

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
институт
Проектирование зданий и экспертиза недвижимости
кафедра


УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Р.А. Назиров
подпись, инициалы, фамилия

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Расчет стеновых ограждений в нестационарном режиме теплопереноса
тема

08.04.01 «Строительство»
код и наименование направления

08.04.01.04 «Проектирование зданий. Энерго- и ресурсосбережение»
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	д-р.техн.наук, зав. кафедрой	<u>Р. А. Назиров</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник			<u>К. А. Сазанаква</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	_____	_____
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2020

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Анализ состояния вопроса энергоэффективности зданий	7
1.1 Анализ состояния жилищного фонда и потребления тепловой энергии	7
1.2 Предпосылки повышение энергоэффективности	9
1.3 Регулирование тепловой защиты зданий.....	12
1.4 Обзор отечественного и зарубежного опыта.....	13
1.5 Устройство, достоинства и недостатки навесных вентилируемых фасадов	16
1.6 Классификация навесных вентилируемых фасадов.....	19
1.7 Анализ нормативной документации проектирования навесных систем	21
1.8 Анализ рынка навесных вентилируемых фасадов.....	22
1.8 Выводы по первой главе.....	26
ГЛАВА 2 Теория теплофизики и методика расчета.....	27
2.1 Механизмы теплопередачи	27
2.1.1 Теплопроводность	27
2.1.2 Коэффициент теплопроводности материала	29
2.1.4 Условия однозначности	31
2.1.5 Граничные условия для поверхности исследуемого объекта.....	31
2.1.6 Температурные волны на наружных поверхностях ограждающих конструкций.....	32
2.1.7 Уравнение массопереноса	34
2.2 Оценка влажностного режима ограждения. Методы расчета	35
2.2.1 Методы расчета влажностного режима наружных ограждающих конструкций.....	35
2.2.2 Расчет ограждающих конструкций на конденсацию влаги.....	37
2.3 Моделирование и оптимизация процессов переноса	39
2.3.1 Методика проведения теоретических расчётов строительных конструкций с использованием программы «COMSOL Multiphysics»	39
3 Анализ результатов эксперимента	42
3.1 1 Физико-математическая модель.	42

3.1.2 Объект исследования и условия однозначности.....	42
3.1.3 Расчетные теплотехнические характеристики материалов	43
3.1.4 Параметры наружного климата	44
3.1.5 Граничные условия	46
3.2 Результаты статических расчётов.....	47
3.2.1 Результаты расчета температурных полей	47
3.2.2 Результаты расчета влажностного режима.....	50
3.2.3 Определение зоны конденсации влаги	52
3.3 Результаты нестационарного расчета	54
3.3.1 Результаты расчета температурных полей	54
3.3.2 Результаты расчет влажностного режима	57
3.3.3 Определение зоны конденсации влаги	59
3.4 Сравнительный анализ.....	61
3.5 Выводы по третьей главе.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	63

ВВЕДЕНИЕ

Энергетический ресурс является одним из важнейших сегментов в экономике и развитии стран. В современной архитектуре создание оптимальных параметров микроклимата помещений достигается применением системы нагрева и охлаждения, требующих большие расходы энергии. Однако, с ростом числа населения и процесса урбанизации потребление энергии ежегодно стремительно увеличивается.

С точки зрения экологической ситуации, непрерывного роста цен на ресурсы, сокращения энергетических природных запасов данная тема становится особенно актуальной и направленной на эффективное использование различных источников энергии, что в свою очередь обуславливает необходимость развития современных технологий в области энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий.

Актуальность темы исследования. В настоящее время «жилой фонд зданий в Российской Федерации признан неэффективным и большой процент застройки представлен панельными домами 1950-1980-х годов. В результате превышения сроков эксплуатации фасады зданий подверглись физическому и моральному износу, а именно интенсивному воздействию атмосферных осадков и, соответственно, не удовлетворяют современным нормам энергосбережения и теплотехническим требованиям» [1].

В России здания и сооружения должны соответствовать требованиям к ограждающим конструкциям, приведенных в Федеральном законе № 261 от 2009 года «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и СП 50.13330.2012, в целях обеспечения тепловой защиты [1].

Одним из технических решений повышения энергоэффективности ограждающих конструкций зданий является дополнительное наружное утепление ограждающих конструкций навесными вентилируемыми фасадами.

Однако, в современной практике недостаточно опыта эксплуатации навесных вентилируемых фасадов в условиях Сибири и область их расчетов ограничена стационарными условиями тепломассопереноса при максимальных температуре и влажности.

Строительный опыт, научные, практические и фундаментальные исследования показывают, что в реальных эксплуатационных условиях наружные ограждающие конструкции работают в нестационарном режиме, то есть периодически изменяющихся температурно-влажностных условиях: день-ночь, зима-лето. Соответственно, наилучшим способом проанализировать работу конструкций в реальных условиях является выполнение расчета исследуемой конструкции в программном комплексе с приложением реального хода температур.

Объектом исследования является железобетонная трёхслойная стеновая панель.

Целью диссертационного исследования является оценка влияния навесного фасада на температурный и влажностный режим наружной ограждающей конструкции.

В соответствии с намеченной целью поставлены следующие задачи:

- провести анализ литературных источников и публикаций с целью изучения состояния вопроса о методах исследования тепловлажностных процессов, протекающих в многослойных ограждающих конструкциях;

- построить физико-математическую модель процессов тепломассопереноса рассматриваемой ограждающей конструкции с учетом реального хода температур в программном комплексе;

- исследовать тепломасообменные процессы в рассматриваемой конструкции при стационарном и нестационарном режиме;

- построение профилей температур, парциального давления насыщенного водяного пара и парциального давления водяного пара;

- определение наличия зон конденсации в ограждающих конструкциях;

Методы исследования основываются на комплексном подходе, включающий математическое моделирование процессов теплопередачи методом конечных элементов (МКЭ) и аналитический метод.

Научная новизна:

1. Исследована работа наружных стеновых панелей, принятых к строительству в г. Красноярске с дополнительным утеплением в виде навесного вентилируемого фасада (НВФ) в нестационарных температурно-влажностных условиях. Полученные расчётные данные выполнены на основе среднесуточных температур и относительной влажности окружающей среды.

2. Установлено, что в зоне анкера крепления НВФ к существующему защитному слою стеновой панели, создаётся зона слабо отрицательных температур (до минус 3⁰С при минус 35⁰С наружного воздуха), что позволяет констатировать факт минимального влияния на климатическую долговечность крепления НВФ.

3. Полученные расчёты в нестационарных условиях влагонакопления в исследуемой конструкции, наглядно показали, что применение НВФ снижает количество влаги в толще конструкции в 2 раза и в слое утеплителя в 5 раз.

Практическая значимость работы:

1. Установлена, необходимость внедрения в практику проектирования расчетов в нестационарном режиме, как наиболее объективного способа рационального проектирования. При этом стационарный расчет может быть использован, как расчет на экстремальные нагрузки при дополнительном обосновании расчетных средних суточных, недельных, декадных или месячных значений температур и влажности.

2. Установлено, что дополнительное утепление навесным вентилируемым фасадом трехслойных железобетонных панелей является перспективным, не несет риска переувлажнения конструкции и может быть использован для нового строительства из сборного железобетона, при этом обеспечивая климатическую долговечность зоны анкера крепления НВФ.

ГЛАВА 1 Анализ состояния вопроса энергоэффективности зданий

1.1 Анализ состояния жилищного фонда и потребления тепловой энергии

В настоящее время жилой фонд зданий в Российской Федерации признан неэффективным, как в вопросах эффективного энергопользования, так и надлежащего состояния.

По данным Управления федеральной службы статистики по Красноярскому краю, республике Хакасия и республике Тыва на конец 2018 года жилищный фонд Красноярского края составлял 71,7 миллиона м², что на 1,3 % больше относительно 2017 года [2].

Удельный вес жилищного фонда, расположенного в деревянных строениях, составлял 29,6 %, панельных – 30,7 %, каменных и кирпичных - 31,6 %, смешанного типа - 2,5 %, блочных – 2,4 %, монолитных – 2 %, прочих – 1,2 % от общей площади жилых помещений [2].

Однако, согласно стратегии социально-экономического развития Красноярского края, на период до 2020 года удельный вес ветхого и аварийного жилья в целом по краю равен 4,8% от общей площади жилищного фонда, что выше средних показателей по России (3,1%) [3].

Доля жилых домов, построенных в 1946-1970 годы составляет 37,6 % и 50,1 % многоквартирных жилых домов 1971-1995 годов [4].

Несмотря на высокие объемы капитального ремонта в крае с использованием средств Фонда содействия реформированию ЖКХ, ежегодно необходимо сносить не менее 3% старого фонда и капитально ремонтировать, как минимум, 4-5% жилищного фонда [3].

Известно, что больше трети всей вырабатываемой энергии страны расходуется на эксплуатацию жилых, гражданских и промышленных зданий с целью поддержания требуемых температур в помещениях в зимний период [5].

Как видно на диаграмме (рис 1.1) от 2 до 13 % потребляемой энергии распределяется на электроприборы и освещение, самая большая доля (почти 50 %) расходуется на обогрев помещения в холодное время года, и на охлаждение - в тёплое, при этом тепловые потери через ограждающие конструкции для домов, построенных до 1995 года составляют:

- стены – 39 %;
- покрытие и цокольное перекрытие – 8 %;
- светопрозрачные конструкции квартир– 21 %;
- окна на лестничных клетках – 15%;
- кровля - 17% [6]



Рисунок 1 – Расход энергии в быту

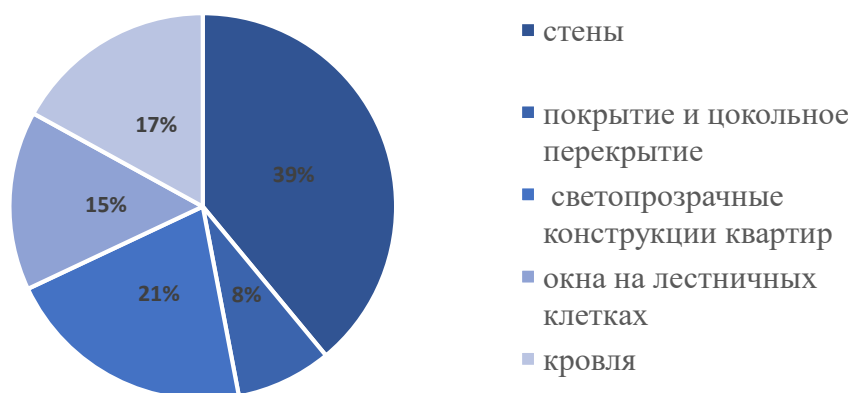


Рисунок 2 – Теплотери жилых многоквартирных домов, %

Одним из основных факторов, влияющих на величину теплопотерь через ограждающие конструкции является сопротивление теплопередачи. Сопротивление теплопередаче для жилых домов до 1995 года составляет $0,76 - 0,98 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, что не соответствует современному базовому значению требуемого сопротивления теплопередаче наружных стеновых ограждения для г. Красноярск $R_0^{mp} = 3,66 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ [13].

1.2 Предпосылки повышение энергоэффективности

Повышение эффективности является одной из самых серьезных задач XXI века [7].

Основываясь на мировую практику и опыт ведущих стран, прогресс в области ресурсосбережения был достигнут путем создания законодательной и правовой базы, а именно законов об энергосбережении и государственных программ по энергосбережению.

Так, в европейских государствах действует Программа СЕРНЕиБ «Эффективные по себестоимости пассивные дома как европейский стандарт», а также декларируется цель достижения ультранизкого и даже нулевого уровня потребления энергии зданиями [8].

В 50е – 60е годы в России наблюдался рост массового строительства на всей территории страны, что повлекло за собой появление нормативной документация в области теплотехнике. Изначально, требования к сопротивлению теплопередаче наружных ограждающих конструкций были минимальны, и основывались на недопущение скопления конденсата на внутренней поверхности ограждающих конструкций.

Примерно в это же время были созданы первые НИИ в различных отраслях народного хозяйства и отечественная школа теплофизики под руководством К.Ф. Фокина, О.Е. Власова, А.В. Лыкова.

К середине 90-х годов в Российской Федерации сложилась ситуация, требующая решительных действий по сокращению расходов материальных и энергетических ресурсов, что послужило принятием мер к формированию научной и правовой базы энергосбережения.

В 1995 году было принято решение о снижении потребления тепловой энергии на отопление зданий, за счет постепенного увеличения требований к сопротивлению теплопередачи ограждающих конструкций, таким образом предполагалось к 2000 году достичь снижения потребляемой энергии на 30%.

В марте 1995 года был принят первый Федеральный закон «О государственном регулировании тарифов на электрическую и тепловую энергию в Российской Федерации», которые позволил реализовать программы по управлению энергоресурсов в России.

Правительством РФ 7 декабря 1994 года была принята «Энергетическая стратегия России» на период до 2010 года, направленная на «повышение жизненного уровня населения за счет роста прямых энергетических услуг, осуществляемых при углублении электрификации и газификации быта, села и общественного транспорта, и повышении эффективности использования энергии» [9].

Продолжением этого курса является «Энергетическая стратегия России» на период до 2020 года, принятая Правительством РФ 28 августа 2003 года и сформированная с учетом оптимизации топливно-энергетического баланса России по структуре и в разрезе отраслей и регионов.

Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 1995 года №472 были утверждены «Основные направления энергетической политики Российской Федерации на период 2010 года». В качестве приоритетного направления развития энергетической политики России определена «реализация потенциала энергосбережения за счет создания и внедрения высокоэффективного топливно- и

энергопотребляющего оборудования, теплоизоляционных материалов и строительных конструкций» [9].

Анализ проведения энергетической стратегии за 90-е годы свидетельствует о том, что был проделан большой объем работ, в результате которых были сформированы основы нормативно-правовой базы энергосбережения, изучения зарубежного опыта, определялись подходы и направления решения проблемы роста энергетической эффективности.

Следующим этапом был принят СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» [10], в котором был представлен расчёт сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций, расчет образования температуры точки росы и расчёт общего энергопотребления.

Современное состояние в области энергоэффективности направлено на практическую реализацию нормативно-правовых положений в сфере повышение энергоэффективности строительного комплекса.

Федеральный закон № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», принятом в 2009 году направлен на «создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности» [11].

Основополагающими принципами закона стали:

- 1) «эффективное и рациональное использование энергетических ресурсов»;
- 2) «поддержка и стимулирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности»;
- 3) «системность и комплексность проведения мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности»;

4) «планирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности» [11].

Основные требования по тепловой защите и энергоэффективности зданий отражены в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [12] и Федеральном законе № 384–ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [13].

Государственная информационная система (ГИС) «Энергоэффективность» [14] является одним из инструментов контроля соблюдения требований ФЗ №261 и выполнения мероприятий по повышению энергоэффективности, установленных энергетической стратегией России на период до 2030 года [11].

Как итог, в связи с принятием вышеперечисленных нормативных документов все здания и сооружения, подлежащие реконструкции, должны будут соответствовать современным требованиям энергоэффективности. Наиболее простым, экономически выгодным и освоенным методом повышения теплоизоляционных свойств наружных ограждающих конструкций является применение навесных вентилируемых фасадов [15].

1.3 Регулирование тепловой защиты зданий

На сегодняшний день основным документом, регулирующим проектирование тепловой защиты строящихся или реконструируемых жилых, общественных и производственных зданий, в которых необходимо поддерживать определенный температурно-влажностный режим является СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [12].

Согласно нормативной документации теплозащитная оболочка здания должна отвечать следующим требованиям:

а) приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений (поэлементные требования);

б) удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения (комплексное требование);

в) температура на внутренних поверхностях ограждающих конструкций должна быть не ниже минимально допустимых значений (санитарно-гигиеническое требование).

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции — это физическая величина, характеризующая усредненную по площади плотность потока теплоты через фрагмент теплозащитной оболочки здания в стационарных условиях теплопередачи, численно равная отношению разности температур по разные стороны фрагмента к усредненной по площади плотности потока теплоты через фрагмент [16].

1.4 Обзор отечественного и зарубежного опыта

Проблема снижения энергозатрат и повышение энергоэффективности зданий обусловила необходимость изучения процессов тепломассобмена, прогнозирования температурно-влажностного режима ограждающих конструкции и повышения надежности теплотехнических расчетов [17].

Особый вклад в разработку методов расчета влажностного режима ограждений и исследования влажностных характеристик строительных материалов внесли отечественные теплофизики В.Н. Богословский [18], А.В. Лыков [16], А.У. Франчук, С.В. Александровский, К.Ф. Фокин, В.М. Ильинский, В.И. Лукьянов, В.Г. Гагарин, А.И. Ананьев, А.Г. Перехоженцев, В.Д. Мачинский, С.В. Федосов, В.Н. Куприянов, С.П. Рудобашта, Е.И. Тертичник, а так же опыт иностранных исследователей - О. Krischer, К. Gertis, L.G. Miller, Н. Glaser, Н.М. Künzels, Н.В. Woolley и другие ученые. Значимые вопросы энергоэффективности зданий рассмотрены в статьях [19-22].

В статье Корниенко С.В [23] описан метод расчет температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций зданий на основе физико-математической модели совместного нестационарного

тепловлагодпереноса. Данная модель основана на теории потенциала влажности В.Н. Богословского [18].

В статье [24] приведен расчет оценки влажностного режима трехслойной стеновой конструкции с неветилируемой и с хорошо-ветилируемой воздушной прослойкой, расположенной между теплоизоляционным слоем и лицевым слоем кирпичной кладки. Для сравнительной оценки влажностный режим был рассчитан для Санкт-Петербурга и Казани, которые имеют отличительные характеристики по эксплуатации наружных ограждающих конструкций. Автором было доказано, что в конструкции с неветилируемой воздушной прослойкой происходит прирост влаги в период влагонакопления, а использование в конструкциях наружных стен хорошо-ветилируемой воздушной прослойки позволяет улучшить влажностный режим ограждающих конструкций.

В статье [25] представлена методика неразрушающего контроля теплотехнического состояния ограждающих конструкций, позволяющая определить теплозащитные и теплофизические свойства конструкций в натуральных условиях.

Вопросы оценки физико-технических характеристик ограждающих конструкций и повышения точности тепловизионных измерений отражены в статьях [26-28].

Ранее в наших исследованиях была опубликована статья [1], в которой был проведен обзор литературы и научных публикаций по «проблеме повышения энергоэффективности зданий навесными ветилируемыми фасадами».

«Авторами ряда статей была затронута проблема образования «мостиков» холода в местах включения теплопроводных элементов. Так, в работе Назирова Р.А и Белова Т.В. были проведены расчёты, позволяющие оценить влияния теплопроводности при совместной работе внутреннего теплоизоляционного слоя наружной ограждающей конструкцией с конструкцией НВФ в климатических

условиях г. Красноярска. Расчёт был проведен на основании двух моделей из трёхслойной железобетонной панели с эффективными утеплителями из пенополистирола и минеральной ваты» [1].

«Авторы представили результаты расчетов температурных полей в узловой системе крепления анкерочных элементов вентилируемого фасада к стеновым ограждающим конструкциям. Установлено, что при устройстве внутри стеновой конструкции теплоизоляционного слоя происходит увеличение сопротивления теплопередачи, а как следствие уменьшение значения теплового потока и увеличение зон пониженных температур в стеновом ограждении в узлах крепления анкера» [1].

«По результатам расчетов было выявлено, что зоны относительных пониженных температур образуются в наружных ограждающих конструкциях с внутренним утеплителем при температурах наружного воздуха минус 10°C. Однако с понижением температур влияние металлического анкера на глубину промерзания теплозащитного слоя значительно уменьшается или практически отсутствует» [1].

«В работе Немовой Д.В. были рассмотрены проблемы систем навесных вентилируемых фасадов, связанные с шириной вентилируемого зазора, требуемым сопротивлением теплопередачи и пожаробезопасностью. В ходе работы было выявлено, что особую опасность в системах вентилируемых фасадов представляют изделия на полимерной основе, относящиеся к группе горючих материалов. В статье были приведены примеры возгорания на 17-м этаже нового 31-этажного высотного здания на ул. Бабушкина в Москве и пожар жилого массива «Атлантис» во Владивостоке» [1].

«Одним из важных аспектов применения систем НВФ является обоснованность экономической эффективности. Этому вопросу посвящена магистерская диссертация Е.А. Сапегинной. Так, в рамках диссертации были представлена методика расчета энергоэффективности систем вентилируемых

фасадов, определены наиболее важные характеристики при эксплуатации системы. Исходя из полученных результатов, система НВФ характеризуется невысокими долговечностью, экономической и энергетической эффективностями» [1].

«В статье Туснина О. А., Емельянов А. А., Туснина В. М. приведен анализ сравнения теплотехнических показателей двух конструктивных систем вентилируемого фасада, представленные облицовками керамогранитными плитами распространенного типа и разработанной авторами, где крепление осуществляется с помощью анкеров и резьбовых шпилек. Авторами был произведен теплотехнический расчет описанных выше систем НВФ численным методом при помощи комплекса THERM. По результатам расчета можно сделать вывод, что разработанная конструкция НВФ обладает более высокими теплотехническими свойствами в сравнении с традиционными системами» [1].

«В предлагаемой конструкции НВФ анкерные элементы могут быть изготовлены из стеклопластика, который повышает коэффициент однородности системы, но его применение требует дополнительных исследований в области пожарной безопасности, долговечности и надежности» [1].

1.5 Устройство, достоинства и недостатки навесных вентилируемых фасадов

«В настоящее время в строительной сфере широкое распространение получили навесные вентилируемые фасады (НВФ), как одни из современных и популярных технологий внешней облицовки стен зданий. Впервые НВФ появились в Европе в конце 1970-х гг. с целью защиты наружной стены зданий от агрессивного воздействия природных явлений и обновления фасадов при осуществлении реконструкции здания. В России НВФ стали популярны в 1990-х гг., как дешёвый и быстрый способ увеличения требуемого сопротивления теплопередачи» [1].

Навесной вентилируемый фасад – это конструктивная система, представленная из отдельных слоев, располагающихся в следующем порядке: несущая стена, теплоизоляция, воздушный зазор, декоративный экран (рис 1.) [29].

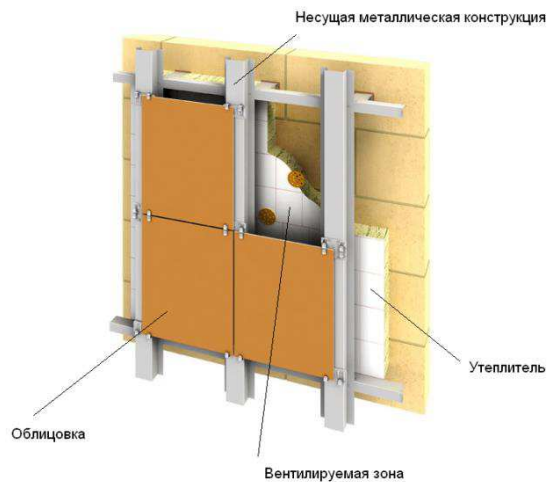


Рисунок 3 – Конструкция навесного вентилируемого фасада

Вентилируемые фасады получили широкое применение при строительстве жилых комплексов, торговых и производственных сооружений, с целью создания оригинальной наружной декоративной отделки и защиты несущих стен от неблагоприятных внешних воздействий. Применение конструкции возможно, как в новом строительстве, так и при реконструкции существующих зданий.

Вентилируемый фасад выполняет не только эстетическую функцию, но и обеспечивает повышение теплозащитных свойств наружных ограждающих конструкций, огнеупорность, дополнительную звукоизоляцию и защиту от деформации. На рисунке 2 представлена диаграмма объектов, на которые устанавливаются системы навесных вентилируемых фасадов.

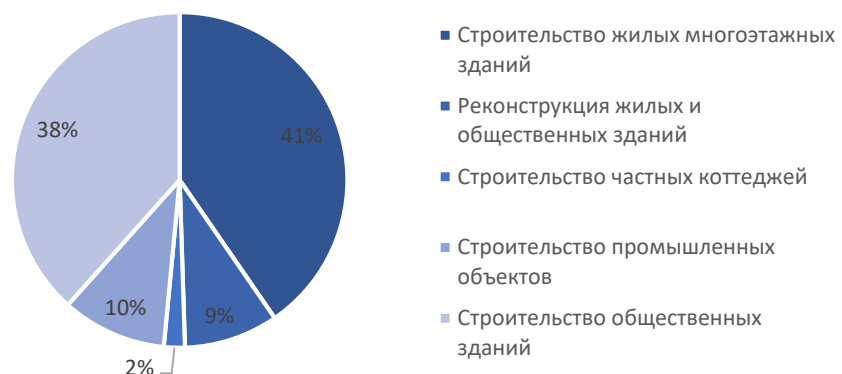


Рисунок 4 – Объекты, на которые устанавливаются системы навесных вентилируемых фасадов

Функциональные особенности навесных вентилируемых фасадов:

- Наличие дополнительного теплоизоляционного слоя лучше защищает стеновое ограждение от переменного замерзания и оттаивания, кроме того увеличиваются теплоаккумулирующие свойства стенового ограждения;
- Снижаются энергозатраты на поддержание микроклимата внутри здания;
- «Отсутствие скопления конденсата, удаляющегося методом естественной вентиляции за счет воздушной прослойки [1]»;
- Длительный безремонтный срок эксплуатации фасада, по сравнению, например, с фасадами штукатурного типа. Ориентировочный проектный безремонтный срок службы вентилируемых фасадов составляет 30-40 лет в зависимости от применяемых материалов;
- Работы по монтажу навесных вентилируемых фасадов возможно производить в любое время года, не зависимо от метеорологических условий;
- Защита стеновой конструкции от атмосферных осадков и агрессивного воздействия окружающей среды;
- Применение теплоизоляционного материала с наружной стороны увеличивает звукоизоляционные характеристики наружных ограждающих конструкций – от 5 до 14 db;
- Отсутствие специальных требований к качеству поверхности стен, на которые монтируется навесной вентилируемый фасад. Монтаж может производиться на стеновые конструкции, выполненные практически из любого материала (бетон, керамический кирпич, металлоконструкции и др).
- Большой выбор различных материалов для выполнения защитно-декоративного экрана, предоставляет архитекторам широкий спектр возможностей по оформлению фасадов зданий.
- Выравнивание нарушенной геометрии здания. Расстояние от основания до вертикального профиля, благодаря чему можно компенсировать отклонения основания от плоскости, позволяет изменить конструкцию узла соединения промежуточного профиля с анкерными уголками, кроме того, расстояние от профиля регулируется за счет применения различных анкерных уголков.

Широкое применение НВФ в строительной сфере, способствовало появлению многослойных конструкции, с большим количеством теплотехнических неоднородностей, которые требуют детального изучения, особенно в условиях низких отрицательных температур [30].

Несмотря на положительные функциональные особенности навесных вентилируемых фасадов, такая конструкция несёт в себе и существенные недостатки:

- Нарушение теплотехнической однородности ограждающих конструкций приводит к перерасходу утеплителя или несоответствию стеновой конструкции требованиям СП 50.13330.2012 [12];

- При повышенной воздухопроницаемости стены при большом тепловом напоре проявляется эксфильтрация внутреннего воздуха, и как следствие увеличение влажности конструкции и теплопотерь [30];

- Образование зон пониженных температур в местах включения теплопроводных элементов;

- Плохая вентиляция или отсутствие вентилируемого зазора требуемой ширины, большое сопротивление паропроницанию ветрозащитной мембраны служит причиной систематического накопления влаги в конструкции, и как следствие, снижение сопротивления теплопередачи конструкции, долговечности материалов и ухудшение внешнего вида здания [31].

При квалифицированном выполнении расчёта и подборе материалов навесного вентилируемого фасада, с последующим качественным выполнением работ по монтажу навесного вентилируемого фасада, можно избежать большинства этих проблем, за исключением теплотехнической неоднородности, вызванной непосредственно конструкцией НВФ.

1.6 Классификация навесных вентилируемых фасадов

Существуют различные системы классификации навесных вентилируемых фасадов, все они включают в себя такие параметры как:

- Тип защитно-декоративного экрана;
- Вид облицовочного материала;
- Расположение воздушного вентилируемого зазора;
- Тип организации вентиляции в воздушном зазоре;
- Тип утеплителя;
- По материалу подсистемы.

По типу защитно-декоративного экрана навесные вентилируемые фасады могут быть сплошными (профилированный лист, металлический сайдинг) или из штучных материалов (композитные алюминиевые панели, керамогранит).

Классификация вентилируемых фасадов по виду облицовочного материала:

- НВФ с облицовкой из керамогранита. В свою очередь делятся по способу крепления облицовочных плит на фасаде, различают системы с видимым и скрытым креплением;
- НВФ с облицовкой из фиброцементных плит;
- НВФ с облицовкой из алюминиевых композитных панелей;
- НВФ с облицовкой из стеклянных панелей;
- НВФ с облицовкой из натурального или искусственного камня.

По типу расположения вентилируемого зазора навесные вентилируемые фасады могут быть с воздушным зазором между утеплителем и декоративным экраном, или навесные вентилируемые фасады с воздушным зазором между утеплителем и несущей стеновой конструкцией.

По типу организации вентиляции в воздушном зазоре навесные вентилируемые фасады делят на системы с естественной и принудительной вентиляцией

В качестве утеплителя могут использоваться различные материалы как мягкие плиты такие как минеральная вата, так и жёсткие, например, пенополистирол. Вентилируемые фасады в зависимости от наличия теплоизоляционного слоя могут быть:

- Вентилируемые фасады с утепляющим слоем;

- Вентилируемые фасады без утеплителя

Классификация по материалу подсистемы:

1. Алюминиевые фасадные системы.
2. Фасадные системы из оцинкованной стали.
3. Фасадные системы из нержавеющей стали.

1.7 Анализ нормативной документации проектирования навесных систем

В конце 1980х годов в нашей стране, нормативно-правовая база полностью соответствовала выпускаемым, и применяемым строительным материалам, конструкциям и технологиям строительства. Однако, в начале 1990х годов, строительный рынок наполнился большим количеством новых, для нашей страны, материалов и конструкций, систем, не попадающих под действующую нормативную базу. При недостатке государственной нормативной документации (ГОСТы, СНиПы и др) имеется переизбыток документации, разрабатываемой производителями (ТУ, рекомендации по проектированию и др).

Ещё 10-15 лет назад это был болезненный вопрос, на сегодняшний день ситуация улучшается, с введением новой нормативной документации, учитывающей номенклатуру применяемых материалов и изделий. Аналогичная ситуация была (и частично сохраняется) в сфере навесных вентиляруемых фасадов. 27 декабря 1997 года вышло постановление правительства №1636, согласно которому вся новая строительная продукция должна быть подтверждена техническим свидетельством. Одним из первых документов, в котором были описаны, и сформулированы первые требования к навесным вентиляруемым фасадам был СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений» [32]. Согласно этому СНиП, перед применением фасадных систем, необходимо провести испытания на пожаробезопасность, по окончании которых, выдаётся заключение, регламентирующее условия применения данных систем.

Следующим документом, установившим теплотехнические требования к навесным фасадам, был СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». В 2012 году был заменен на СП 50.13330.2012 [12], где представлена методика расчёта навесных фасадов, в том числе с воздушной прослойкой.

В 2004 году центральным научно-исследовательским институтом имени Кучеренко, были разработаны рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, предоставляемых для технической оценки пригодности продукции [33], являющиеся одним из основных документов в области проектирования навесных вентилируемых систем.

В данный момент идёт работа по созданию нормативного документа, который мог бы объединить в себе все предыдущие и заполнить остающиеся на сегодня пробелы в данной области строительной продукции. В настоящее время в нашей стране не существует определенной правовой базы для применения навесных систем с воздушным зазором.

1.8 Анализ рынка навесных вентилируемых фасадов

По состоянию на 2019 год, рынок вентилируемых фасадов в России достаточно насыщен – более 70 крупных компаний, включая иностранные компании-системодержатели. На рынке продаж лидирующее место, около 30% рынка, занимают две компании - U-кон и «Краспан», остальные компании представляют от 2-7 % рынка. Оставшаяся часть приходится на мелкие фирмы, выпускающих лишь продукцию одного вида (один вид облицовки и один материал системы креплений).

На рынке Красноярского края наиболее крупными производителями являются следующие компании:

- 1 Краспан
- 2 ООО «Артрокс»
- 3 ООО КЗЛМК «МАЯК»
- 4 ООО «Алюком»

Представительство ООО «КРАСПАН» в Красноярском крае представляет ТД «Элементпром» и предлагает комплексное фасадное решение при реконструкции и новом строительстве зданий:

– комплексный дизайн-проект и рабочий проект вентилируемых фасадов зданий;

– производство навесных фасадных систем (НФС) и светопрозрачных конструкций на заводе "КРАСПАН";

– монтажные работы (круглогодичный цикл);

– ремонт и гарантийное обслуживание навесных вентилируемых фасадных систем.

На рисунке 3 представлена диаграмма рыночных долей производителей навесных вентилируемых фасадов.

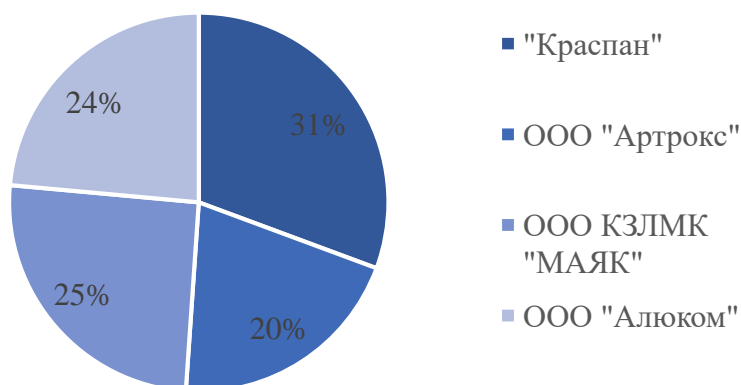


Рисунок 5 – Диаграмма рыночных долей производителей навесных вентилируемых фасадов

В таблице 1 представлены характеристики производителей навесных вентилируемых фасадов.

Таблица 1 – Характеристики производителей навесных вентилируемых фасадов

Название компании	Основной вид деятельности	Продукция	Стаж работы, год	Примечание
Краспан	производство строительных металлических конструкций и систем вентилируемых фасадов	облицовочные материалы (огнестойкие стальные, алюминиевые, фиброцементные, композитные панели); металлические каркасы	1999	выпускает широкую линейку металлокаркасов (45 подсистем) и 14 видов облицовочных материалов для фасадов зданий.
ООО «Артрокс»	изготовление, производство и продажа фасадных материалов	алюкобонд (алюминиевая композитная панель, АКП); металлокассета; фасадная кассета; фасадные панели; фасадные решетки; фасонные элементы и др	2014	ассортимент составляют изделия таких марок, как: Алюком (Alukom), Goldstar, Алкотек, Grossbond.
ООО КЗЛМК «МАЯК»	производство и поставка строительных металлоконструкций, металлопроката и крепежных изделий	металлический сайдинг; фасадная панель; стальная рейка; профлист стеновой; подсистема для вентилируемых фасадов; отделочные элементы	2002	ведущий российский поставщик на территории России и стран СНГ
ООО «Алюком»	производство строительных металлических конструкций, изделий и их частей.	композитные панели	2005	крупнейший производитель композитных материалов в России и лидер по объемам производства в России и странах СНГ

Таким образом, можно сделать вывод, что рынок фасадных систем в Красноярском крае развивается и увеличивается число компаний, предлагающих рынку товары для как строительства новых жилых и нежилых зданий, так и для их монтажа. Лидером среди производителей фасадных систем в Красноярском крае является ООО «КРАСПАН».

Цена квадратного метра фасадной системы зависит от облицовочного материала, конструктивной системы и крепежей, и трудоемкости реализации проекта. Если сравнивать облицовочные материалы от самого дешевого к дорогому, то экономичным вариантом облицовки считаются фиброцементные панели, затем металлокассеты, керамогранит и композитные панели, и натуральный камень, как самый дорогой.

На рисунке 4 представлена гистограмма применения материалов облицовки зданий в процентном соотношении.

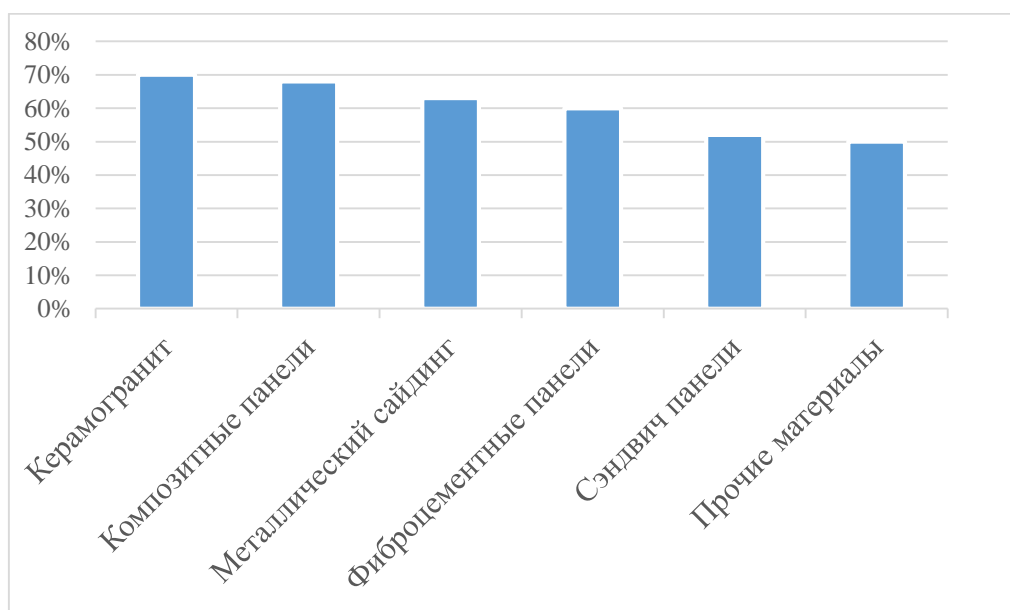


Рисунок 6 – Гистограмма применения материалов облицовки зданий в строительстве

Таким образом, можно сделать вывод, что прогноз спроса на навесные фасадные системы является положительным, так как наблюдается увеличение объема строительства. В рамках регионального проекта прогнозируется увеличение объема жилищного строительства с 1,2 млн. м² в 2019 году до 1,6 млн. м² к 2024 году [34].

1.8 Выводы по первой главе

1. Анализ жилищного фонда показал, что домостроение 19 века имеет высокую степень износа и не соответствует действующей нормативной базе.
2. Начиная с 90-х годов был проделан большой объем работ по формированию нормативно-правовой базы в области энергосбережения, в которой представлен комплекс мероприятий по эффективному и рациональному использованию энергетических ресурсов, а также методики расчета тепловой защиты зданий.
3. Выполнен анализ научных работ отечественных и зарубежных ученых, посвященных исследованиям влажностного режима ограждающих конструкций. Большая часть научных работ основана на методах перемещения водяного пара в конструкции при стационарном режиме.
4. Наибольший интерес и ценность представляет статья Корниенко С.В [24], в которой описан «метод расчет температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций зданий на основе физико-математической модели совместного нестационарного тепло-влажностного переноса».
5. Навесные вентилируемые фасады широко распространились на западе, но недостаточно опыта эксплуатации навесных вентилируемых фасадов в условиях Сибири. Устройство навесных вентилируемых фасадов производится как при новом строительстве, так и при реконструкции существующих зданий. Данная конструктивная система повышает надежность работы ограждающих конструкций зданий и их климатическую долговечность [1].
6. Таким образом, актуальность работы сводится к необходимости нестационарного расчета процессов тепло-влажностного переноса в ограждающих конструкциях с навесным вентилируемым фасадом.

ГЛАВА 2 Теория теплофизики и методика расчета

2.1 Механизмы теплопередачи

Теплообменом называют самопроизвольный не обратимый процесс переноса энергии в форме теплоты в пространстве. Теплообмен осуществляется тремя способами. В твёрдых телах основным способом передачи тепловой энергии является теплопроводность, в жидкостях и газах – конвекция, в вакууме и некоторых газах – излучение. Теплопередача почти всегда осуществляется одновременно несколькими способами.

Процесс теплообмена неразрывно связан с процессом переноса массы веществ разной концентрации из одной среды в другую в разных точках пространства.

Тепломассообмен необратим и протекает до установления термодинамического равновесия [35]

2.1.1 Теплопроводность

Теплопроводность – это «молекулярный перенос энергии (теплоты) при непосредственном контакте более нагретых элементов тела (или среды) с менее нагретыми, обусловленный тепловым движением микрочастиц (молекул, атомов, электронов) при наличии градиента температуры и происходящий без макроскопических перемещений вещества» [36].

Процесс теплопроводности сопровождается распределением температуры внутри тела как в пространстве, так и во времени.

Аналитическое исследование теплопроводности заключается в изучении изменения температуры в пространственно-временных границах, описываемые уравнением:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

где x, y, z – пространственные координаты в декартовой системе;

τ – время.

Различают стационарное и нестационарное температурные поля. Если

температура тела зависит от координат и не изменяется с течением времени, то поле называется стационарным. При температуре, зависящей от времени, поле называется нестационарным [36].

Уравнение (2) описывает математическое выражение температурного поля, которое представляет собой совокупность значений температуры в данный момент времени для всех точек изучаемого пространства, то есть стационарное температурное поле.

$$T = f(x, y, z), \quad (2)$$

При нестационарном режиме перераспределение теплоты сопровождается изменением температуры отдельных элементов тела. Уравнение (3) является записью наиболее общего вида температурного поля при нестационарном режиме.

$$\frac{dt}{d\tau} = 0, \quad (3)$$

Градиент температуры представляет собой вектор, направленный к изотермической поверхности, где происходит наибольший перепад температур на единицу длины [35]:

$$\text{grad}T = n_0 \frac{\partial T}{\partial n} = \bar{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (4)$$

где n_0 – единичный вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры;

$\frac{\partial T}{\partial n}$ – производная температуры по направлению этой нормали к изотермической поверхности;

$\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – ортогональные между собой векторы единичной длины, направленные по координатным осям.

Плотность теплового потока представляет собой величину, численно равную количеству тепла, проходящему за единицу времени через единицу площади [35], определяется по формуле:

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (5)$$

где Q – количество теплоты, Вт;

F – площадь, м².

В основу теории теплопроводности вошли работы Фурье, выполненные им в начале XIX в.

Уравнение теплопроводности твердого тела описывается по закону Фурье [35]:

$$q = -\lambda \cdot n_0 \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda \cdot grad T, \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Поскольку процесс нагревания твердого тела является сложным физическим процессом, где величины изменяются в пространстве и времени, то установление зависимости между этими величинами представляет очень трудоемкий процесс.

Общее дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности тела для одномерного потока теплоты имеет вид [36]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (7)$$

где a – коэффициент температуропроводность, м²/с.

2.1.2 Коэффициент теплопроводности материала

Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), является одной из основных тепловых характеристик материала, который отражает свойство вещества проводить тепловой поток q , Вт, через 1 м² площади. Чем больше значение λ , тем интенсивнее материал проводит тепло. Поэтому теплоизоляционными материалами принято считать материалы с коэффициентом теплопроводности менее 0,3 Вт/(м·°С) [37].

Коэффициент теплопроводности в значительной степени зависит от влажностного состояния материалов. В свою очередь на влажностное состояние конструкции оказывает влияние климатические условия района строительства и влажностный режим помещений, из этого по СП 50.13330.2012 выделяют два типа условий эксплуатации ограждающих конструкций: А и Б [12].

2.1.3 Стационарный и нестационарный режим тепломассопереноса

Передача теплоты через наружные ограждения конструкций является основным фактором, влияющим на проектирование теплового режима помещений здания.

Стационарным режимом тепломассопереноса называется процесс теплопередачи, когда распределение температур в ограждениях изменяется по координатам, но при этом остается постоянным по времени.

Для анализа этого процесса разработаны простые аналитические приемы, позволяющие определять термическое сопротивление теплопередаче, а, следовательно, и количество теплоты, передаваемой от внутреннего воздуха наружной среде однородных и сложных ограждающих конструкций, при наличии воздушных прослоек и с учетом влажпроводности и воздухопроницаемости ограждений [38].

Однако, в реальных условиях из-за изменения температурного режима наружного и внутреннего воздуха, направления и силы ветра, интенсивности солнечной радиации, режим теплопередачи через ограждающие конструкции является нестационарным [38].

Нестационарный процесс – это процесс теплопередачи с изменением температурного поля во времени, сопровождающиеся изменением энтальпии тела, то есть его нагревом и охлаждением.

Аналитический аппарат нестационарной теплопередачи более сложен и только некоторые решения задач с простыми условиями протекания процесса приведены к виду, удобному для практического использования [38]. Например, в случае небольших скоростей изменения условий теплопередачи можно заменить сложный нестационарный процесс на более простой – стационарный. Однако для расчета ограждающих конструкций данный способ неприемлем.

Закономерности нестационарного процесса теплопередачи используются при расчете периодического отопления, режима регулирования подачи теплоты в помещения, при определении времени натопа при пуске системы, достаточной

продолжительности отключения отопления в аварийных условиях, при замерзании и оттаивании влаги в материале ограждения и некоторых других случаях.

Задачи на расчет теплообменных процессов при нестационарном режиме можно разделить на две группы. Группа процессов, где переход тепла из начального теплового состояния в стационарное являются равновесным тепловым состоянием. И вторая группа, где происходящие процессы изменяются во времени по определенному закону [39].

2.1.4 Условия однозначности

Для полного математического описания конкретного процесса теплопроводности необходимо задать условия однозначности или краевые условия задачи в совокупности с дифференциальным уравнением [36].

Условия однозначности описывают параметры конкретной задачи, а именно:

- геометрические параметры системы;
- физические параметры тела (λ , c , ρ и др.);
- начальные условия, описывающие состояние системы в начальный момент времени;
- граничные условия, учитывающие взаимодействия системы с окружающей средой.

При рассмотрении нестационарных процессов необходимы начальные условия и аналитически могут быть записаны следующим образом (при $\tau = 0$): $t = t(x, y, z, 0) = f(x, y, z)$. При равномерном распределении температуры в теле начальное условие (при $\tau = 0$) упрощается: $t = t_0 = const$ [36].

2.1.5 Граничные условия для поверхности исследуемого объекта

Для решения дифференциальных задач теплопередачи могут быть использованы четыре граничных условия.

Граничное условия первого рода - распределение температуры на поверхности тела принимается как функция времени. В простейшем случае температура может быть задана как постоянная величина во всех ее точках и не меняться во времени.

Граничным условием второго рода является математическая модель, в которой распределение плотности теплового потока на границах тела является функцией времени. В частности, эта величина может быть постоянной для всех точек поверхности и не меняться во времени.

Граничное условие третьего рода, это усложненный вид граничного условия первого рода, где начальным условием является заданная температура тела, последующий теплообмен между поверхностью и окружающей средой протекает по закону Ньютона — Рихмана:

$$q = \alpha(T_{\text{int.}} - T_{\text{ext}}), \quad (8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$T_{\text{int.}}$ – температура внутреннего воздуха, °С;

T_{ext} – температура наружного воздуха, °С.

Если теплообмен происходит при $\frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow \infty$, то в таком случае граничное условие третьего рода становится граничным условием первого рода в простейшем его виде. Если $\frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow 0$, то граничное условие третьего рода становится частным случаем граничного условия второго рода, то есть происходит теплоизоляция, когда через поверхность тела не проходит поток теплоты [36].

В граничном условии четвёртого рода теплообмен происходит по закону теплопроводности Фурье или при одинаковой температуре соприкасающихся поверхностей, описывающий совершенный тепловой контакт.

В случае решения задачи теплопроводности нестационарного температурного поля необходимо применять граничные условия четвертого рода [36].

2.1.6 Температурные волны на наружных поверхностях ограждающих конструкций

Наружные ограждающие конструкции зданий в течении суток испытывают температурные воздействия, которые описываются законом гармонического колебания, при этом, можно считать, что температуры внутренней поверхности

ограждения остаются неизменными, а наружные изменяются по принципу день-ночь.

В дневное время температура поверхности поднимается, а в ночное опускается, а тепловой поток изменяется обратно пропорционально температуре. Такого рода гармонические колебания описываются косинусоидальными функциями.

Рассматривая изменение температуры на внешней поверхности стеновой конструкции ($x=0$), по направлениям как во внутрь здания, так и из него, можно получить температурные волны, угасающие и идущие во внутрь стеновой конструкции. При условии, что процесс колебания будет происходить в течение длительного отрезка времени, начальными условиями можно пренебречь, так как после большого количества циклов, начальные условия не будут оказывать влияния на распределение температур в стеновой конструкции.

Распространение температурных волн в стеновой конструкции можно описать следующими дифференциальными уравнением [40]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (9)$$

Тогда, косинусоидальная функция описывающая изменение температуры в стеновой конструкции будет иметь вид:

$$g_{0\tau} = g_n^{\max} \cdot \cos(\omega, \tau), \quad (10)$$

где ω – частота колебаний.

Эти дифференциальные уравнения справедливы при допущениях, когда конструкция наружного ограждения однородна и изотропна. Данное условие невыполнимо, для ограждающих конструкций, применяемых в наших климатических условиях. Так как для достижения требуемой величины сопротивления теплопередачи ограждающей конструкцией применяются различные виды утеплителя, а также кирпичная стена не представляет собой однородную конструкцию в связи с применением цементно-песчаного раствора

для укладки. Более того, физические свойства должны оставаться постоянными при любых условиях.

Так как не представляется возможным в полном объеме описать тепловую нагрузку, приложенную к наружным ограждающим конструкциям с помощью формул или функций, то, соответственно, единственным возможным способом проанализировать работу ограждающих конструкции является моделирование конструкции в расчётном комплексе и приложение реального хода температур.

2.1.7 Уравнение массопереноса

Процессами массопереноса (массообмена) называют такие, в которых основную роль играет перенос вещества из одной фазы в другую и делится на массопередачу и массотдачу [35].

Массопередача — это процесс перехода вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия. При этом граница соприкосновения т.е. поверхность контакта фаз может быть:

- подвижной (в системах газ — жидкость, пар — жидкость, жидкость — жидкость);
- неподвижной (в системах газ — твердое тело, пар — твердое тело, жидкость — твердое тело).

Процесс массообмена описывается молекулярной диффузией, подчиняющейся первому и второму законам Фика.

Дифференциальное уравнение массообмена имеет вид:

$$\frac{dC}{d\tau} = D \frac{d^2C}{dx^2}, \quad (11)$$

где D — коэффициент молекулярной диффузии;

$\frac{dC}{d\tau}$ — градиент концентраций вещества.

2.2 Оценка влажностного режима ограждения. Методы расчета

2.2.1 Методы расчета влажностного режима наружных ограждающих конструкций

К основному требованию тепловой защиты относится создание необходимых влагозащитных мер элементов оболочки здания, которые обеспечат надежность и долговечность ограждающих конструкций.

Существующие методы оценки влажностного состояния наружных ограждающих конструкций позволяют определять физику процесса и не требуют трудоемких вычислительных процессов. Однако, область данных методов расчета ограничена однородными и многослойными ограждениями при стационарных условиях тепловлагоденоса [41].

Впервые, предпосылки к развитию методов оценки влажностного состояния наружных ограждений зданий появились около 70 лет назад, это связано с накоплением опыта применения многослойных конструкций с теплоизоляционными слоями.

Самый первый метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций был предложен К.Ф. Фокиным [41].

Метод основан на модели диффузии водяного пара, который дает возможность определить зону возможной конденсации влаги в ограждающей конструкции, рассчитать влагонакопление при стационарных граничных условиях, рассчитать годовой баланс влаги и установить, будет ли ограждение с течением времени увлажняться или высыхать [41].

В настоящее время модификации этого метода применяются как в отечественной, так и зарубежной практике.

Так, в ФРГ Н. Glaser'ом в конце 50-х годов был разработан метод аналогичный К. Ф. Фокиным, который послужил основой для раздела «Защита от конденсации влаги в строительных конструкциях» немецких норм DIN 4108 и включен в нормы некоторых Западноевропейских стран [42].

Предложенный метод К. Ф. Фокина получил развитие в дальнейших исследованиях, например, в работах Э.Х. Одельского, А.М. Шкловера, В.М. Ильинского, Ф.В. Ушкова, А.У. Франчука.

Расчет согласно актуализированной редакции СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» п.8 [12] позволяет выполнить оценку влажностного режима ограждающих конструкций как за годовой период эксплуатации, так и за период влагонакопления. Область применимости указанных методов ограничена только сорбционной влажностью материалов.

По теории влагопроводности оценку влажностного режима ограждающих конструкций можно произвести при сверхсорбционном увлажнении материалов. Сложность практического применения этой теории заключается в задании граничных условий на границах соприкосновения материалов конструкций [41].

Особый интерес представляет теория о потенциале влажности [43]. Понятие «потенциал влажности» было введено В.Н. Богословским в начале 1950-х годов [18]. Использование потенциала влажности позволяет рассчитать «влажностный режим многослойных ограждающих конструкций при сверхсорбционной влажности материалов в широком диапазоне влажности и температуры при сложных граничных условиях [44]». Развитие методов инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности дано в монографии [18].

Идея потенциала влажности, оказала влияние на дальнейшее развитие исследований влагопереноса в материалах и конструкциях и была реализована в работах А.Г. Перехоженцева, и др. для расчета нестационарного влажностного режима конструкций [42].

Одним из перспективных направлений в расчете влажностного режима ограждений зданий с учетом многолетнего цикла эксплуатации стали методы с применением программных комплексов. Основное преимущество таких методов заключается в возможности учитывать такие параметры, как механизмы

влажнопереноса, сорбционное и десорбционное увлажнение, и нестационарность граничных условий [42].

2.2.2 Расчет ограждающих конструкций на конденсацию влаги

Расчет ограждающих конструкций на конденсацию влаги производится по механизму паропроницаемости. Условие конденсации влаги имеет вид: $e > E$, где e — парциальное давление водяного пара в порах материалов; E — парциальное давление насыщенного водяного пара. Плоскость конденсации влаги представляет собой сечение ограждающей конструкции в зоне конденсации, в котором отклонение e от E достигает максимального значения [41].

Расчет ограждающих конструкций на конденсацию влаги производится по предельному состоянию для наиболее холодного месяца года. За начало расчета принимается месяц перехода через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [41].

Для определения базовых значений требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций R_0^{mp} , $\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, используется формула:

$$R_0^{mp} = a \cdot \text{ГСОП} + b, \quad (12)$$

где a, b — коэффициенты, значения которых следует принимать по данным таблицы для соответствующих групп зданий, принимается по таблице 3 [12];

ГСОП — градусо-сутки отопительного периода, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}/\text{год}$.

Для расчета условного сопротивления теплопроводности материалов наружных ограждающих конструкций применяется формула:

$$R_0^{ycl} = \frac{1}{a_6} + \sum R_i + \frac{1}{a_n}, \quad (13)$$

где R_i — сопротивление теплопередаче однослойной ограждающей конструкции, $\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, определяется по формуле 15.

a_6 — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$, принимается по таблице 4 [12].

a_n — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$, принимается по таблице 4 [12].

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (14)$$

где δ_i – толщина рассматриваемого слоя наружной ограждающей конструкции, м;

λ_i – тоже, что и в формуле 12.

Определяют профиль температуры $t(x)$ по сечению конструкции [12].

$$t_x = t_g - \frac{(t_g - t_n)}{R_0} \cdot R_x, \quad (15)$$

где t_g – температура внутреннего воздуха, °С;

t_n – температура наружного воздуха, °С;

R_x – сопротивление теплопередаче x слоя конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$;

R_0 – сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.

По профилю температуры определяют профиль парциального давления насыщенного водяного пара $E(x)$.

$$E = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(\frac{-5330}{273+t}\right), \quad (16)$$

Рассчитывают профиль парциального давления водяного пара $e(x)$ по формуле:

$$e_x = e_g - \frac{(e_g - e_n)}{R_n} \cdot \sum R, \quad (17)$$

где e_g – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па;

e_n – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па;

$\sum R$ – сумма сопротивления паропрооницанию частей ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$;

R_n – сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$.

При построении профилей парциального давления насыщенного водяного пара и парциального давления водяного пара отсчет производится от внутренней поверхности конструкции.

Затем определяют точки x , в которых выполняются условие конденсации, которая и является зоной конденсации влаги в ограждающей конструкции.

2.3 Моделирование и оптимизация процессов переноса

Исследование процессов в реальных условиях является, как правило, сложным, длительным и дорогостоящим, в связи с этим большое распространение получило моделирование.

Для моделирования характерны два метода – физическое моделирование или метод подобия, и математическое моделирование.

В рассматриваемой работе интерес представляет математическое моделирование, то есть исследование влияния определенных параметров на идеальной модели путем решения систем дифференциальных уравнений с заданными граничными условиями.

Так как, экспериментальное определение параметров ограждающих конструкций, таких как распределение теплового поля и определение зон влагонакопления за временной цикл является практически невозможным процессом, то появляется необходимость в применении математического моделирования в программных комплексах, например, COMSOL Multiphysics.

2.3.1 Методика проведения теоретических расчётов строительных конструкций с использованием программы «COMSOL Multiphysics»

COMSOL Multiphysics представляет собой программное обеспечение с мощной «интерактивной средой, позволяющее производить расчеты различных инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях методом конечных элементов».

Программа позволяет использовать одно дифференциальное уравнение для расчета связанных между собой физических явлений, благодаря содержанию более 30 дополнительных расчетных модулей. Программа основана на системе дифференциальных уравнений в частных производных [45].

«Существует три математических способа задания таких систем:

- *Коэффициентная форма*, предназначенная для линейных и близких к линейному виду моделей;
- *Генеральная форма* – для нелинейных моделей;

• *Слабая форма (Weak form)*, для моделей с PDE на границах, ребрах или для моделей, использующих условия со смешанными и производными по времени. Применяя эти способы, можно использовать различные типы анализа: стационарный, линейный и нелинейный, а также модальный анализ и анализ собственных частот» [45].

С помощью программы COMSOL Mutipysics было произведено исследование влияния навесного вентилируемого фасада на температурно-влажностный режим функционирования наружных ограждающих конструкций. Для анализа теплопроводности и накопления влаги в стеновой конструкции были выполнены следующие действия:

1. Определен тип создаваемой модели;
2. Разработана геометрия модели;
3. Указаны граничные условия;
4. Заданы теплофизические свойства и начальные условия;
5. Заданы параметры сетки элементов и ее построение;
6. Настроены параметры расчета и запущен расчет;
7. Настроен режим отображения результатов расчета;
8. Проведены анализы полученных результатов.

2.4 Выводы по второй главе

1. Описанные методы расчета не позволяют объективно рассчитать температурно-влажностные процессы с учетом постоянно изменяющихся климатических условий.

2. Наилучшим способом проанализировать работу конструкций в реальных условиях является выполнение расчета исследуемой конструкции в программном комплексе с приложением реального хода температур.

3. COMSOL Mutiphysics - один из программных комплексов, позволяющих производить моделирование процессов теплопередачи, как в статическом, так и динамическом режиме, и рассчитывать температурные поля, градиенты температур; плотности тепловых потоков, накопление влаги.

3 Анализ результатов эксперимента

3.1.1 Физико-математическая модель.

В главе 1 была обозначена проблема прогнозирования температурно-влажностного режима ограждающих конструкции.

Решение обозначенной проблемы сводится к системе уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial x} \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} \cdot \mu \frac{\partial e}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \mu \frac{\partial e}{\partial y} \right) + (\vec{u} \nabla e) = \frac{\partial T}{\partial \tau}, \\ E = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(\frac{-5330}{T}\right) \\ \varphi = \frac{e}{E} 100\% \end{cases}, \quad (18)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);

T – температура, К;

μ – коэффициент паропроницаемости, кг/(с·м·Па);

E – давление насыщенного водяного пара, Па;

φ – относительная влажность, %;

e – парциальное давление водяного пара, Па;

u – вектор скорости, м/с.

Для полного описания рассматриваемой задачи в совокупности с дифференциальным уравнением были заданы условия однозначности.

3.1.2 Объект исследования и условия однозначности

Объектом исследования является железобетонная трёхслойная стеновая панель с утеплителем из минеральной ваты толщиной 350 мм. Расчет выполнен для двух вариантов конструктивного исполнения ограждения:

- без вентилируемой воздушной прослойкой (конструкция 1);
- с вентилируемой воздушной прослойкой (конструкция 2).

Указанные варианты конструктивных решений наружных стен представлен на рисунки 7.

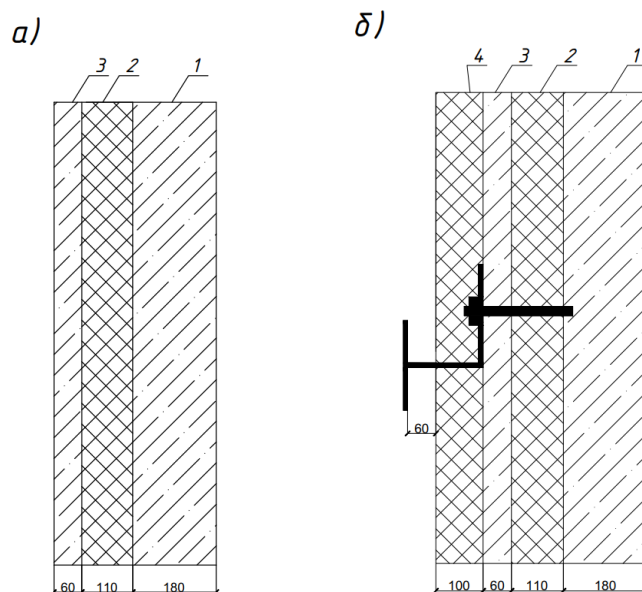


Рисунок 7 – Конструкция наружной стены:

1 – керамзитобетон; 2 - минеральная вата; 3 - железобетон; 4 – дополнительный теплоизоляционный слой (минеральная вата).

3.1.3 Расчетные теплотехнические характеристики материалов

Для расчетов был выбран г. Красноярск. Условия эксплуатации ограждающих конструкций определяются влажностным режимом помещения и зоной влажности, согласно СП 131.13330.2018 [46] Красноярск находится во влажной зоне. Условия эксплуатации ограждающих конструкций — А, влажностный режим помещений нормальный.

В соответствии с условиями эксплуатации ограждающих конструкций были определены теплотехнические характеристики материалов (коэффициент теплопроводности, паропроницаемость), принимающиеся по прил. Т [12].

Расчетные теплотехнические характеристики материалов ограждающей конструкции приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные теплотехнические характеристики ограждающей конструкции

№	Материал	Толщина слоя, δ , мм	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)	Паропроницаемость μ , мг/(м ч Па)
1	Керамзитобетон на кварцевом песке (несущий слой)	180	1000	0,41	0,075
2	Плиты из минеральной ваты (теплоизоляционный слой)	110	40	0,043	0,031
3	Железобетон (защитный слой)	60	2500	1,92	0,03
4	Плита из минеральной ваты	100	75	0,043	0.031
5	Анкер	Ø8x100	7850	58	-
6	Воздушная прослойка	60	-	-	-

3.1.4 Параметры наружного климата

Значения температуры наружного воздуха были приняты с октября по май по архивным данным сайта погоды [47] с метеостанции Роев Ручей.

На рисунке 8 представлена кривая распределения архивных данных температур наружного воздуха.

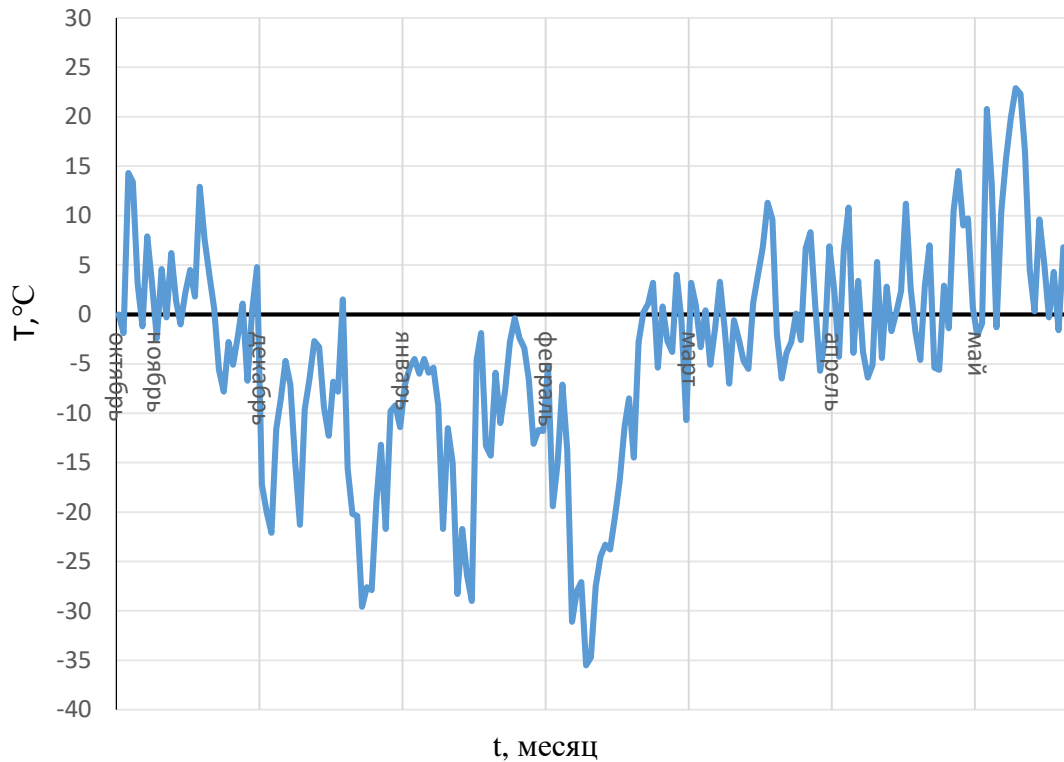


Рисунок 8 – График распределения температур наружного воздуха с октября по май

Так же для сравнительного анализа были приняты значения температуры наружного воздуха и парциальное давление водяного пара для г. Красноярск по СП 131.13330.2018 «Строительная климатология» [46], представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры температуры наружного воздуха и парциальное давление водяного пара

Месяц	Параметры наружного климата	
	$t_{\text{ext}}, ^\circ\text{C}$	$e, \text{гПа}$
Ноябрь	-7,5	2,7
Декабрь	-13,7	1,6
Январь	-16,0	1,4
Февраль	-14,0	1,5
Март	-6,3	2,6

На рисунке 9 представлен график распределения значений температуры наружного воздуха, принятых по СП 131.13330.2018 [46].

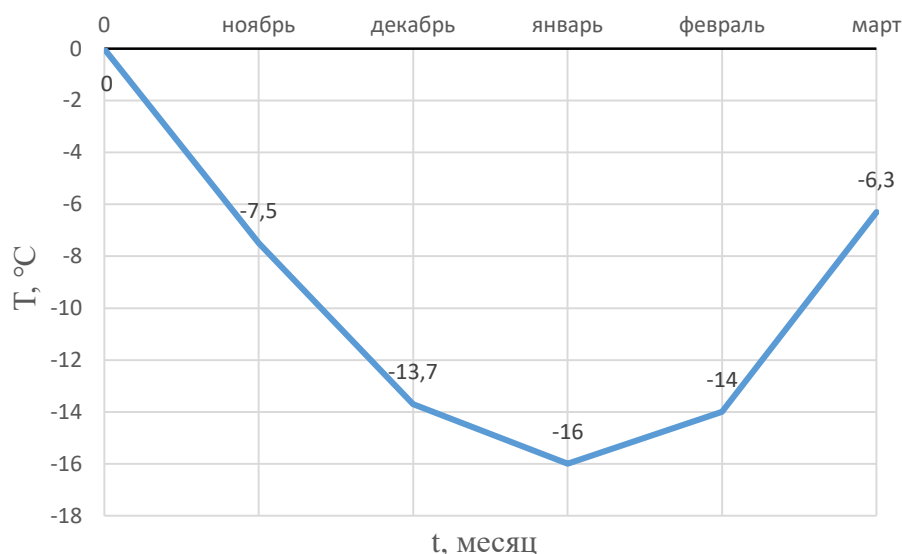


Рисунок 9 – Температура наружного воздуха с ноября по март

3.1.5 Граничные условия

Для статического расчёта, т.е. при постоянной температуре наружного воздуха (граничное условие первого рода) наружных ограждающих конструкций были приняты следующие исходные данные:

- Расчетная температура наружного воздуха $t_{ext} = 0$ °C;
- Расчетная температура внутреннего воздуха $t_{int} = 21$ °C, принимается по [48];
- Относительная влажность внутреннего воздуха $\phi_{int} = 50$ %, принимается по [48];
- Коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции $\alpha_{int} = 8,7$ Вт/(м²·К), принимаемое по табл. 4 [12];
- Коэффициенты теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции $\alpha_{ext} = 23$ Вт/(м²·К), принимаемое по табл. 6 [12];
- Коэффициенты теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции с навесным вентилируемым фасадом $\alpha_{ext} = 10,8$ Вт/(м²·К), принимаемое по табл. 6 [12];

3.2 Результаты статических расчётов

3.2.1 Результаты расчета температурных полей

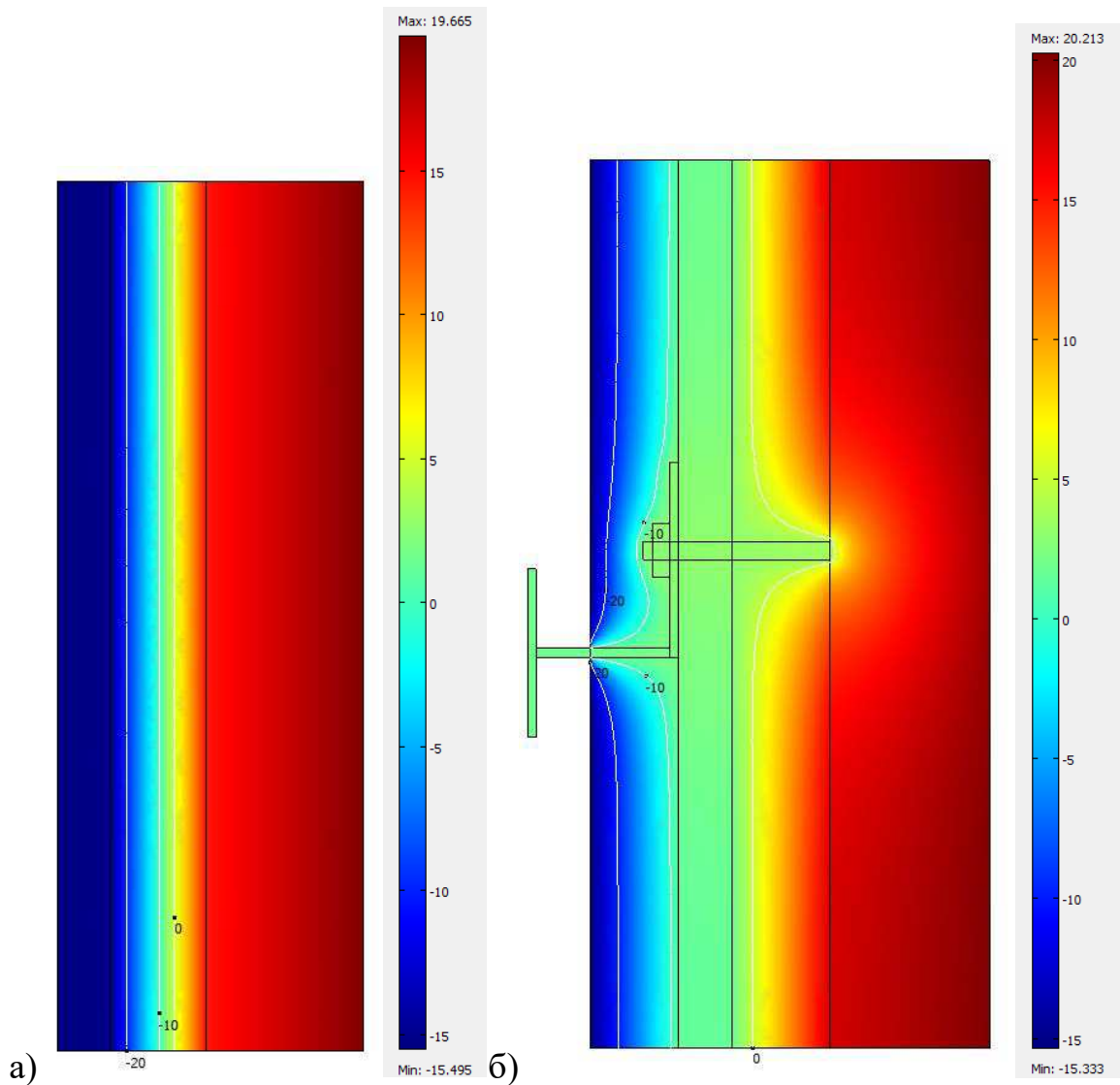


Рисунок 10 – Распределение температурных полей двух конструкций при температуре наружного воздуха самого холодного месяца ($-16,0\text{ }^{\circ}\text{C}$): а) Конструкция 1, б) конструкция 2

Для оценки температурного режима были получены значения температур на внутренних поверхностях стен, представленные на рисунке 11.

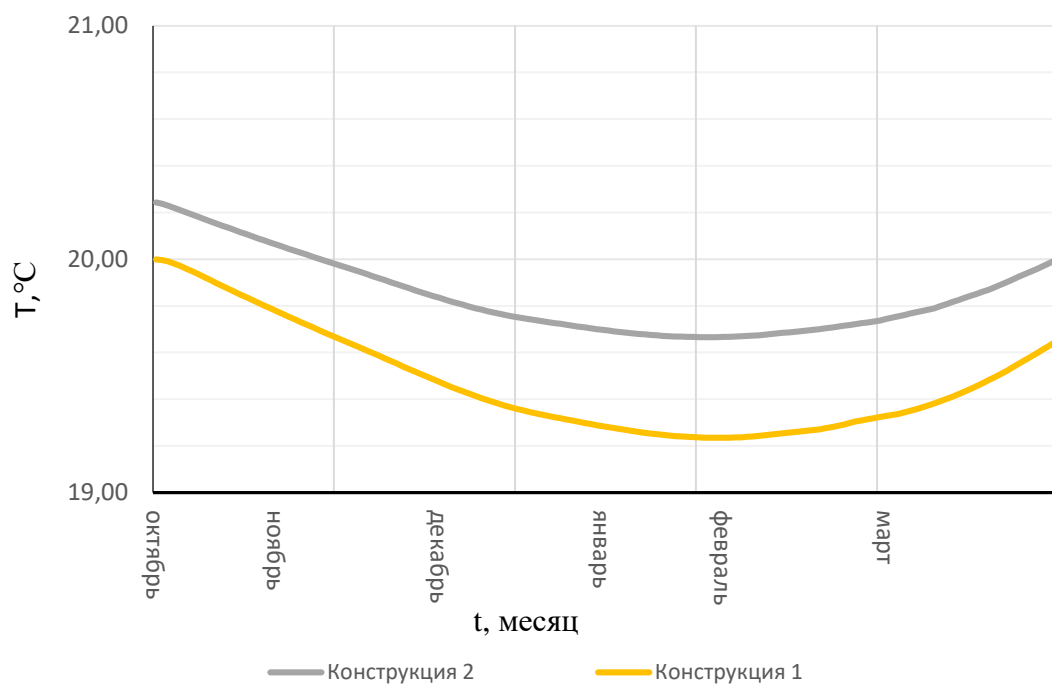


Рисунок 11– График распределения температур на внутренней поверхности стены конструкции 1 и конструкции 2 при стационарном режиме

Согласно ГОСТ 30494-2011. «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [48] оптимальная температура жилого помещения составляет – – 21-23°C, допустимая – 20 – 24 °C.

При обеспечении показателей микроклимата в различных точках обслуживаемой зоны допускается перепад температуры воздуха не более 2°C для оптимальных показателей и 3°C - для допустимых.

При стационарном режиме у конструкции 1 точка экстремума ниже и равна 19, 2 °C. Однако, у обеих конструкций значения распределяются в интервале 19-21°C, что соответствует теплотехническим нормам.

На рисунке 12 представлен график изменения температур в середине трёхслойной железобетонной панели на поверхности соприкосновения материала с анкером.

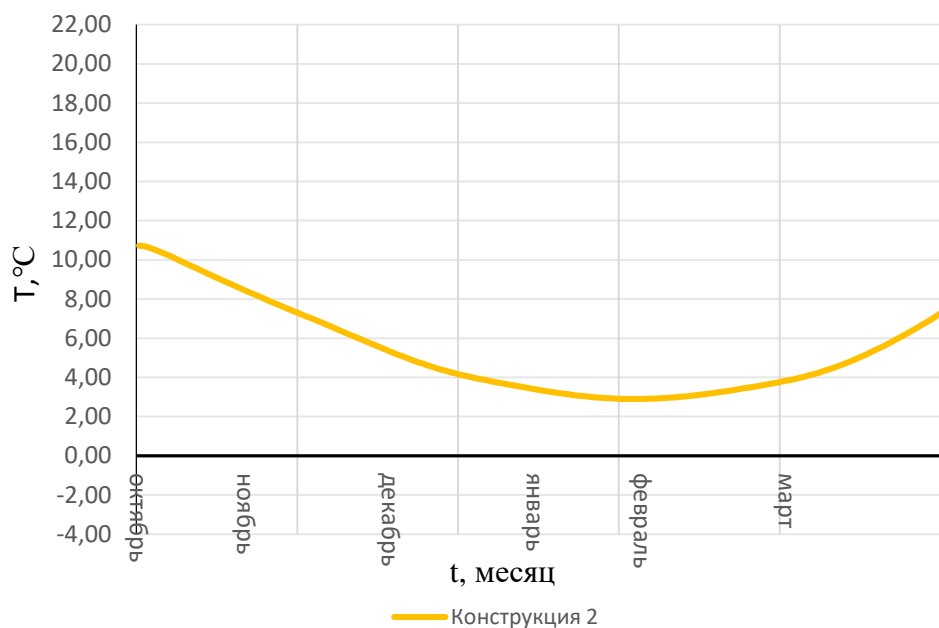


Рисунок 12 – Изменение температуры в середине наружного слоя трёхслойной стеновой панели, в зоне контакта с материалом анкера крепления при стационарном режиме

Как видно из рисунка 100б) и графика на рисунке 12, при стационарном расчете значения температура вблизи анкера не опускаются ниже 3°C в самый холодный месяц, что не может существенно влиять на снижение климатической долговечности материала в этой области в связи с отсутствием перехода температуры через точку фазового перехода 0°C.

3.2.2 Результаты расчета влажностного режима

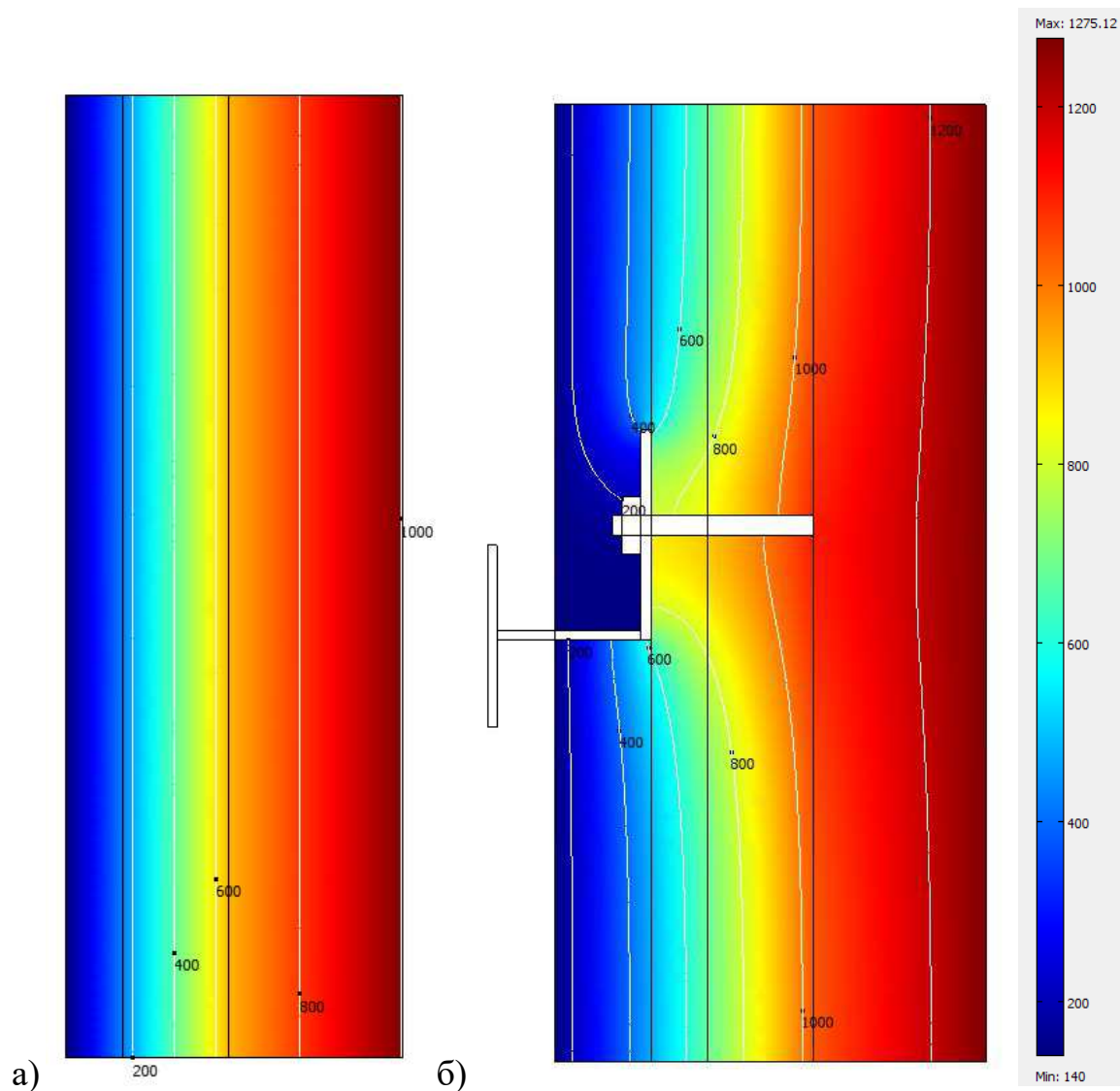


Рисунок 13 – Распределение парциального давления водяного пара двух конструкций при температуре наружного воздуха $-16,0\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) Конструкция 1, б) конструкция 2

Представленные на рисунке 13 результаты расчётов показывают, что конструкция навесного вентилируемого фасада влияет на распределение парциального давления водяного пара. смещается, Таким образом для конструкции 2 парциальное давление водяного пара в слое утеплителя составляет 800-1000 Па, то для конструкции 1 распределяется от 200 до 600 Па.

На рисунке 14 представлено распределение концентрация влаги по сечению, $\text{кг}/\text{м}^3$.

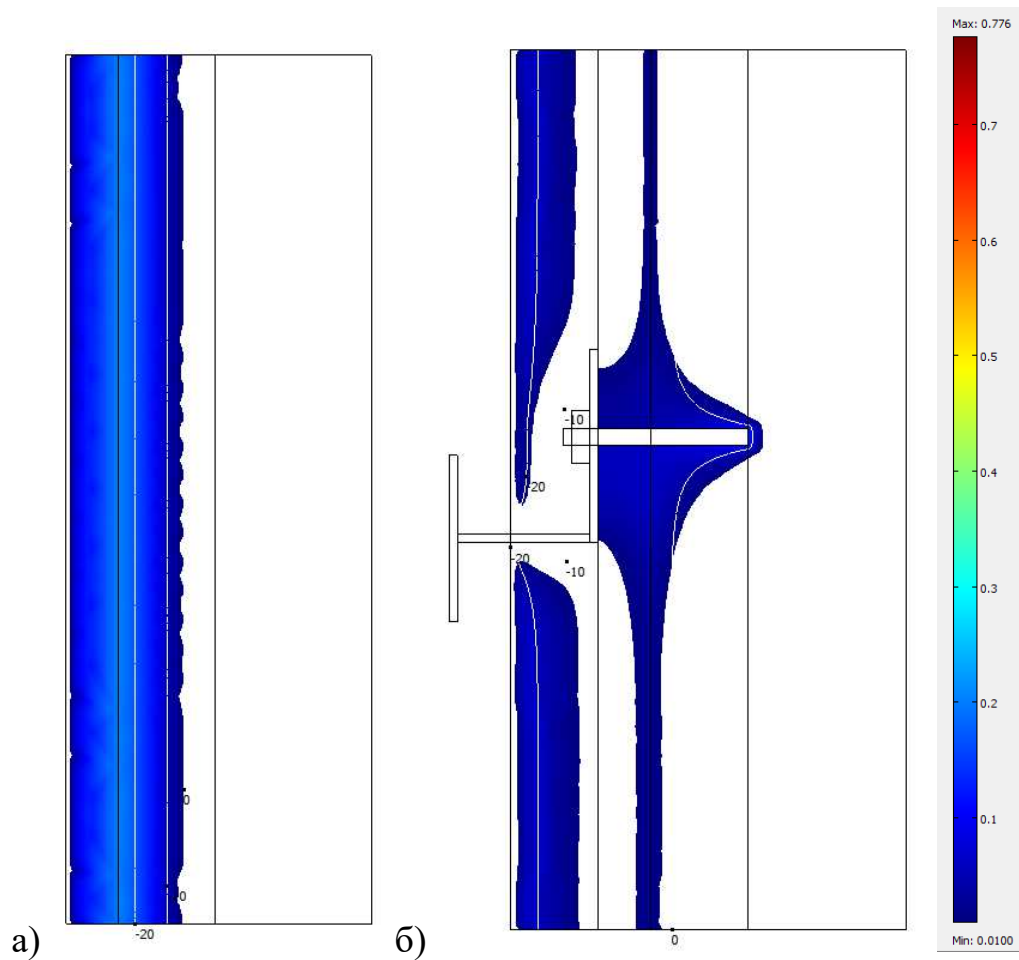


Рисунок 14 – Распределение влаги при стационарном режиме: а) конструкция 1, б) конструкция 2

По результатам расчетов были получены кривые набора влаги в конструкциях, представленные на рисунке 15.

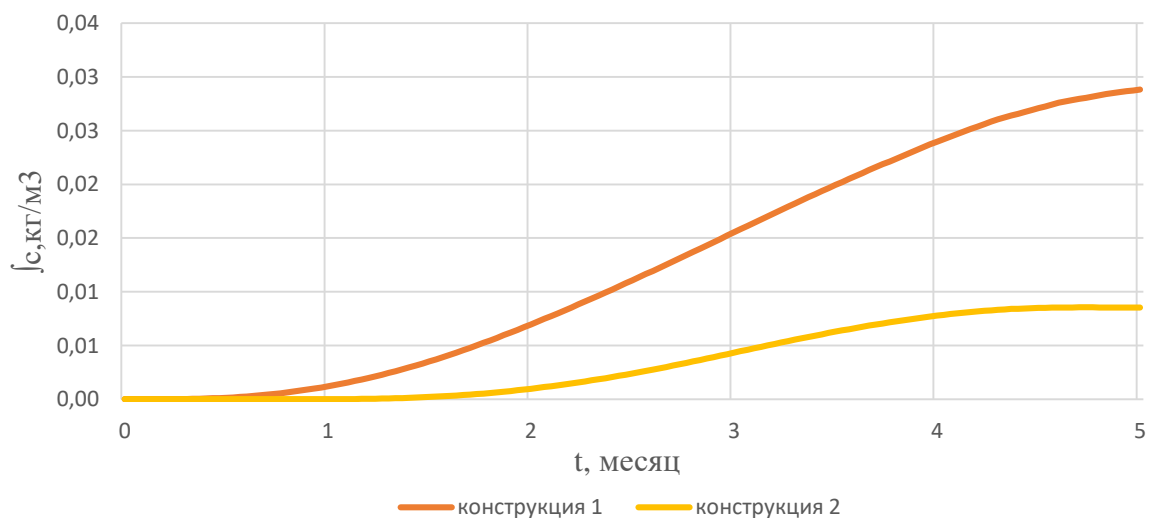


Рисунок 15 – График набора влаги в конструкциях в зависимости от времени

По рисунку 15 видно, что в конструкции 1 набор влаги происходит быстрее и количество накапливаемой влаги больше в 3,5 раза по сравнению с конструкцией 2. Соответственно, применение навесного вентилирующего фасада приводит к снижению образованию влаги в конструкции.

По полученным результатам было рассчитано количество выпавшего конденсата, как в толще стены, так и в утеплителе конструкции при стационарном режиме.

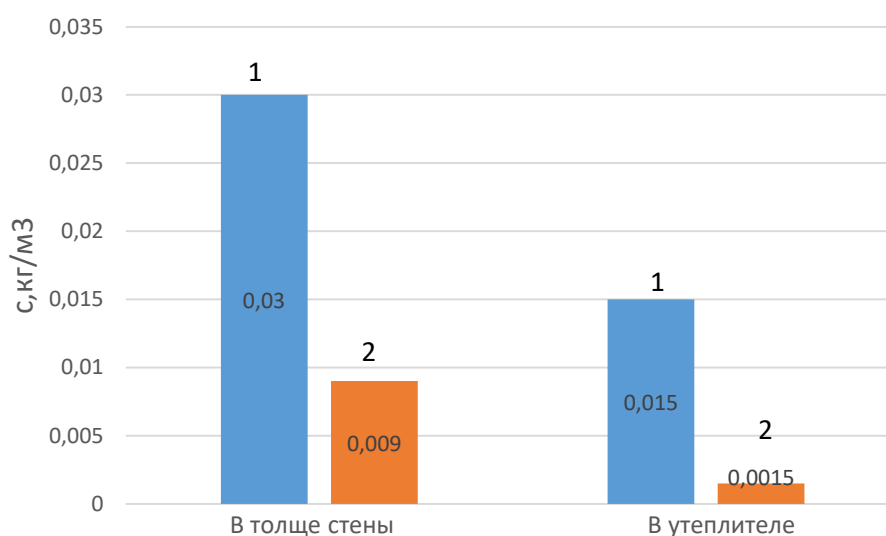


Рисунок 16 – Количество выпавшего конденсата по всей толще стены и в утеплителе при стационарном режиме, кг/м³: 1 - конструкция 1, 2 - конструкция 2

По итогам исследования влагонакопления можно сделать вывод, что устройство НВФ способствует улучшению температурно-влажностного режима стеновой конструкции.

3.2.3 Определение зоны конденсации влаги

На рисунке 17 представлены профили парциального давления насыщенного водяного пара и парциального давления водяного пара двух конструкций для самых холодных суток (-16,0 °С).

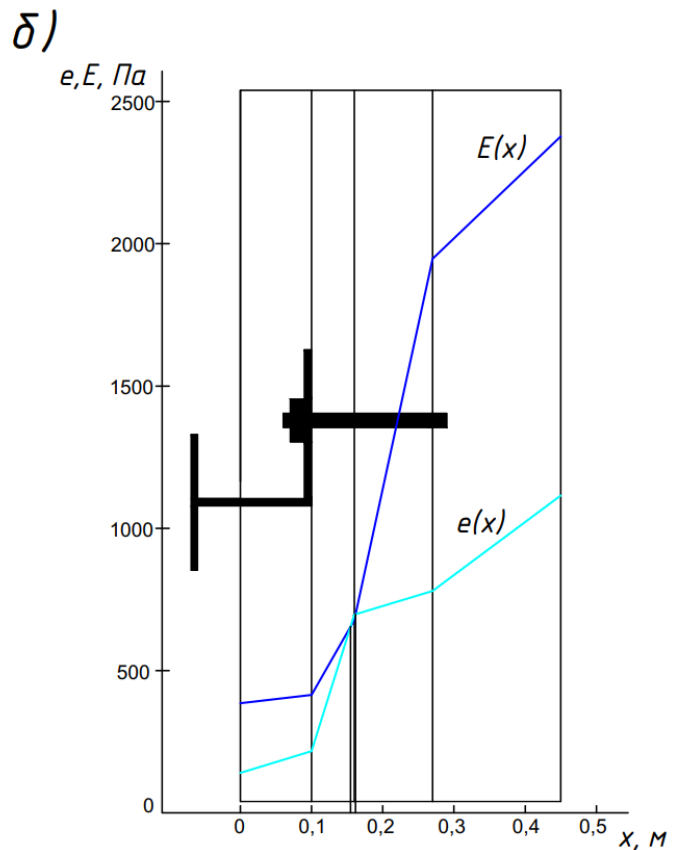
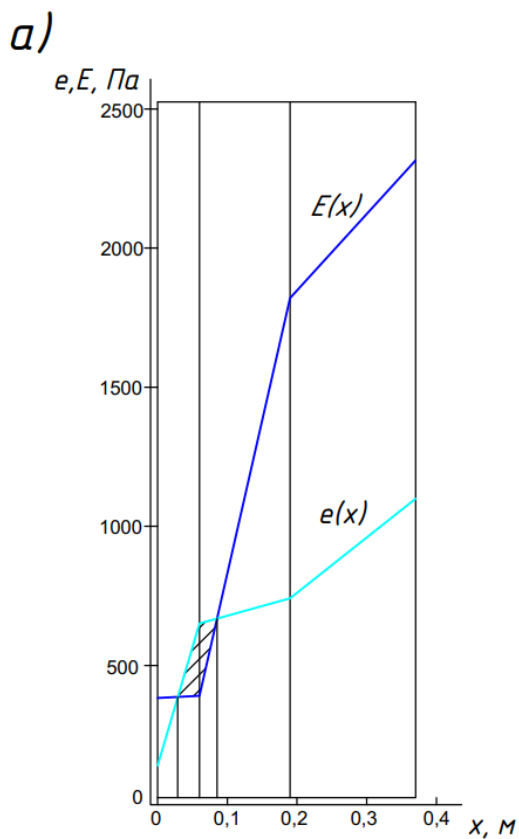


Рисунок 17 – Профили давления насыщенного водяного пара и парциального давления водяного пара: а) конструкция 1, б) конструкция 2

В конструкции 1 плоскость конденсации влаги расположена на переходе от наружной стены к теплоизоляционному слою. Зона конденсации влаги находится на участке $0,03 \geq x \geq 0,085$ м. В координате $x=0,06$ м отклонение e от E равно 260 Па. В конструкции 2 плоскость конденсации незначительна, и располагается на участке $0,155 \geq x \geq 0,162$ м, отклонение e от E в координате $x=0,16$ м равно 19 Па.

3.3 Результаты нестационарного расчета

Приведённые выше расчёты являются статическими, и справедливы для таких условиях, когда температура воздуха не меняется или меняется не значительно. В реальных условиях эксплуатации не возможно установление стационарной температуры. Соответственно, чтобы оценить реальную работу конструкции и спрогнозировать ее долговечность, а так же долговечность её элементов, к исследуемой наружной ограждающей конструкции была приложена температура наружного воздуха, регистрируемая в г. Красноярске в течение 8 месяцев с шагом в 24 часа.

3.3.1 Результаты расчета температурных полей

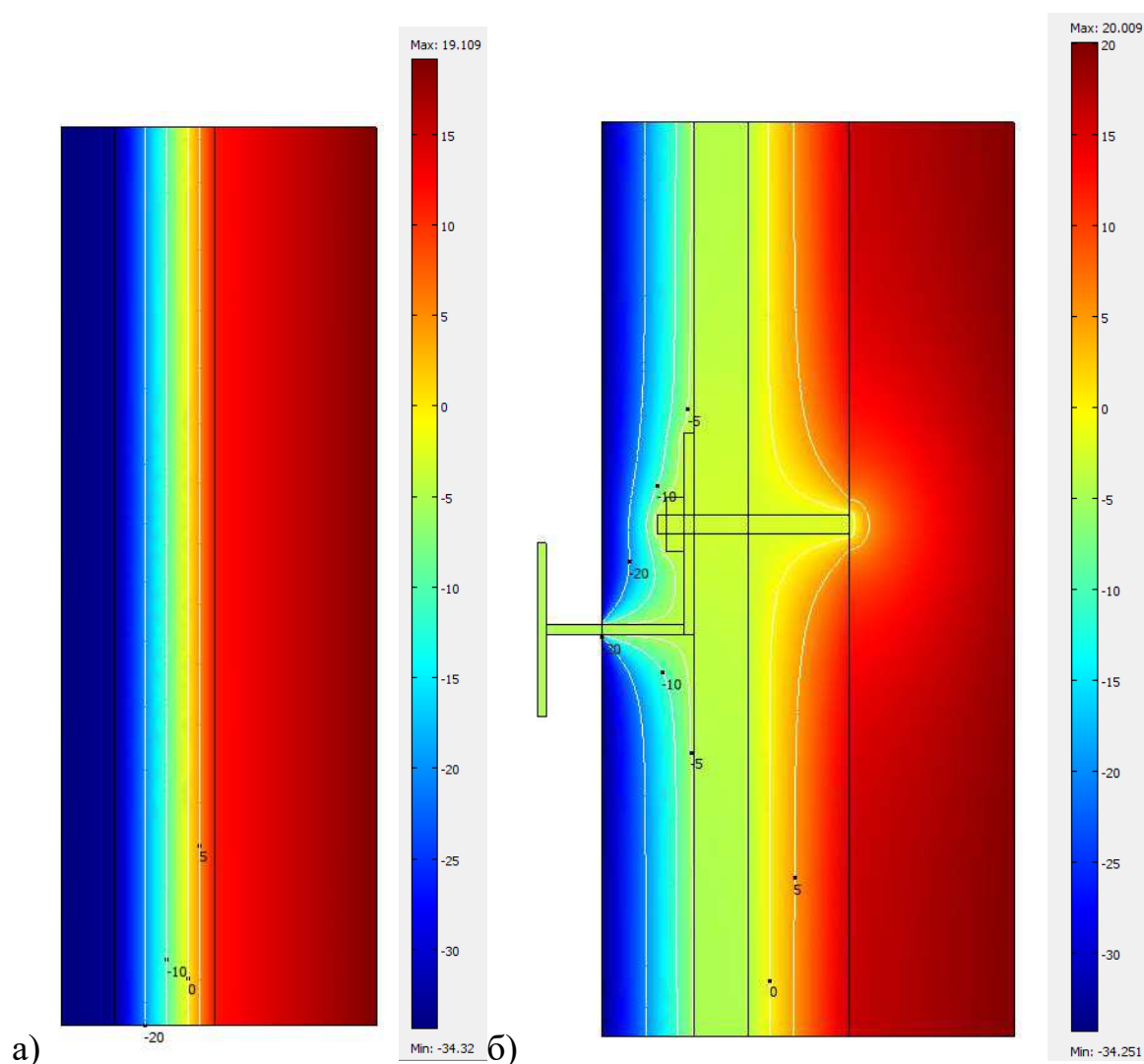


Рисунок 18 – Распределение температурных полей двух конструкций при температуре наружного воздуха самых холодных суток ($-35,5\text{ }^{\circ}\text{C}$): а) Конструкция 1, б) конструкция 2

Для оценки температурного режима были получены значения температур на внутренних поверхностях стен в зависимости от времени, представленные на рисунке 19.

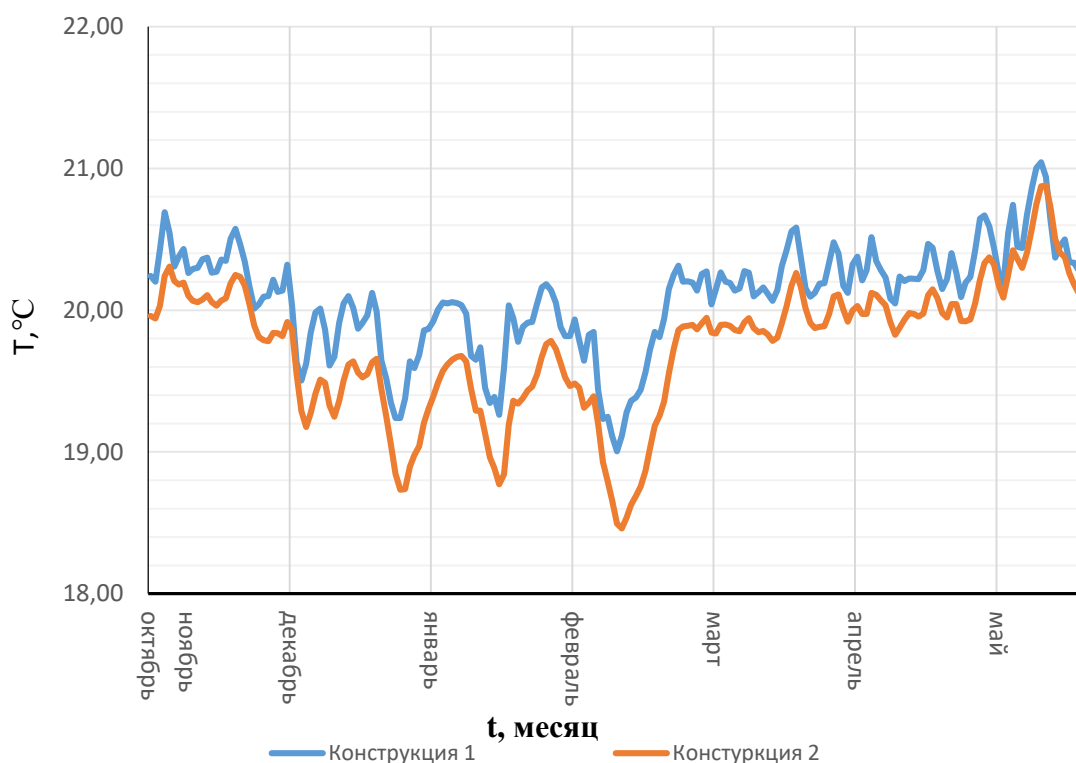


Рисунок 19 – График распределения температур на внутренней поверхности стены конструкции 1 и конструкции 2 при нестационарном режиме

По результатам у конструкции 1 точки экстремума ниже и значения температур распределяются от $18,5$ до $20,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, что не соответствует требованиям ГОСТ 30494-2011. «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [48]. У конструкции 2 значения распределяются в интервале $19-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как полученные отклонения сопоставимы с требованиями, то конструкция проходит по теплотехническим показателям.

График изменения температур в середине трёхслойной железобетонной панели на поверхности соприкосновения материала с анкером в зависимости от времени, представлен на рисунке 20.

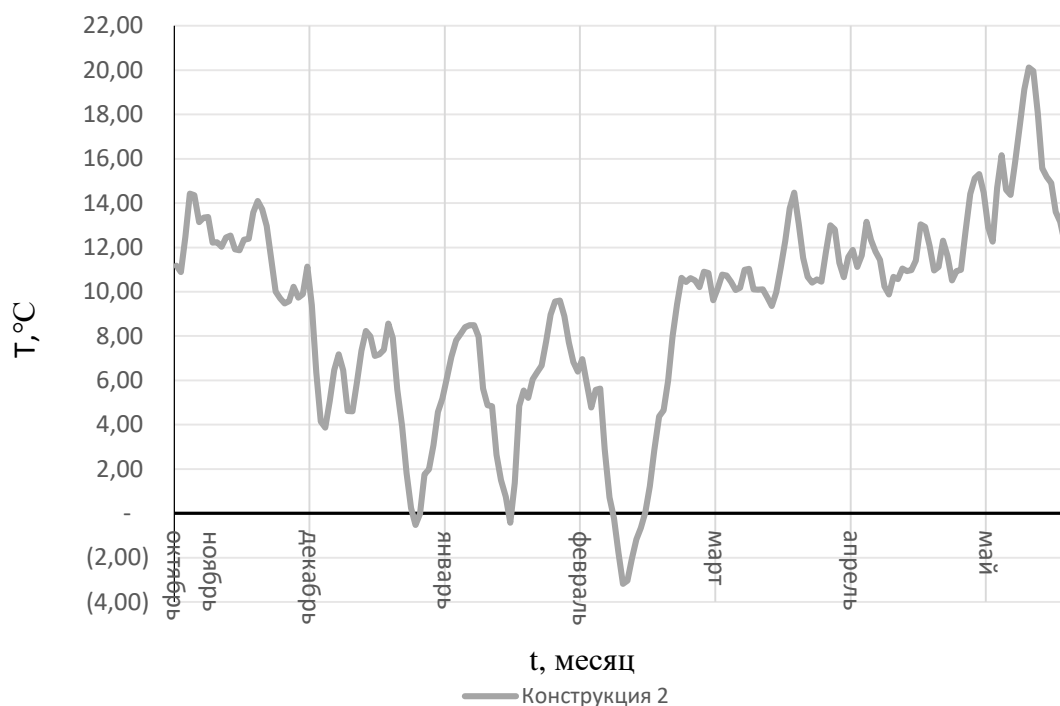


Рисунок 20 – Изменение температуры в середине наружного слоя трёхслойной стеновой панели, в зоне контакта с материалом анкера крепления при нестационарном режиме

Внутренний утеплитель – минеральная вата препятствует прохождению теплового потока, что создаёт условия для образования зоны пониженных температур вблизи анкера крепления навесного, при температуре наружного воздуха самых холодных суток $-35,5^{\circ}\text{C}$, температура материала вблизи анкера не опускается ниже -3°C . Обращает на себя внимание значительная разница между экстремальными температурами в зимний период эксплуатации, а именно в самый холодный месяц – февраль.

3.3.2 Результаты расчет влажностного режима

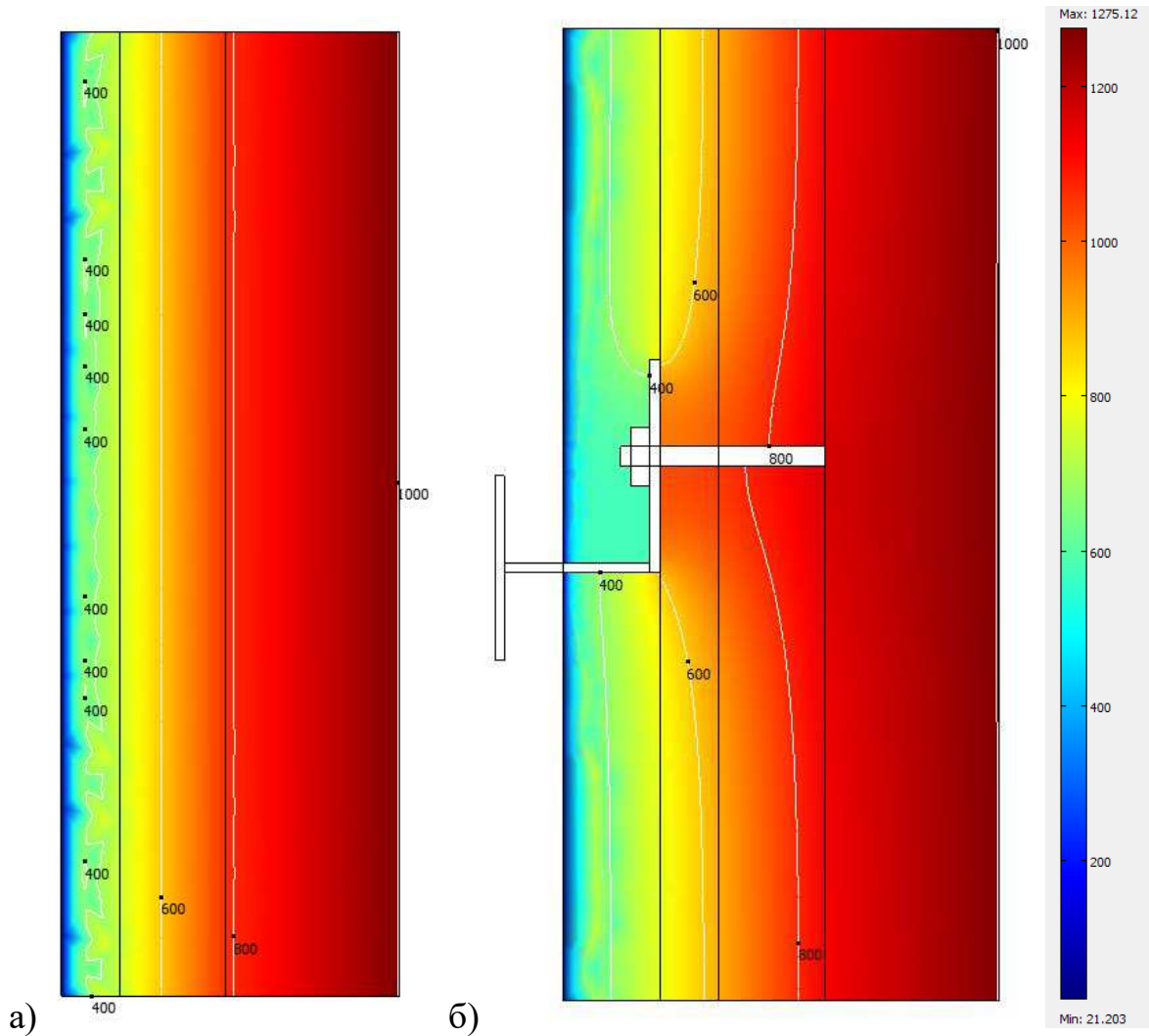


Рисунок 21 – Распределение парциального давления водяного пара двух конструкций при температуре наружного воздуха $-35,5\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) Конструкция 1, б) конструкция 2

Представленные на рисунке 21 результаты расчётов показывают, что за счет применения анкера распределение парциального давления водяного пара смещается, таким образом для конструкции 2 составляет 800 Па в слое утеплителя, то для конструкции 1 600 Па.

На рисунке 22 представлено распределение концентрации влаги по сечению, $\text{кг}/\text{м}^3$.

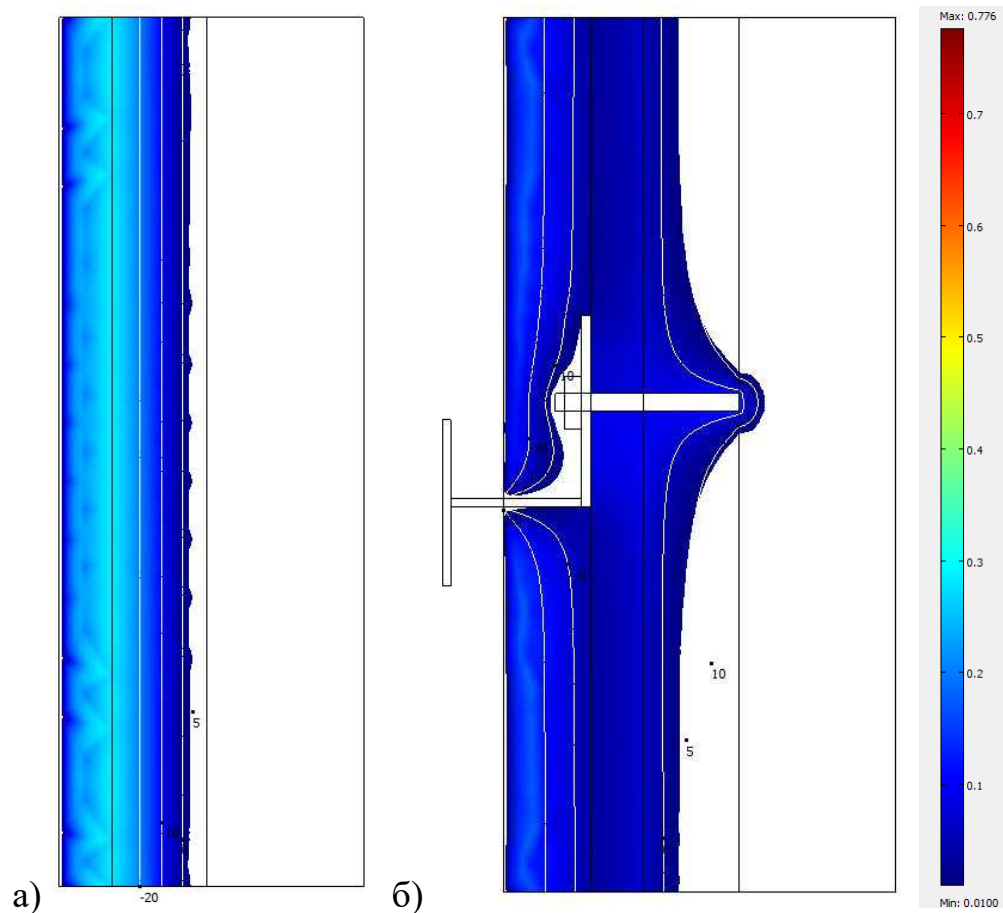


Рисунок 22 – Распределение влаги двух конструкций при температуре наружного воздуха $-35,5\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) Конструкция 1, б) конструкция 2

По результатам расчетов были получены кривые набора влаги в конструкциях, представленные на рисунке 23.

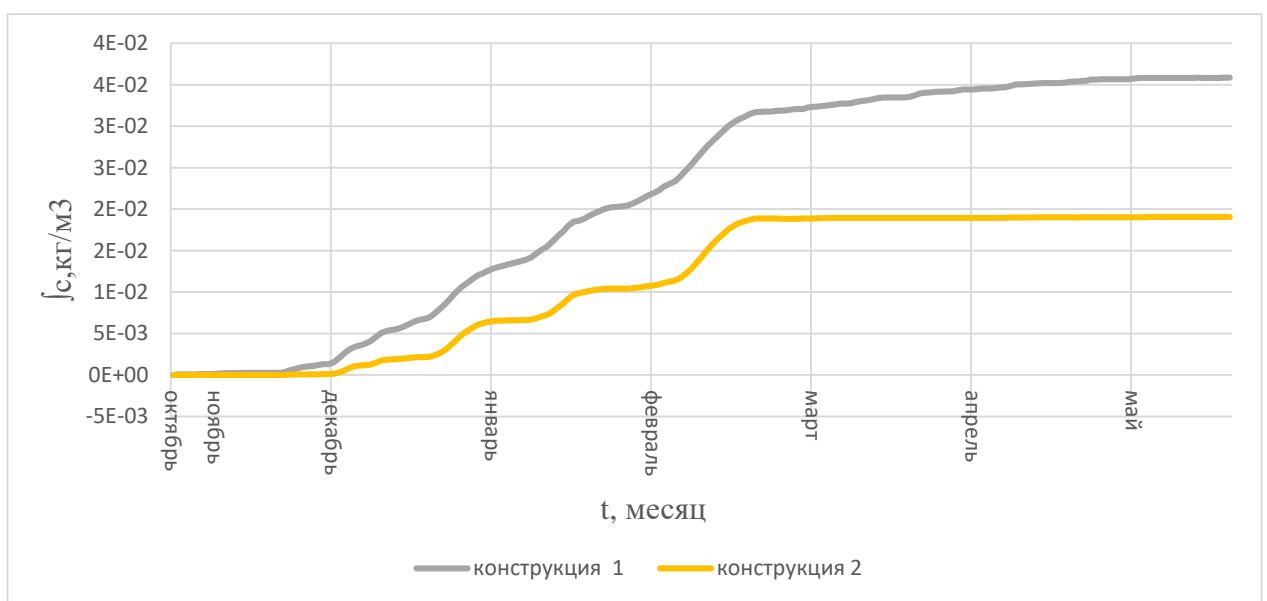


Рисунок 23 – График набора влаги в конструкциях при нестационарном режиме

Так же, как и при стационарном режиме, в нестационарном расчете процесс накопления влаги в конструкции 1 происходит быстрее, чем в конструкции 2, а количество накапливаемой влаги больше в 2 раза.

По полученным результатам было рассчитано количество выпавшего конденсата, как в толще стены, так и в утеплителе конструкции для реального хода температур.

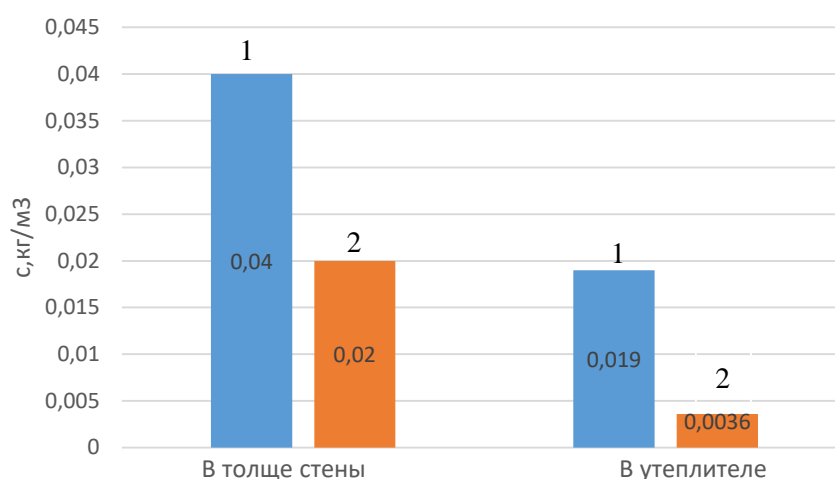


Рисунок 24 – Количество выпавшего конденсата по всей толще стены и в утеплителе, кг/м³: 1 - конструкция 1, 2 - конструкция 2

По итогам исследования влагонакопления можно сделать вывод, что в конструкции с воздушной прослойкой выпадение влаги происходит меньше.

3.3.3 Определение зоны конденсации влаги

На рисунке 25 представлены профили парциального давления насыщенного водяного пара и парциального давления водяного пара двух конструкций для самых холодных суток (-35,5 °C).

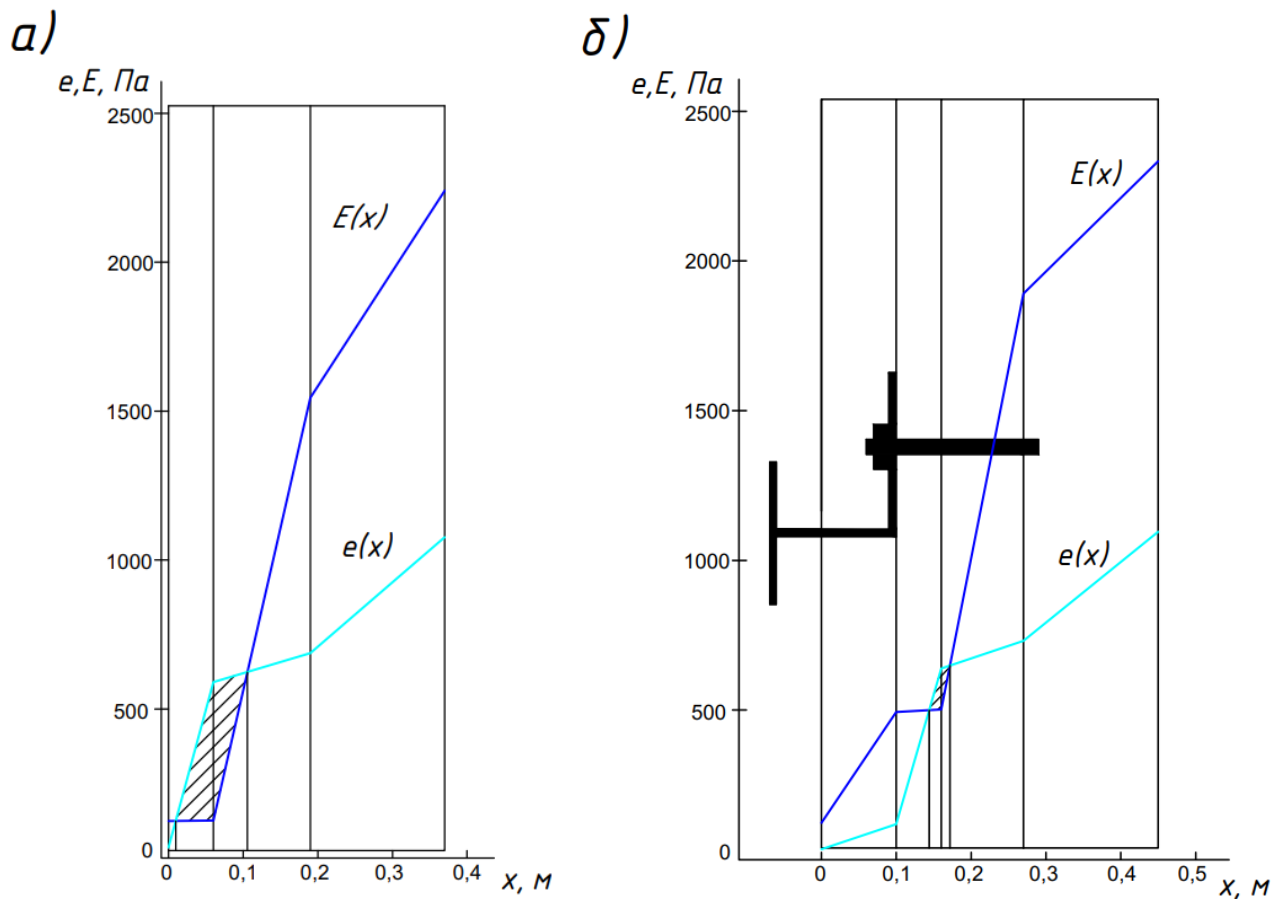


Рисунок 25 – Профили давления насыщенного водяного пара и парциального давления водяного пара: а) конструкция 1, б) конструкция 2

В конструкции 1 плоскость конденсации влаги расположена на переходе наружной стены и теплоизоляционного слоя. Зона конденсации влаги находится на участке $0,01 \geq x \geq 0,11$ м, а в координате $x=0,06$ м отклонение e от E равно 464 Па. В конструкции 2 плоскость конденсации влаги меньше, и располагается на участке $0,14 \geq x \geq 0,17$ м. В координате $x=0,16$ м отклонение e от E равно 137 Па.

3.4 Сравнительный анализ

По результатам исследования был сделан сравнительный анализ двух режимов расчет, сведенный в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты стационарного и нестационарного режимов расчета

Параметры	Стационарный		Нестационарный	
	Конструкция 1	Конструкция 2	Конструкция 1	Конструкция 2
Сопrotивление теплопередаче	3,19 м ² ·°C/Вт	5,56 м ² ·°C/Вт	3,19 м ² ·°C/Вт	5,56 м ² ·°C/Вт
Температура на внутренней поверхности стены	19,2-20,0 °C	19,7-20,2 °C	18,5-20,8 °C	19,0-21,0 °C
Температура на границе двух сред вблизи анкера	-	2,9-10,72 °C	-	-3,18 - 20,0 °C
Количество влаги	0,03 кг/м ³	0,009 кг/м ³	0,04 кг/м ³	0,02 кг/м ³
Зона конденсации	0,03 ≥ x ≥ 0,085 м	-	0,01 ≥ x ≥ 0,11 м	0,14 ≥ x ≥ 0,17 м

В ходе сравнительного анализа было выявлено:

1. Температурный режим внутри помещения соответствует требованиям для всех конструкций, кроме конструкции 1 при нестационарном режиме.

2. Вблизи анкера крепления навесного фасада создаётся зона относительно пониженных температур, однако при температуре наружного воздуха $t=-35,5^{\circ}\text{C}$ самых холодных суток при нестационарном режиме, температура материала вблизи анкера не опускается ниже -3°C , что не может существенно влиять на снижение долговечности материала в этой области.

3. Расчёты накопления влаги в конструкциях, наглядно показали, что при реальном ходе температур концентрация влаги в конструкции больше, чем при средних, что объясняется экспоненциальной зависимостью скорости выпадение конденсата от температуры наружного воздуха. Накопление влаги в конструкции с навесным вентилирующем фасадом при стационарном режиме ниже в 3,5 раза, и в 2 раза при нестационарном.

3.5 Выводы по третьей главе

В рамках диссертационной работы была предложена физико-математическая модель, позволяющая более точно описывать процессы тепловлагопереноса в наружных стенах.

Полученные результаты в ходе исследования указывают на эффективность утепления конструкций навесными вентилируемыми фасадами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы были предложены конструктивные решения, которые позволяют улучшить тепло-влажностный режим зданий.

По результатам анализа были сделаны выводы о целесообразности утепления ограждающих конструкций навесными вентилируемыми фасадами обладает рядом преимуществ. Было определено, что данная конструктивная система повышает надежность работы ограждающих конструкций зданий и минимизирует процессы деструкции в конструкции за счет сокращение зоны конденсации влаги.

В результате вычислений были получены значения количества влаги в конструкциях и построены графики набора влаги в различные периоды времени. Результаты расчётов с реальным ходом температур показали, что применение навесного вентилируемого фасада позволяет снизить влагонакопление в конструкции в 2 раза.

Было установлено, что расчет наружных ограждающих конструкций при экстремальных наружных температуре и влажности необходим, но получить объективную оценку эффективности конструкций можно при выполнении нестационарного расчета, который более точно описывает процессы теплопереноса в конструкции, учитывая амплитуды изменения температуры наружного воздуха.

По результатам диссертационного исследования опубликованы 2 статьи, входящих в систему научного цитирования РИНЦ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сазанаква, К. А. Проблемы энергетической и экономической эффективности систем навесных вентилируемых фасадов (обзор современных исследований) [Электронный ресурс] / К. А. Сазанаква // Архитектура и дизайн. – 2018. – № 4. – С. 31-36. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38568157>
2. Состояние жилищного фонда Красноярского края на конец 2018 года [Электронный ресурс] // Управление Федеральной службы государственной статистики по Красноярскому краю, Республике Хакасия и Республике Тыва. – Режим доступа: <https://krasstat.gks.ru>
3. Стратегия социально- экономического развития Красноярского края на период до 2020 года [Электронный ресурс] // Красноярский край официальный портал. – Режим доступа: <http://www.krskstate.ru>
4. Васькив, С. Н., Саенко, И. А. Оценка текущего состояния жилищного фонда в Красноярском крае и способы его обновления [Электронный ресурс] / С. Н. Васькив, И. А. Саенко // Инженерно-строительный институт Сибирский федеральный университет. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s096/s096-023.pdf>
5. Граник, Ю. Г. Тепловая изоляция жилых и гражданских зданий / Ю. Г. Граник // Энергосбережение. – 2005. – № 10. – С. 104-107.
6. Ливчак, В. И. Обоснование расчета удельных показателей расхода тепла на отопление разноэтажных жилых зданий / В. И. Ливчак // Энергосбережение. – 2005. – № 2.
7. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 года № 1715-р.
8. Гертис, К. Здания XXI века – здания с нулевым потреблением энергии / К. Гертис // Энергосбережение. – 2007. – № 3. – С. 34-36.

9. Сахно, И. И. Совершенствование температурных режимов ограждающих конструкций зданий в теплый период года: дис. ... кандидата технических наук : 05.23.03 / Сахно Игорь Иванович. - Волгоград, 2008. – 139 с.
10. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий. – Введ. 01.06.2004. – Москва: ФГУП ЦНС, 2004. – 140 с.
11. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон Российской Федерации от 23.11.2009 №261-ФЗ // КонсультантПлюс.
12. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Введ. 01.07.2013. – Москва: Минрегион России, 2012. – 82 с.
13. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федер. закон Российской Федерации от 30.12.2009 № 384-ФЗ
14. Государственная информационная система в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gisee.ru>.
15. Белов, Т. В., Назиров, Р. А. Некоторые аспекты формирования температурных полей с учетом влияния анкера крепления каркаса навесных вентилируемых фасадов [Электронный ресурс] / Т. В. Белов, Р. А. Назиров // Сибирский федеральный университет. Режим доступа: <http://aracy.pf/files/documents/44-redaktor/nauka/izdaniya/perspectivy/prsk2014/302-307.pdf>
16. Лыков, А. В. Теория теплопроводности: учебное пособие / А. В. Лыков. – Москва: Высшая школа, 1967. — 599 с.
17. Корниенко, С. В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натуральных измерений параметров микроклимата помещений / С. В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2. – С. 18-23.

18. Богословский, В.Н. О потенциале влажности / В.Н. Богословский // Инж.-физ. журн. -1965. Т. 8. - № 2. - С. 216-222.
19. Vatin N.I., Nemova D.V., Murgul V., Pukhkal V., Golik A., Chizhov E. (2014). Reconstruction of Administrative Buildings of the 70's: The Possibility of Energy Modernization. Journal of Applied Engineering Science / Istrazivanja i Projektovanja za Privredu. – 2014. – No. 1. – pp. 37–44.
20. Vatin N.I., Nemova D.V., Tarasova D.S., Staritcyna A.A. (2014). Increase of Energy Efficiency for Educational Institution Building. Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 953–954. – pp. 854–870.
21. Vatin N.I., Gorshkov A.S., Nemova D.V., Staritcyna A.A., Tarasova D.S. (2014). The Energy-Efficient Heat Insulation Thickness for Systems of Hinged Ventilated Facades. Advanced Materials Research. – 2014. – No. 941–944. – pp. 905–920.
22. Alihodzic R., Murgul V., Vatin N., Aronova E., Nikolić V., Tanić M., Stanković D. (2014). Renewable Energy Sources Used to Supply Pre-School Facilities with Energy in Different Weather Conditions. Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 624. – pp. 604–612.
23. Корниенко, С. В. Комплексная оценка энергоэффективности и тепловой защиты зданий / С. В. Корниенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 11. – С. 33-48.
24. Корниенко, С. В., Ватин, Н. И., Петриченко, М. Р., Горшкова, А. С. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле/ С. В. Корниенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2005. – № 6(33). – С. 19-33.
25. Ройфе, В. С. Развитие методики неразрушающего контроля теплотехнического состояния ограждающих конструкций зданий/ В. С. Ройфе // Строительные материалы. – 2014. – № 6. – С. 60–62.

26. Крышов, С. И., Аленичева, Е. В., Карина, М. Г. Проблемы мониторинга ограждающих конструкций зданий на стадии возведения/ С. И. Крышов // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 585–588.
27. Окунев, А. Ю., Левин, Е. В., Шагинян, К. С. Современные подходы к тепловизионному обследованию строительных объектов/ А. Ю. Окунев // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 7–9.
28. Енюшин, В. Н., Крайнов, Д. В. О влиянии излучательной способности поверхности исследуемого объекта на точность измерения температур при тепловизионном обследовании/ В. Н. Енюшин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1(23). – С. 99–103.
29. Васильев, Н. Б., Стуглев, Н. А., Утков, Е. О., Мельник, И. С. Навесные вентилируемые фасады и мокрые/ Н. Б. Васильев // СтройМного. – 2017. – № 4(9).
30. Белов, Т. В. Влияние ориентации стенового ограждения на долговечность заделки анкера крепления навесного фасада / Т. В. Белов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2015. – № 4. – С. 142-146.
31. Белов, Т. В., Назиров, Р. А. Расчет и статистический анализ годового хода температуры в контактной зоне защитного слоя железобетонной стеновой панели с анкером крепления навесного фасада / Т. В. Белов, Р. А. Назиров // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 1. – С. 106-112.
32. СНиП 21-01-97* Пожарная безопасность зданий и сооружений. – Введ. 01.01.1998. – Москва.: Минстрой России, 1997. – 14 с.
33. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции. – Москва: НТС Госстроя России, 2003.

34. Распоряжение Правительства Красноярского края №736-р от 27.09.2019. [Электронный ресурс] // Красноярский край официальный портал. – Режим доступа: <http://www.krskstate.ru>
35. Бенда, А. Ф. Тепло- и массоперенос в материалах и процессах: учебное пособие [Электронный ресурс] / А. Ф. Бенда. – Москва : МГУП имени Ивана Федорова, 2014. – 236 с. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/31253465-Тепло-i-massoperenos-v-materialah-i-processah.html>
36. Вороненко, Б. А. Аналитическое описание процесса нестационарной теплопроводности: учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] / Б. А. Вороненко, А. Г. Крысин, В. В. Пеленко, О. А. Цуранов. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 84 с. – Режим доступа: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/1674.pdf>
37. Малявина, Е. Г. Теплотери здания: справочное пособие / Е. Г. Малявина. – Москва: «АВОК-ПРЕСС», 2007 – 265 с.
38. Теплопередача через ограждения. [Электронный ресурс]/ – Режим доступа:http://elib.psu.by/bitstream/123456789/11869/2/2_-_teplopered%D0%B0ch%D0%B0_cherez_ogr%D0%B0zhdenija.pdf
39. Теплопроводность при нестационарном режиме. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <http://www.k204.ru/206/L4.pdf>
40. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса: учебник / А. В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Москва: Госэнергоиздат, 1963. – 536с.
41. Корниенко, С. В. Инженерная оценка влажности наружных стен / С. В. Корниенко // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2015. – № 1. – С. 19.
42. Козлов, В. В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влагопроводности и фильтрации воздуха: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / Козлов Владимир Владимирович. – Москва, 2004. – 24 с.
43. Лыков, А. В. О термической диффузии влаги / А. В. Лыков // Журнал прикладной химии. – 1935. – № 8. – С. 1354—1359.

44. Богословский В. Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий: монография / под ред. В. Г. Гагарина. – Москва: МГСУ, 2013. – 112 с.

45. Егоров, В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: учебное пособие / В. И. Егоров. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2006. – 77 с.

46. СП 131.13330.2018 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – Введ. 29.05.2019. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 114 с.

47. Расписание Погоды. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=29579&lang=ru

48. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Введ. 01.01.2013. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 15 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
институт
Проектирование зданий и экспертиза недвижимости
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 Р.А. Назиров
подпись, инициалы, фамилия

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Расчет стеновых ограждений в нестационарном режиме тепломассопереноса
тема

08.04.01 «Строительство»
код и наименование направления

08.04.01.04 «Проектирование зданий. Энерго- и ресурсосбережение»
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель  д-р.техн.наук, зав. кафедрой Р. А. Назиров

подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник

 К. А. Сазанакова

подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент

 к.т.и. Е.Ф. Плесчинская

подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Красноярск 2020