное уравнение для изменения температурного напора имеет вид:

$$d^2 \theta_0 / dt^2 = \left(\frac{d\theta_0}{dt} H_0 + \frac{d\theta_1}{dt} H_1 - (H_0 + H_1)(H_0 \theta_0 + H_1 \theta_1) \right) \exp(-t(H_0 + H_1)), \quad (20)$$

где $H_{0,1}$ – приведенные коэффициенты теплоотдачи (числа Био).

При линейном (медленном) изменении температуры грани приведенная температура источника $\theta_0 H_0 + \theta_1 H_1$ изменяется пропорционально $\exp(t(H_0 + H_1))$.

Рассматривается связь термического сопротивления и теплоустойчивости (способность конструкции сохранять относительное постоянство температуры воздуха в помещениях при периодических колебаниях температуры наружного воздуха и теплового потока, проходящего через стеновое ограждение).

Реализация повышенного термического сопротивления стеновой конструкции требует оценок теплоустойчивости стены [13]. Теплоустойчивость стены оценивается коэффициентом β и определяется по формуле:

$$\beta = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \text{ и } \beta \sqrt{R} = \sqrt{\rho \cdot c_p \cdot \delta} \quad (21)$$

Увеличение коэффициента β равносильно адиабатизации стеновой конструкции; наоборот, если $\beta \rightarrow 0$, т.е. термическое сопротивление увеличивается. Связь коэффициента β и термического сопротивления R

представлена на рисунке 6. Для нахождения зависимости были рассчитаны более 30 различных стеновых ограждений из ассортимента строительных материалов, включая теплоизолятор. Далее выбраны конструкции с R больше чем $3,7 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ и β больше $7 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{0,5})$.

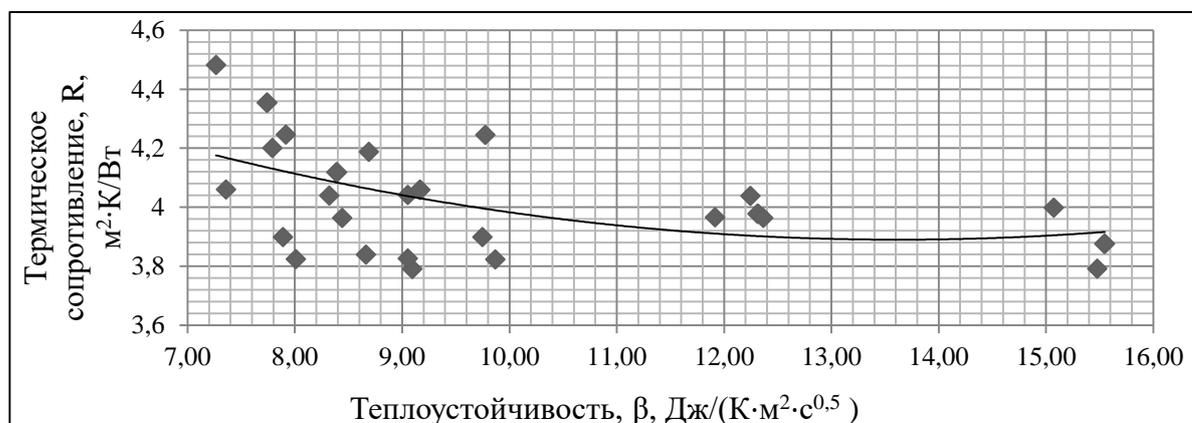


Рисунок 6 – Зависимость теплоустойчивости и термического сопротивления

Многослойное стеновое ограждение с максимальным значением β , устроено так: силикатный кирпич 380 мм, пенополистирол (ППС Carbon solid 1000) 100 мм, вентилируемый воздушный зазор 25 мм, силикатный кирпич 120 мм. Воздух, запертый в воздушном зазоре, выполняет функцию дополнительного R_a . Влияние воздушного зазора на β ничтожно.

Итак, R_r возрастает с увеличением $\lambda \rho c$. Стеновое ограждение, обладающее большим R_a , как правило, термически неустойчиво и обладает малой тепловой емкостью при нестационарном тепловом режиме. Действительно, теплоизолятор представляет из себя пористое тело, насыщенное воздухом, то есть средой с небольшими значениями объемной теплоемкости ρc . Воздух держит тепло, но быстро реагирует на изменение температуры, поэтому его тепловая емкость и тепловая инерция ничтожны малы по сравнению с материалами несущих конструкций (бетон, кирпич и т.д.).

В третьей главе приводятся результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния чередования слоев на распределение температуры в толще стены, результаты термометрии стен в условиях стационарного и нестационарного тепловых режимов стеновых ограждений. Результаты экспериментов представлены в виде графиков зависимости температуры различных материалов от времени нагревания и охлаждения в холодильной камере. Приводятся результаты механических и теплотехнических свойств разработанного бетонного композита на основе растительной добавки.

Активное термическое сопротивление стены не зависит от чередования слоев. Распределение же температуры по толщине стены зависит от распределения коэффициента теплопроводности $\lambda = \lambda(y)$ [14, 15]. На рисунке 7 представлена схема стены (1 - кирпич 380 мм, 2 - утеплитель 100 мм, 3 - кирпич 120 мм) и график распределения температуры для стационарных режимов слоистых стеновых ограждений. Для данной трехслойной стены

рассчитана средняя температура в различных (3!) комбинациях чередования слоев.

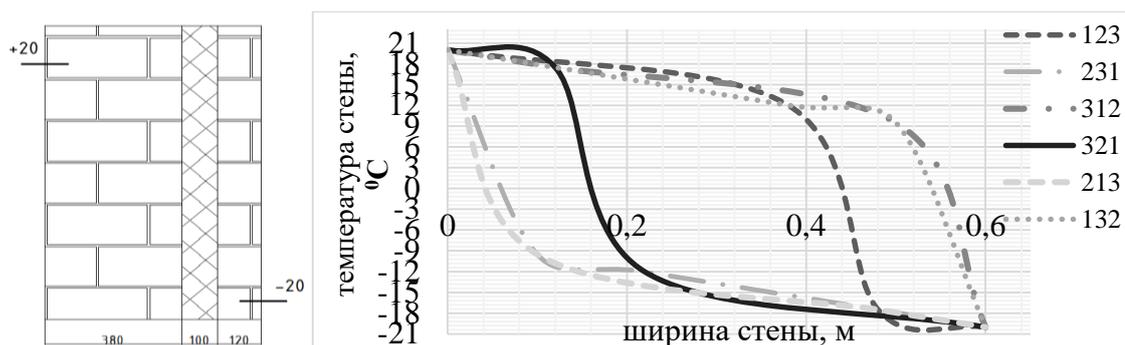


Рисунок 7 – Чередование слоев для максимальной средней температуры

Средняя температура зависит от чередования слоев, тепловой поток не зависит от чередования слоев. Максимальный перепад температур наблюдается в слое с наименьшим λ .

Проведен физический эксперимент по термометрии для стационарного и нестационарного тепловых режимов стеновых ограждений. Тепловые процессы в стене зависят не только от внутренней и наружной температуры воздуха, но также от многих других факторов. Эксперимент проводился в холодильной камере «CHALLENGE 250», с помощью датчиков Dallas DS18B20 измерялась температура материала [16, 17]. Для периодического по времени (квазистационарного) режима выбраны материалы: кирпич – 3 вида, газобетон, железобетон – 2 вида. Для аperiodического режима используются высокопрочные материалы, сравниваются сухие и насыщенные водой материалы. Каждые 30 минут температура изменялась скачкообразно от 0 °C до плюс 20 °C. На рисунке 8 представлены схемы расположения термодатчиков в испытываемых материалах.

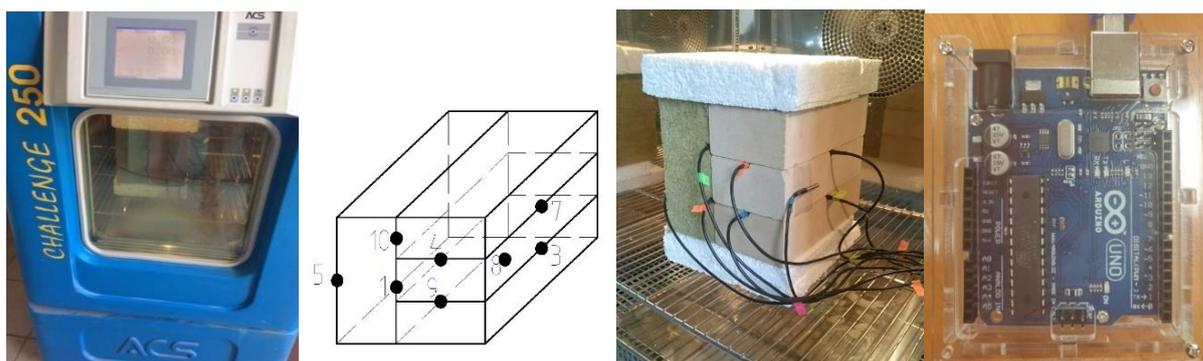


Рисунок 8 – Исходные данные для эксперимента

Результаты показали, что глиняный полнотелый кирпич более теплоустойчив в сравнении с силикатным кирпичом и глиняным пустотелым. Глиняный кирпич продолжает остывать при положительной температуре в камере из-за высокой тепловой инерции материала.

Далее сравнивались газобетон, глиняный кирпич и железобетон. На рисунке 9 представлена зависимость изменения температуры по времени для

материалов. Несмотря на то, что железобетон имеет хорошие термические свойства, арматура в нем играет роль мостиков холода.

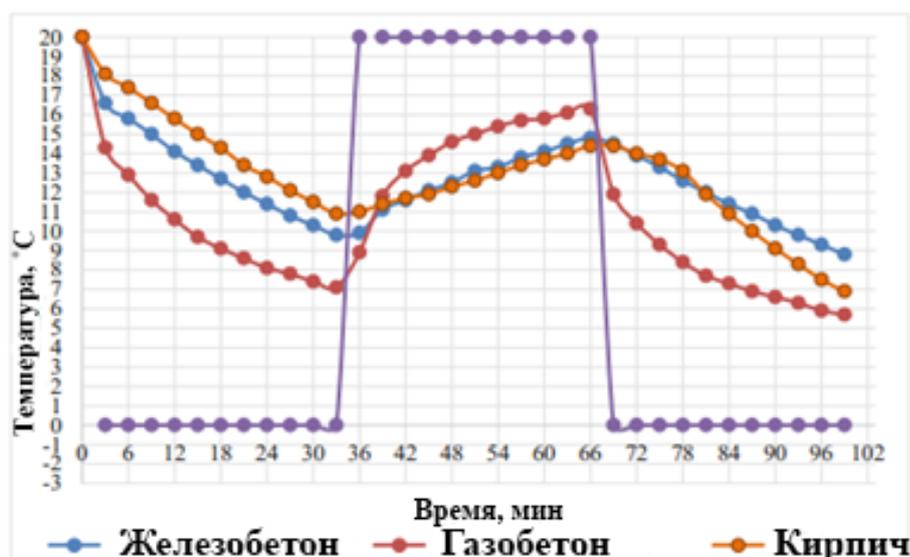


Рисунок 9 – Кривые зависимости температуры материала от времени

Теплоустойчивостью обладают теплопроводные материалы, то есть плотные материалы. Теплоизоляторы неустойчивы так как обладают порами. Пористые среды насыщены воздухом, в этих средах масса твердого скелета мала. Материал, который работает как изолятор тепла (воздух), является плохим аккумулятором тепла.

Сравниваются теплоустойчивости высокопрочного и обычного бетонов. Чем выше прочностные характеристики материала (минимальное количество пор), тем выше его термические свойства. Для достижения больших температурных колебаний в высокопрочном бетоне создан большой размах колебаний температур, например, от плюс 30°C до минус 10°C (рисунок 10).

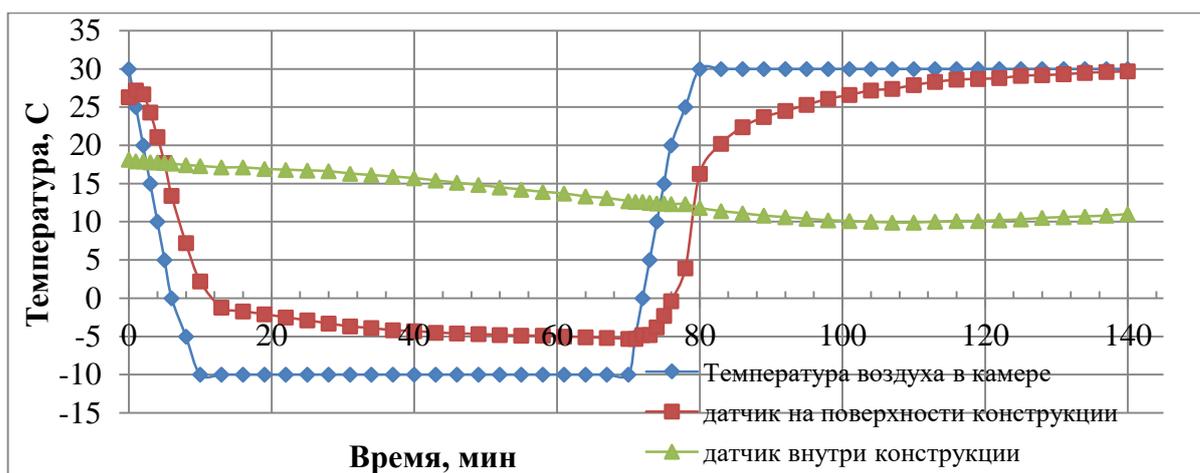


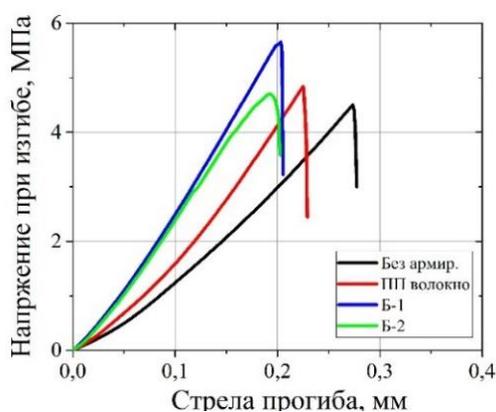
Рисунок 10 – Графики зависимости температуры материала от времени для высокопрочного бетона

Высокопрочный бетон более эффективен в качестве накопителя тепла. Чем больше прочность материала, тем выше его теплоустойчивость. Это связано с тем, что обычный бетон имеет пустые поры, а поры высокопрочного

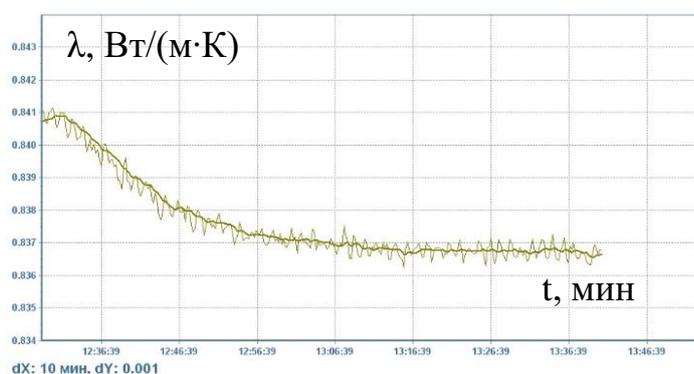
бетона заполнены пластификатором и добавками. Поэтому высокопрочный бетон эффективно гасит колебания температуры. Во влажном высокопрочном бетоне перепад температур значительно больше, чем в сухом высокопрочном бетоне. Из экспериментов и расчетов следует, что влажный высокопрочный бетон имеет меньшую теплоустойчивость.

Выполнена инструментальная погрешность экспериментов, показавшая, что при высокой повторяемости опытов максимальная погрешность определения температуры составляет до 1 %.

Проведена серия экспериментов по определению свойств обычного бетона, армированного сухой растительной добавкой, которая позволяет улучшить теплофизические и механические свойства бетонных композитов. Исследованы механические свойства [18] при изгибе двух типов образцов с добавкой: крупная добавка борщевика длиной 50 мм (Б-1) и средняя добавка борщевика длиной 25 мм (Б-2). Была изготовлена серия образцов из короткого полипропиленового волокна длиной 54 мм, которое является наиболее востребованным при изготовлении волокнисто-армированного бетона. Были проведены испытания на поперечный (трехточечный) изгиб, определена эффективность армирования полученных композитов (рисунок 11а). Полученные результаты выявили определенное увеличение прочности образцов с длинными фрагментами добавок (Б-1), тогда как прирост прочности у оставшихся образцов не являлся статистически значимым.



а



б

Рисунок 11 – Диаграммы зависимости прогиба от изгибного напряжения и экспериментальное определение λ

Показания теплопроводности снимались с устройства ПИТ 2.1 при стационарном тепловом режиме [19]. Предел допускаемой относительной погрешности 3%. Коэффициент теплопроводности композитного материала с добавкой практически в два раза меньше значения обычного бетона, что подтверждает хорошие теплоизоляционные свойства образца (рисунок 11б).

Влияние наполнителя бетона на механические свойства при изгибе образцов было выявлено с помощью однофакторного дисперсионного анализа при уровне значимости 0,05 при последующем сопоставлении по критерию Фишера. Значения прочности при изгибе между четырьмя образцами не имеют статистически значимых различий. Полученные результаты показали,

что влияние типа наполнителя на максимальную прочность при изгибе было значимым для образца Б-1. Из проведенных опытов были получены следующие механические и теплотехнические свойства бетонов, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Механические и теплотехнические свойства бетонов

| Свойство | Ед. изм. | Значения обычного бетона | Значения нового материала | Разница |
|---|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------|
| Теплопроводность | Вт/(м·К) | 1,5 | 0,86 | -43% |
| Плотность | Кг/м ³ | 2400 | 1754 | -27% |
| Температуропроводность | 10 ⁻⁶ м ² /с | 0,83 | 0,79 | -5% |
| R_a для 0,25 м при 0°С снаружи и 18°С внутри | [м ² ·К/Вт] | 0,19 | 0,21 | +11% |
| R_r для 0,25 м | [м ² ·К/Вт] | 0,11 | 0,12 | +11% |
| R для 0,25 м | [м ² ·К/Вт] | 0,30 | 0,33 | +11% |
| Нормальное напряжение | МПа | 3,87 | 4,82 | +20% |

Выполнен анализ механизма взаимодействия добавки и матрицы в композите с помощью оптической микроскопии. В оптимальном случае кристаллы должны прорасти внутрь арматуры, например, в случае щелочестойкого стеклоровинга, или, как минимум должны покрывать поверхность равномерно для лучшего сцепления с матрицей. В данном случае образования на поверхности ухудшают сцепление бетонной смеси и борщевика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты, полученные при выполнении работы:

1 Получено обоснование достаточных условий применимости одномерной модели (метода Сен-Венана): отношение толщины стены h к ее продольным или вертикальным размерам L ограничены, $h/L \ll 1$, все производные выше первых от пограничных температур по продольной координате x равны 0 ($\partial_x^m T = 0, m > 1$). Иначе говоря, пограничные температуры либо постоянны, либо линейные функции от координаты x . Эффект включений, провоцирующих неоднородность температурного поля теплового потока, обусловлен не только неоднородностью материала стенового ограждения, но и ее размерами: в тонкой стене распределение температуры линейное, тепловой поток одномерен и распространяется поперек стены. Эффект «включений» связан с растеканием теплового потока вдоль двумерной стены. Продольные составляющие теплового потока в тонкой стене малы. Наоборот: в стене с «сопоставимыми» размерами (двумерной стене) модуль теплового потока, как правило, больше, чем в одномерной (тонкой) стене, а термическое сопротивление меньше термического сопротивления тонкой стены. Возмущение температурного поля в любой момент времени занимает некоторую часть стены – область температурного пограничного слоя δ_T . В стационарном случае, для

одномерной стены толщина теплового пограничного слоя δ_q в точности равна толщине стены. Поэтому, как правило, $\delta_q/\delta_T > 1$.

2 Понятие активного термического сопротивления стены выражает меру термического качества стены в условиях стационарного температурного режима. Реакция ограждения (реактивное сопротивление) на изменение предельных температур проявляется в тепловой инерции стены (тепловой устойчивости) и в накоплении тепла стеной. При увеличении размерности области активное термическое сопротивление не возрастает. Реализация повышенного термического сопротивления стеновой конструкции требует оценок термической устойчивости и тепловой емкости стены. Доказано, что повышенное активное термическое сопротивление (теплопроводности) недостаточно для обеспечения термического сопротивления стенового ограждения в условиях нестационарных температур воздуха в помещении и снаружи. Для двумерной стены реактивное сопротивление сопоставимы с активным. Для двумерной стены реактивное сопротивление составляет $\pi/2 - 1$ (примерно 57%) от активного сопротивления. Чем больше термическое сопротивление, тем, как правило, меньше теплоустойчивость.

3 Очевидно, активное термическое сопротивление стены не зависит от чередования слоев. Распределение температуры по толщине стены зависит от распределения $\lambda = \lambda(y)$ коэффициента теплопроводности. Физический эксперимент выявил, что менее пористые материалы работают как аккумуляторы тепла, пористые материалы работают как изоляторы. Температурный пограничный слой интерпретируется как слой активной теплопередачи, в котором срабатывает температурный напор. В однородном материале температурные колебания сосредоточены на поверхности (пограничном слое), а остальная часть стены не участвует в процессе передачи теплоты, работает как аккумулятор и демпфер изменений температуры.

4 Разработанные образцы бетонных композитов были испытаны на поперечный изгиб в возрасте 28 суток. Результаты показали, что наибольшим пределом прочности обладает образец борщевика длиной 50 мм. Однако здесь может иметь влияние масштабный фактор, для исключения которого необходимо испытать балки большего размера. В случае остальных образцов не удалось достичь какого-либо статистически значимого эффекта армирования. Теплопроводность обычного бетона в районе 1,5 Вт/(м·К). Это в 1,75 раз больше, чем у бетона с добавкой борщевика. Данный материал не только обладает аналогичными механическими свойствами, но и имеет лучше теплотехнические свойства.

Предметом дальнейших исследований может служить влияние внешнего массообмена (диффузионного числа Био) на температурные и влажностные характеристики стеновых ограждений. Изучение влияния направления поток тепла и массы на распределения влажности и температуры в стеновом ограждении. Провести натурное моделирование по той же методике путем установки всего оборудования и датчиков внутри бетонных и кирпичных зданий и сбора подтверждающих результатов. Требуется

испытания на изгиб крупных образцов бетонных композитов с растительной добавкой.

Список используемой литературы:

1. Селиверстов, Г.А. Математическая теория теплоустойчивости / Г.А. Селиверстов // Математический сборник. – 1931. – № 3-4(38). – С. 70—73.
2. Шкловер, А. М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. / А. М. Шкловер // Издательство Госэнергоиздат. – 1961. – С. 160.
3. Гагарин, В.Г. Учет теплопроводных включений и вентилируемой прослойки при расчетах сопротивления теплопередаче стены с навесной фасадной системой (НФС) / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, К.И. Лушин, Н.Ю. Плющенко // Строительные материалы. – 2016. – № 6. – С. 32-35.
4. Корниенко, С.В. Тестирование метода расчета температурновлажностного режима ограждающих конструкций на результатах тепловизионного обследования жилого здания / С.В. Корниенко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 29(48). – С. 75-79.
5. Туснина, О.А. Теплотехнический расчет конструкций численными методами / О.А. Туснина // Вестник МГСУ. – 2013. – № 11. – С. 91-99.
6. Мусорина, Т.А. Математический аппарат для определения термического сопротивления однородной скалярной среды / Т.А. Мусорина, Д.Д. Заборова, М.Р. Петриченко // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14. – Вып. 8. – С. 1037– 1045.
7. Васильев, А.А. Разработка стеновых ограждений с повышенным термическим сопротивлением - основа энергоэффективного строительства / А.А. Васильев, М.В. Лапата, А.В. Герашенко // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2011. – № 1 (22). – С. 98-102.
8. Biddulph, P. Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements / Phillip Biddulph, Virginia Gori, Clifford A.Elwell, Cameron Scott, Caroline Rye, Robert Lowe, Tadj Oreszczyn // Energy and Buildings. – 2014. – Vol. 78. – P. 10-16.
9. Козинец, Г.Л. Термическое сопротивление однородной изотропной теплопроводной среды / Г.Л. Козинец, Е.А. Локтионова, Т.А. Мусорина, М.Р. Петриченко // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 16(68). – С. 105-110.
10. Gagarin, V. Moisture behavior calculation of single-layer enclosing structure by means of discrete-continuous method / V. Gagarin, V. Akhmetov, K. Zubarev // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 03014.
11. Vasilyev, G.P. Simulation of heat and moisture transfer in a multiplex structure / G.P. Vasilyev, V.A. Lichman, N.V. Peskov, M.M. Brodach, Y.A. Tabunshchikov, M.V. Kolesova // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 86. – P. 803– 807.
12. Parasonis, J. Increasing energy efficiency of the translucent enclosure walls of a building / J. Parasonis, A. Kezikas // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 869–875.
13. Корниенко, С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 8. – С. 25–37
14. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков // Минск: Изд-во академии наук БССР. – 1961. – 520 с.
15. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин; под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
16. Спешилова, В.М. Устройство измерения температуры при создании микроклимата в теплице на базе микроконтроллерной платы «Ардуино» / В.М. Спешилова, Ю.В. Иванов // Вестник Студенческого научного общества. – 2018. – Т. 9. – № 2. – С. 81–84.

17. Халиуллин, А.И. Система регулировки подачи газа теплового котла на платформе Arduino с использованием датчика температур DS18B20, сервопривода и GSM-модуля для оповещения / А.И. Халиуллин, М.В. Медведев // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых — 2015: сб. науч. ст. 4-й Международный. молодежной науч. конф. Курск : Университетская книга. – 2015. – С. 81–83.
18. Волкова, А.А. Структура и свойства текстильно-армированного бетона / А.А. Волкова, А.В. Пайков, О.Н. Столяров, С.Г. Семенов, Б.Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №7. – С.50–56.
19. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – М.: 1999. – 23 с.

По теме исследования опубликованы работы: издания из Перечня периодических научных изданий, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

- 1 Заборова, Д.Д. Математическая модель энергетической эффективности слоистых строительных ограждений / Д.Д. Заборова, М.И. Куколев, **Т.А. Мусорина**, М.Р. Петриченко // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2016. – № 4(254). – С. 28-33.
- 2 Заборова, Д.Д. Теплотехническая работоспособность многослойной стеновой конструкции / Д.Д. Заборова, **Т.А. Мусорина**, М.Р. Петриченко // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – № 1 (23). – С. 18-26.
- 3 **Мусорина, Т.А.**, Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений / Т.А. Мусорина, О.С. Гамаюнова, М.Р. Петриченко // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – Вып. 11 (110). – С. 1269–1277.
- 4 **Мусорина, Т.А.** Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле / Т.А. Мусорина, М.Р. Петриченко // Строительство: наука и образование. – 2018. – № 3(8). – С. 35-53.
- 5 **Мусорина, Т.А.** Thermal regime of enclosing structures in high-rise buildings / Т.А. Мусорина, О.С. Гамаюнова, М.Р. Петриченко // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – Вып. 8(119). – С. 935–943
- 6 **Мусорина, Т.А.** Теплотехнические свойства энергоэффективного материала на основе растительной добавки (сухой борщевик) / Т.А. Мусорина, Е.А. Наумова, Е.В. Шонина, М.Р. Петриченко, М.И. Куколев // Вестник МГСУ. – 2019. – № 12 (14). – С. 1555–1571.
- 7 **Мусорина, Т.А.** Математический аппарат для определения термического сопротивления однородной скалярной среды / Т.А. Мусорина, Д.Д. Заборова, М.Р. Петриченко // Вестник МГСУ. – 2019. – № 8(14). – С. 1037–1045.
- 8 Козинец, Г.Л. Термическое сопротивление однородной изотропной теплопроводной среды / Г.Л. Козинец, Е.А. Локтионова, **Т.А. Мусорина**, М.Р. Петриченко // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 16(68). – С. 105-110.

9 Мусорина, Т.А. Определение активного и реактивного сопротивления для однослойного стенового ограждения / **Т.А. Мусорина**, М.Р. Петриченко, Д.Д. Заборова, О.С. Гамаюнова // Вестник МГСУ. – 2020. – № 8(15). – С. 1126–1134.

10 Петриченко, М.Р. Операция дробного дифференцирования в предельных задачах Фурье / М.Р. Петриченко, **Т.А. Мусорина** // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2020. – № 2 (13). – С. 41-52.

Публикации международной системе WoS, SCOPUS:

11 Petrichenko, M. Functionality of ventilated facades: protection of insulation. / M. Petrichenko, **T. Musorina**, E. Statsenko, A. Ostrovaia, V. Tarasov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Т. 53. – p. 01036.

12 Statsenko, E., The elementary mathematical model of sustainable enclosing structure / E. Statsenko, A. Ostrovaia, **T. Musorina**, M. Kukolev, M. Petrichenko // Magazine of Civil Engineering. – 2016. – No 8 (68). – Pp. 86-91.

13 Statsenko, E. Moisture transport in the ventilated channel with heating by coil / E. Statsenko, **T. Musorina**, A. Ostrovaia, V. Olshevskiy, A. Antuskov // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No 2. – Pp. 11–17.

14 Castro, J. Indoor environment of a building under the conditions of tropical climate / J. Castro, D. Zaborova, **T. Musorina**, I. Arkhipov // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No 8 (76). – Pp. 50-57.

15 Vieira, G. Behavior of a hollowed-wood ventilated facade during temperature changes / G. Vieira, M. Petrichenko, **T. Musorina**, D. Zaborova // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No 79(3). – Pp. 103-111.

16 **Musorina, T.** Thermal properties of conventional and high-strength concrete / T. Musorina, A. Katsai, M. Petrichenko, A. Selezneva // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018). MATEC Web of Conferences. – 2018. – p. 06005

17 Gamayunova, O. Warming of panel houses in various climatic zones / O. Gamayunova, **T. Musorina**, M. Petrichenko, V. Goremikins // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Т. 70. – Pp. 253-263