

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
«____» ____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Проектные решения с использованием материалов на основе вермикулита
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.ц.н.т, канд.техн наук Е.М. Сергуничева
подпись, дата звание, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник _____ Р.В. Откеев
подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент _____
подпись, дата звание, ученая степень инициалы, фамилия

Красноярск 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. Состояние вопроса и выбор основного направления исследования.....	5
1.1 Анализ использования и применения засыпных утеплителей.....	5
1.1.1 Керамзит	6
1.1.2 Перлит	6
1.1.3 Вермикулит	7
1.2 Опыт использования материала в строительной отрасли	8
1.3 Обоснование использования вермикулита.....	12
Глава 2. Методология исследования.....	14
2.1 Теплотехнический расчет	14
2.2 Расчет сопротивления паропроницанию	18
2.3 Моделирование в COMSOL Multiphysics.....	24
2.4 Исходные данные для моделирования	26
Глава 3. Результаты и подведение итогов	29
3.1 Результаты моделирования влажностного режима ограждающих конструкций.....	30
3.2 Результаты моделирования температурного режима ограждающих конструкций.....	39
3.3 Определение стоимости конструкций	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	47
ПРИЛОЖЕНИЕ А	50

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в строительстве, присутствует одна из актуальных проблем как для вновь создаваемых, так и для эксплуатируемых зданий и сооружений – это их утепление.

Применяя вспученный вермикулит, можно добиться решения этой проблемы со значительным экономическим эффектом.

Одновременно с уменьшением затрат на сохранение тепла в зданиях и сооружениях решаются такие проблемы, как их огнезащита, звукоотражение и звукопоглощение внутренних помещений, а также ряд других проблемных вопросов, которые возникают при благоустройстве.

Вспученный вермикулит является сыпучим, легким, высокопористым материалом, с характерной чешуйчатой структурой без запаха.

Материал обладает высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами, не токсичен, не подвержен гниению и препятствует распространению плесени. Уникальные его технические характеристики – это температуростойкость, огнестойкость, отражающая способность, химическая инертность.

Вермикулит является экологически чистым и биостойким продуктом. При повышенной температуре, возникающей при пожарах, не выделяет никаких газов, что является важным преимуществом по сравнению с другими известными материалами органического происхождения.

Предлагаются теплоизоляционные материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками на основе вермикулита. Создаваемые материалы и технологии их получения отвечают критериям энерго- и ресурсосбережения, биосферной совместимости и пожарной безопасности при одновременном улучшении тепло-физических характеристик [1].

Цель исследования – оценка эффективности проектных решений с использованием вермикулита и определение области его применения.

Задачи:

- Провести анализ использования материала в строительной отрасли;
- Предложить конструктивные решения с использованием вермикулита;
- Определить эффект от использования вермикулита в ограждающих конструкциях.

Глава 1. Состояние вопроса и выбор основного направления исследования

1.1 Анализ использования и применения засыпных утеплителей

Монтаж и демонтаж традиционного утепления стен минеральной ватой, пенопластом и другими плитами – процесс достаточно трудоемкий. В некоторых случаях уместно использовать сыпучий утеплитель. Он намного дешевле и удобнее при той же эффективности. На рынке представлен весьма разнообразный выбор таких материалов.

Среди огромного количества видов минерального сырья наиболее подходящими являются силикаты и их разновидности, представляющие собой сложные оксидсодержащие композиции. К ним относится сырье как природного, так и техногенного происхождения. А среди природных минералов наиболее востребованными являются перлит и вермикулит. Эти минералы после тепловой обработки нашли широкое применение в составе композиционных материалов и в качестве основы в теплоизоляционных материалах и конструкциях. [1]

Сыпучий теплоизолятор применяется не только для внутренних поверхностей – им можно утеплять помещение и снаружи. Стены, пол, крыша – можно утеплить все элементы, которые конструктивно допускают засыпку материала.

Засыпная теплоизоляция дешевая. Некоторые ее виды – это просто отходы производства (опилки) или уже готовые природные материалы (песок).

Единственный недостаток – гигроскопичность. Влажный, он утрачивает свои свойства. Нужно особое внимание уделять гидро- и пароизоляции его слоев. Впрочем, боязнь влаги характерна в той же мере и для всех видов теплоизоляции [2].

Есть несколько видов сыпучего материала для утепления. Каждый из них имеет свои свойства, которые рассмотрены ниже.

1.1.1 Керамзит

Утеплитель, основой которого служит глина. Применяется как самостоятельный теплоизолатор для помещений жилых либо производственных строений, так и в сочетании с бетоном (получается керамзитобетон). Сегодня его получают путем обжига глинистых сланцев. Технология производства варьируется в зависимости от требуемых размеров конечных гранул. Изучив маркировку засыпного утеплителя, можно понять, каких размеров гранулы материала и для каких участков дома он подойдет. Например, керамзитовый песок используется как теплоизолатор для пола либо выступает составным элементом бетонной обшивки. Гранулы диаметром 5-10 мм подходят для скатных и плоских крыш, пола, мансарды; размером более 15 мм — для утепления подвального помещения или фундамента.

Керамзит неизбежно оседает по мере эксплуатации, поэтому при первичном монтаже его необходимо сильно утрамбовать, чтобы минимизировать усадку. Материалом рекомендуется утеплять стены лишь в регионах, где температура зимой не опускается ниже −20 градусов.

1.1.2 Перлит

Утеплитель производится из силикатных вулканических каменных пород по той же технологии, что и керамзит. При нагреве до 1000-1200 градусов с поверхности камней выпаривается влага, оставляя воздух внутри них. В результате получаются белые или серые гранулы диаметром от 1 до 10 мм. Плотность перлита колеблется от 75 до 150 кг/м³, а за свой цвет его еще называют «стеклянным утеплителем».

Минимальные по размеру гранулы (1-2 мм) образуют перлитовый песок, используемый в таких сферах: утепление помещений жилых домов; изготовление акустических материалов; производство утепляющей штукатурки; создание пожароустойчивого бетона. Гранулы, наполненные воздухом, весят меньше керамзита, поэтому подходят для теплоизоляции стен.

К тому же, материал напомнит минеральную вату, поскольку кроме сохранения тепла воспрепятствует проникновению посторонних шумов в помещение.

1.1.3 Вермикулит

Минерал из группы гидрослюд, образующийся в природных условиях в результате гидратации и других вторичных изменений различных слюд. В процессе нагревания вермикулит вслучивается с образованием мелкопористого материала. Размер частиц при этом увеличивается в направлении перпендикулярным слюдистым слоям в 20—30 раз. Различные разновидности вермикулита принято определять по виду межслоевого катиона. Наиболее распространен магниевый вермикулит, реже встречается натриевый, медистый и никелевый [3]. Имеет повышенные огнестойкие свойства, за счет которых применяется при монтаже дымоходов. Идеален для пола и стен.

Тонкий слой вермикулита толщиной 5 см сохранит до 70% тепла помещения. Слой вермикулита на чердачных перекрытиях толщиной 5 см снижает потери тепла на 75%, толщиной 7,5 см – на 85% и толщиной 10 см – на 92%. Этого достаточно для утепления кровли. Для стен, пола и фундамента рекомендуется делать в два раза больший слой материала. Плотность вермикулита ниже, чем у керамзита или перлита.

По своим энергосберегающим свойствам всученный вермикулит в 7-10 раз превосходит такие традиционные материалы, как бетон и кирпич. Существенными достоинствами этого материала являются его легкость (плотность 500-600 кг/м³) и продолжительный срок службы [2].

Поставляется этот засыпной утеплитель мешками определенного объема, а применяется практически во всех помещениях жилого дома.

Впервые вермикулит обнаружен в начале XIX века, промышленное применение получил лишь спустя 100 лет.

На сегодняшний день промышленная разработка ведется только на двух месторождениях вермикулита: Ковдорском (Мурманская область) и

Потанинском (Челябинская область). Наиболее высокий уровень обогащения вермикулитовой руды обеспечен на Ковдорском месторождении (ОАО «Ковдорслюда»). Благодаря двухстадийному обогащению вермикулитовых руд (мокрому и последующему сухому) достигается получение высококачественного концентратса с содержанием основ [4].

Крупнейшее в мире Ковдорское месторождение на Кольском полуострове (Мурманская область). Встречается вермикулит на Урале близ г. Вишневогорск (Челябинская область), в Красноярском крае — Татарское месторождение, Иркутская область — верховья пади Улунтуй и г. Слюдянка, Приморский край — Кокшаровское месторождение. За рубежом — в Западной Австралии, США (штат Монтана, Колорадо, Вайоминг, Северная Каролина, Джорджия), Уганде, Украине, ЮАР, Казахстане (Кулантауское месторождение в ЮКО), Узбекистане (Каракалпакия).

1.2 Опыт использования материала в строительной отрасли

Как показывает мировая практика, вермикулит весьма успешно применяется в строительстве, в качестве несгораемого насыпного утеплителя. Обладая текучестью, он при засыпании заполняет пустоты неправильной формы. Слой вермикулитовой засыпки в 20 см по теплозащите эквивалентен кирпичной стене толщиной 1,5 м или бетонной стене толщиной 2 м.

Для сравнения, в таблице 1.1 приведены показатели теплопроводности некоторых строительных материалов

Таблица 1.1 – Показатели теплопроводности

Наименование материала	Теплопроводность, Вт/м·К
Вспученный вермикулит	0,04-0,062
Базальтовый холст	0,04-0,062
Гравий керамзитовый	0,12
Асбестоцементная плита	0,13
Пенобетон	0,14 – 0,18
Кирпич пустотелый	<0,56

Окончание таблицы 1.1

Кирпич полнотелый	>0,6
Кирпичная кладка	0,8
Бетон	1,45
Железобетон	1,6

Вермикулитовые засыпки в стеновых конструкциях применяются для защиты помещений от перегревания и охлаждения, для изоляции холодильных камер, сводов печей, для звуковой изоляции камер испытания авиационных и автомобильных двигателей, для звукоизглощения в кинозалах и киностудиях и т.п.

Наряду с вермикулитовыми засыпками, в строительстве эффективно применяются сухие строительные смеси и строительные растворы, наполнителем которых является вермикулит.

В ограждающих конструкциях всегда имеются такие участки, потери тепла в которых невозможно учесть (грани, углы, стыки и места нарушения целостности наружной теплоизоляционной оболочки, вследствие сквозного прохождения вентиляционных каналов или элементов строительных конструкций и т.д.). Во всех этих участках потери тепла, как правило, увеличены по сравнению с обычными поверхностями, они являются мостиками холода. Примерами являются строительные элементы из раствора и бетона в кирпичной или блочной кладке, например, оконные и дверные перемычки, выступы, подвальные цоколи, и т.д.

Очень эффективным методом существенного повышения теплоизоляционных качеств стен является применение так называемых «теплых штукатурок», изготовленных на базе вермикулита.

«Теплая штукатурка» — это своего рода многокомпонентная смесь из исходных материалов, обладающих низким уровнем теплопроводности, благодаря чему образуется пористая структура с довольно хорошими теплоизоляционными характеристиками[5]. Из этого следует, что применение

“теплых” штукатурок для облицовки поверхностей стен может дать значительный экономический эффект за счет снижения толщины стены.

Вермикулитовые штукатурные растворы применяются для внутренней и наружной отделки строительных конструкций и могут выполнять, помимо повышенных теплозащитных и звукоглощающих функций - огнезащитные, декоративные и др. Наносятся они на конструкции обычным для штукатурных работ способами.

На основе легкоплавких глин и мелкоразмерного вермикулита (с размерами частиц менее 0,63 мм) разработана технология получения керамических пористых заполнителей, удовлетворяющих требованиям стандарта. Ее применение обеспечивает расширение направлений использования легкоплавких, но не вспучивающихся без добавки вермикулита, глин. Кроме того, вермикулит обеспечивает снижение объемной массы гранул за счет увеличения вспучиваемости глин в 1,4-1,6 раз, получение более высоких марок керамзита (200-250). Выход целых гранул составил 100%. Поверхность гранул более ровная, гладкая, с меньшим количеством видимых глазом трещин и меньшими их размерами. Внутренняя часть гранул отличается более ярким проявлением стеклофазы и увеличенным количеством пор. Повышение пористости происходит не только за счёт увеличения объема гранул, но и за счет большей пористости, присущей термовермикулиту (общая пористость термо-вермикулитовой гранулы составляет 90 - 92 %, а керамзитовой гранулы на основе одной глины около 70 %) [6].

Широко применяемые в строительстве тонкостенные конструкции из армоцемента, железобетона, металла (своды-оболочки, плиты, фермы и т.п.) в большинстве случаев обладают недостаточной огнестойкостью.

Попеременное нагревание и охлаждение таких конструкций водой в условиях пожара приводит к резкому падению их прочности, большим деформациям, вызывает обрушение.

Огнезащитная эффективность вермикулитовых растворов направлена на повышение предела огнестойкости, который должен составлять от 15 до 150 мин. [7].

Как было уже отмечено раньше, вермикулит обладает высокой огнестойкостью. Это его свойство нашло применение для создания вспучивающихся огнезащитных покрытий (ВОЗП) на основе вермикулита.

Наиболее перспективными являются вспучивающиеся покрытия, обладающие огнезащитными и температуростойкими свойствами при действии огня. Эти покрытия наносятся на конструкцию тонким слоем. В процессе эксплуатации они выполняют функции декоративного покрытия. В случае возникновения пожара при действии высоких температур покрытие вспучивается, значительно увеличиваясь в объеме, и образует пористые угольные слои, обладающие низкой теплопроводностью.

В силу высокой отражательной способности самих частиц вермикулита, их низкой теплопроводности и упругости, а также благодаря тонким прослойкам воздуха между чешуйками слюды, разработанные составы характеризуются низкой теплопроводностью и высокой огнестойкостью, а также эстетичностью, химической стойкостью, нетоксичностью, отсутствием дымообразования [7].

Недостатками вспученного вермикулита, которые необходимо преодолеть, является высокая открытая пористость зерен, соответственно значительное водопоглощение, и соответственно недостаточная удобоукладываемость растворных смесей. Кроме того, низкая механическая прочность зерен вермикулита вследствие слабой связи между отдельными пластинками, расщепляемости по плоскостям спайности, влияет на прочность сцепления растворов. Поэтому целесообразно работать с мелкими фракциями вспученного вермикулита, выход которых при вспучивании значительно больше и они по стоимости дешевле.

1.3 Обоснование использования вермикулита

После анализа свойств минерала становится ясно, что сыпучий утеплитель из вермикулита – это весьма перспективный стройматериал, с помощью которого можно снизить материалоемкость конструкций и избавиться от непродуктивных тепловых затрат, одновременно обеспечив звукоизоляцию, длительную огнезащиту и декоративность. Безопасность, прочность и долговечность вермикулитовых изделий позволяют использовать их как снаружи, так и внутри строения.

Помимо этого, вермикулит вполне пригоден для решения прочих строительных задач: теплоизоляции чердаков, перекрытий и кровель; термозащиты дымоходных труб, трубопроводов, промышленного оборудования; обустройства термостойких кожухов и перегородок, например, для облицовки каминов.

Оштукатуривание стен цементно-вермикулитовым составом снаружи защищает их от непогоды и резких температурных перепадов, препятствует поражению плесенью и насекомыми.

Штукатурные утепляющие смеси актуальны и для внутренней отделки: их слои наносятся привычными инструментами, легко затираются и приобретают эстетичный внешний вид.

«Теплые штукатурки» на основе вермикулита обладают высокой паропроницаемостью, что способствует нормальной саморегуляции температурновлажностного режима.

Применение «теплых штукатурок» позволяет уменьшить толщину многослойной ограждающей конструкции без потерь теплоизоляционных качеств.

Есть смысл добавлять вермикулит и в кладочные бетонные смеси, чтобы он препятствовал потерям тепла через швы. В полной мере можно использовать вспученный вермикулит для пола: его рекомендуется включать в состав бетонного раствора для заливки стяжки, а также для укладки теплых и наливных полов. Таким образом, достигается существенное снижение

объемного веса, повышение надежности покрытия и сокращение расхода материалов. Вместе с тем, вермикулит не подходит для утепления подземных и цокольных этажей, поскольку не обладает должным уровнем гидрофобности.

Другой способ создания утепленной стены – заполнение вермикулитом полостей строительных блоков (рисунок – 1.3.1). Теплоизоляционный эффект такой конструкции резко возрастает, а свободный парообмен в стене не нарушается, и она остается легкой и дышащей. При необходимости наружную стену можно еще больше изолировать, если ее возвести из бетонных панелей на основе быстротвердеющего цемента с добавлением сыпучего утеплителя для стен.



Рисунок 1.1 – Строительные блоки

Глава 2. Методология исследования

В данной работе было проведено моделирование проблемных узлов с точки зрения тепло- и массопереноса, с целью сравнения работы ограждающих конструкций из вермикулитобетона и кирпичной многослойной конструкции.

С помощью численных методов определены зоны конденсации в исследуемых узлах за январь.

Согласно п.8.1 СП 50.13330 «Тепловая защита зданий» [8] сопротивление паропроницанию R_p наружной стены должно быть не меньше требуемого. Данное требование обусловлено обеспечением не накопления влаги в ограждающих конструкциях за годовой период и период с отрицательными температурами. Выпадение влаги в ограждающих конструкциях негативно оказывается на теплозащите, так как с увеличением влажности материала увеличивается теплопроводность, что, в свою очередь, приводит к общему снижению сопротивления теплопередачи в ограждающей конструкции. Также повышенная влажность ограждений крайне неблагоприятно отражается на санитарно-гигиеническом состоянии помещений. Сырость в жилых зданиях часто приводит к заболеваниям проживающих в них людей. Кроме того, чем выше влажность материала ограждения, тем меньше его морозо-, влаго- и биостойкость.

В качестве исследуемых стен были подобраны следующие ограждающие конструкции: Стена 1 – многослойная кирпичная (кирпич-утеплитель-кирпич), Стена 2 – однослочная из вермикулитобетона.

2.1 Теплотехнический расчет

Для сравнения работы ограждающих конструкций из вермикулитобетона и кирпичной многослойной конструкции был произведен теплотехнический расчет для определения толщины утеплителя и толщины стены из вермикулитобетона. Толщина утеплителя стены 1 и толщина стены 2 были

подобраны таким образом, чтобы сопротивление обоих ограждающих конструкций были одинаковыми.

Характеристики материалов приняты согласно СП 50.13330.2012 [8].

Определение толщины утеплителя производится согласно СП50.13330.2012.

Климатические параметры:

Город – Красноярск;

Условия эксплуатации – А;

Температура внутреннего воздуха, $t_b = 21^{\circ}\text{C}$;

Температура отопительного периода, $t_{\text{от}} = -6,7^{\circ}\text{C}$;

Температура наиболее холодной пятидневки (0,92), $t_h = -37^{\circ}\text{C}$;

Продолжительность отопительного периода, $z_{\text{от}} = 233$ сут;

Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности, $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, $\alpha_h = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

$$\Gamma\text{СОП} = (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) \cdot z_{\text{ht}} = (21 + 6,7) \cdot 233 = 6454,1^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$$

Т.к. величина ГСОП отличается от табличного, нормируемое значение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций следует определять по формуле 1 СП 50.13330.2012:

$$R_{\text{req}} = a \cdot \Gamma\text{СОП} + b = 0,00035 \cdot 6454,14 + 1,4 = 3,66 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$$

Сопротивление теплопередаче R_o , $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, неоднородной многослойной ограждающей конструкции следует определять по формуле 8 СП 50.13330.2012:

$$R_o = r(R_{\text{si}} + R_k + R_{\text{sl}}) = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{\text{ext}}}$$

Таблица 2.1 – Технические характеристики материалов стены 1

Номер слоя	Наименование	Толщина слоя, δ, м	Плотность материала, γ, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, λ _A , Вт/(м·°C)
1	Кладка кирпича глиняного обыкновенного на цементно-песчаном растворе	0,38	1800	0,7
2	Минераловатные плиты Rockwool Кавити Баттс	x	180	0,045
3	Керамического пустотного плотностью 1300 кг/м³ (брутто) на цементно-песчаном растворе	0,12	1400	0,52

Примечание. Материалы соответствуют условиям эксплуатации А, табл.2 СП 50.13330.2012.

Величину градусо-суток отопительного периода ГСОП, °C·сут, определяют по формуле 2 СП 50.13330.2012:

$$3,66 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,7} + \frac{x}{0,045} + \frac{0,12}{0,52} + \frac{1}{23}$$

$$x = 0,123 \text{ м.}$$

Принимаем утеплитель толщиной 123 мм.

Фактическое сопротивление R = 3,67 (м²·°C)/ Вт

Таблица 2.2 – Техофизические характеристики материалов стены 2

Номер слоя	Наименование	Толщина слоя, δ, м	Плотность материала, γ, кг/м³	Коэффициент теплопроводности и, λ, Вт/(м·°C)
1	Вермикулитобетон	x	600	0,16

Примечание. Материалы соответствуют условиям эксплуатации А, табл.2 СП 50.13330.2012.

$$3,67 = \frac{1}{8,7} + \frac{x}{0,16} + \frac{1}{23}$$

$$x = 0,562$$

Принимаем толщину 562 мм.

Полученные характеристики стен сведены в таблицу 2.3

Таблица 2.3 – Полученные характеристики стен

Показатель	Стена 1	Стена 2
Толщина, мм	623	562
Сопротивление теплопередаче, м²·°C/Вт		3,67

2.2 Расчет сопротивления паропроницанию

Согласно п.8.1 СП 50.13330 «Тепловая защита зданий» [8] сопротивление паропроницанию R_{π} наружной стены (от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации) должно быть не менее наибольшего из следующих требуемых сопротивлений паропроницанию:

-требуемого сопротивления паропроницанию $R_{\pi1}^{tp}$ ($m^2 \cdot \text{ч} \cdot Pa / mg$) (из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации), определяется по формуле (1)

$$R_{\pi1}^{tp} = \frac{(e_b - E) R_{\pi,h}}{E - e_h} \quad (1)$$

-требуемого сопротивления паропроницанию $R_{\pi2}^{tp}$ (из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха), определяется по формуле (2)

$$R_{\pi2}^{tp} = \frac{0,0024z_0(e_b - E_0)}{\rho_w \delta_w \Delta w + \eta} \quad (2)$$

где e_b - парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчётных температуре и относительной влажности воздуха в помещении, определяется по формуле (3)

$$e_b = (\varphi_b / 100) E_b = (55 / 100) 2463 = 1355 \text{ Па} \quad (3)$$

где E_b - парциальное давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре внутреннего воздуха помещения определяется по формуле (4) при $t_b = 21^\circ\text{C}$: $E_b = 2463$ Па.

$$E = 1.84 * 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 + t}\right) \quad 4)$$

$\varphi_{\text{в}}$ – относительная влажность внутреннего воздуха: для жилых зданий $\varphi_{\text{в}}=55\%$

$R_{\text{п.н.}}$ – сопротивление паропроницанию части ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью ограждающей конструкции и плоскостью максимального увлажнения, рассчитывается по формуле (5)

$$R_{\text{п.н.}} = \sum R_{\text{п.и.}} \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мГ}; \quad 5)$$

$e_{\text{н}}$ – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за годовой период.

z_0 – продолжительность периода влагонакопления, сут, принимается равной периоду с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха; $z_0 = 171$ сут. (табл.1 СП 131.1330) [6];

E_0 – парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения, Па, определяемое при средней температуре наружного воздуха периода влагонакопления z_0 согласно СП 50.13330 [7];

ρ_w – плотность материала увлажняемого слоя

δ_w – толщина увлажняемого слоя ограждающей конструкции

Δw – предельно допустимое приращение влажности в материале увлажняемого слоя, в % по массе за период влагонакопления z_0 принимаемое по таблице 10 СП 50.13330.2012

На основании п. 8.5.5 СП 50.13330.2012 [8] принимаем, что плоскость максимального увлажнения находится на стыке между двумя слоями утеплителем и наружным отделочным слоем в этом случае $\delta_w \Delta w$ в формуле принимается равной сумме $\delta_1 \Delta w_1 + \delta_2 \Delta w_2$ соответствуют половинам толщин стыкующейся слоев.

E – парциальное давление насыщенного водного пара в плоскости максимального увлажнения, за годовой период определяется по формуле (6)

$$E = (E_1 z_1 + E_2 z_2 + E_3 z_3) / 12 \quad 6)$$

где E_1, E_2, E_3 – парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения соответственно зимнего осенне-весеннего и летнего периодов, Па, определяемые по температуре в плоскости максимального увлажнения при средней температуре наружного воздуха соответствующего периода согласно п.8.6 СП 50.13330 [7];

z_1, z_2, z_3 , - продолжительность зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов года: $z_1=5$ мес.; $z_2=2$ мес.; $z_3=5$ мес.;

η – коэффициент, определяемый по формуле (7)

$$\eta = \frac{0,0024(E_o - e_{h,ot})z_o}{R_{n,h}} \quad 7)$$

где $e_{h,ot}$ – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами.

Результат проверка выполнения условий:

$$R_{n.b.} > R_{n1}^{tp}$$

$$R_{n.b.} > R_{n1}^{tp}$$

Сопротивление паропроницанию части стены, расположенной между внутренней поверхностью стены и плоскостью возможной конденсации, $R_{n.b.}$ должно быть не менее требуемого сопротивления паропроницанию из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации, и не менее требуемого сопротивления

паропроницанию из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха.

Для каждого из слоя многослойной конструкции по формуле (8) производится вычисление значение комплекса $f_i(t_{\text{м.y}})$, который характеризует температуру в плоскости максимального увлажнения.

$$f_i(t_{\text{м.y}}) = 5330 \cdot \frac{R_{o,\text{п}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н,отр}})}{R_o^{\text{ усл}}(e_{\text{в}} - e_{\text{н,отр}})} \cdot \frac{\mu_i}{\lambda_i} \quad (8)$$

где $R_{o,\text{п}}$ - сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, м · ч · Па/мГ,

$R_o^{\text{ усл}}$ - условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ограждающей конструкции, (м · °C)/Вт, определяемое по формулам (Е.6), (Е.7); приведены ниже

$t_{\text{н,отр}}$ - средняя температура наружного воздуха для периода влагонакопления, °C;

$e_{\text{в}}$ - парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетных температуре и относительной влажности воздуха в помещении,

$$e_{\text{в}} = (\varphi_{\text{в}} / 100) E_{\text{в}} \quad (9)$$

$e_{\text{н,отр}}$ - среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, Па, определяемое по [6].

μ_i , λ_i - расчетные коэффициенты теплопроводности, Вт/(м · °C), и паропроницаемости, мГ/(м · ч · Па), материала соответствующего слоя.

По полученным значениям комплекса $f_i(t_{my})$ по таблице 11 СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [7] определяются значения температур в плоскости максимального увлажнения, t_{my} , для каждого слоя многослойной конструкции.

Для определения слоя, в котором находится плоскость максимального увлажнения, производится сравнение полученных значений t_{my} с температурами на границах слоев конструкции. Если температура t_{my} в каком-то из слоев расположена в интервале температур на границах этого слоя, то делается вывод о наличии в данном слое плоскости максимального увлажнения и определяется координата плоскости - x_{my} (в предположении линейного распределения температуры внутри слоя).

Если в каждом из двух соседних слоев конструкции отсутствует плоскость с температурой t_{my} , при этом у более холодного слоя t_{my} выше его температуры, а у более теплого слоя t_{my} ниже его температуры, то плоскость максимального увлажнения находится на границе этих слоев.

Если внутри конструкции плоскость максимального увлажнения отсутствует, то она расположена на наружной поверхности конструкции.

Если при расчете обнаружилось две плоскости с t_{my} в конструкции, то за плоскость максимального увлажнения принимается плоскость, расположенная в слое утеплителя.

μ_y , λ_y - условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ограждающей конструкции, $(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, определяемое по формулам (10), (11);

$$R_0^{yspl} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_H} \quad (10)$$

где - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C), принимаемый согласно таблице 4; СП 50.13330.2012

- коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C), принимаемый согласно таблице 6; СП 50.13330.2012

- термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, (м²·°C)/Вт, определяемое для невентилируемых воздушных прослоек по таблице Е.1, для материальных слоев по формуле

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s} \quad (11)$$

- толщина слоя, м;
- теплопроводность материала слоя, Вт/(м·°C), принимаемая по результатам испытаний в аккредитованной лаборатории; при отсутствии таких данных оно оценивается по приложении.
- средняя температура наружного воздуха для периода с отрицательными среднемесячными температурами, °C;

Требуемое сопротивление паропроницанию , (м²·ч·Па)/мг (из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации), определяемого по формуле

$$R_{nl}^{tp} = \frac{(e_B - E) R_{ph}}{E - e_H} \quad (12)$$

- коэффициент, определяемый по формуле

$$\eta = \frac{0,0024(E_0 - e_{H,otp})z_0}{R_{ph}} \quad (13)$$

- расчетные коэффициенты теплопроводности, Вт/(м²·°C), и паропроницаемости, мг/(м·ч·Па), материала соответствующего слоя.

По полученным значениям комплекса $f_i(t_{\text{м.у}})$ по таблице 11 СП 50.13330.2012 определяются значения температур в плоскости максимального увлажнения, для каждого слоя многослойной конструкции.

Для определения зон конденсации влаги в данной работе был использован программный комплекс COMSOL Multiphysics.

2.3 Моделирование в COMSOL Multiphysics.

Температурное поле в момент времени τ определяется как распределение температуры T по телу, то есть функцией $T = T(x, y, z, \tau)$. Тепловой поток, как правило направлен из области с более высокой температурой в область с более низкой.

Основное положение теории теплопроводности, известное как закон Фурье, заключается в пропорциональности теплового потока градиенту температуры в однородной неподвижной среде. После некоторых преобразований, уравнение теплопроводности принимает вид [11]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (14)$$

где $T = T(\tau, x, y, z)$ – температура, К; x, y, z – координаты, м; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ∇ - оператор Лапласа.

$$a = \frac{\lambda}{C_m \cdot \rho}, \quad (15)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; C_m – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для учета массопереноса необходимо объединить уравнение 14 с уравнением диффузии [12].

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \nabla^2 c, \quad (16)$$

где $c = c(\tau, x, y, z)$ – концентрация, моль/м³; D – коэффициент диффузии, м²/с.

Для связи этих уравнений необходимо учесть зависимости характеристик материалов от окружающей среды [13].

Через ограждающую конструкцию в процессе эксплуатации проходят поток влаги и тепла, эти процессы определяются схожими уравнениями, теплопроводности для потока тепла (14) и уравнением диффузии (16) для потока влаги. В стационарных условиях в уравнении теплопроводности коэффициент температурпроводности принимает значение коэффициента теплопроводности, а уравнение диффузии в стационарном виде можно записать через парциальное давление водяного пара и коэффициент паропроницаемости.

Для объединения этих уравнений необходимо добавить в систему аналитическую зависимость парциального давления от температуры (3,4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial e}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial e}{\partial y} = 0 \\ E = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(\frac{-5330}{T}\right) \\ \varphi = \frac{e}{E} \end{array} \right.$$

Моделирование ограждающих конструкций проводилось в программном комплексе Comsol Multiphysics. Данный комплекс является средой численного моделирования систем, устройств и процессов во всех областях проектирования, производства и научных исследований. Comsol позволяет с

помощью численных методов создавать сложные модели, описывающиеся системами дифференциальных уравнений в частных производных.

2.4 Исходные данные для моделирования

Исходные данные для моделирования были приняты согласно СП 50.13330.2012 и СП 131.13330.2012.

Таблица 2.4 – Границные условия

Наименование	Обозначение	Значение
Температура внутреннего воздуха	t_int	21°C
Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности	α_int	8,7 Вт/(м ² ·°C)
Парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха	e_int	1354 Па
Температура наружного воздуха	t_ext	-16 °C
Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности	α_ext	23 Вт/(м ² ·°C)
Парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха	e_ext	140 Па

В качестве граничных условий для теплопереноса заданы тепловые потоки с коэффициентами теплоотдачи наружных и внутренних поверхностей. Для уравнения диффузии на поверхностях принимались постоянные значения парциального давления

Таблица 2.5 – Характеристики материалов узлов

Номер слоя	Наименование	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·°C)	Коэффициент паропроницаемости, μ , кг/(м·с·Па)
1	Кладка кирпича глиняного обыкновенного на цементно-песчаном растворе	0,7	3,06E-08
2	Минераловатные плиты Rockwool Кавити Баттс	0,045	8,33E-08
3	Керамического пустотного плотностью 1300 кг/м ³ (брутто) на цементно-песчаном растворе	0,52	4,44E-08
4	Железобетон плотностью 2500 кг/м ³	1,92	8,33E-09
5	Вермикулитобетон плотность 600 кг/м ³	0,16	4,17E-08
6	Пароизоляция	0,1	2,50E-09
7	Пенополистерол	0,038	1,39E-08

На рисунке 2.1 представлены исследуемые узлы.

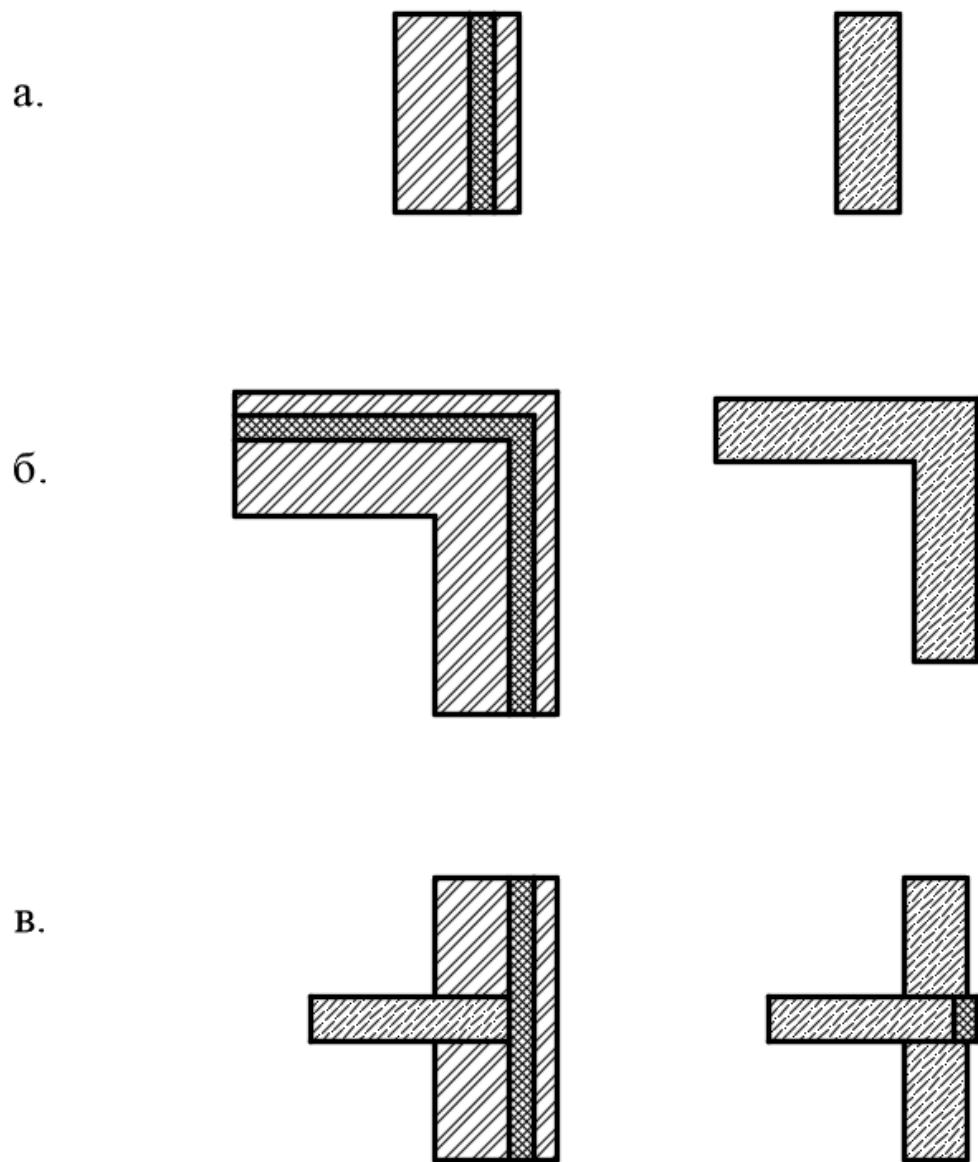


Рисунок 2.1 – Исследуемые узлы.

а) Стена; б) Угол; в) Узел перекрытия.

Глава 3. Результаты и подведение итогов

Исходя из всего исследования можно сделать выводы, что область применения вспученного вермикулита достаточно обширна. Его применяют как засыпки в стеновых конструкциях, а также для изоляции или звукопоглощения. Так же вермикулит используется в строительных растворах и бетонах в качестве заполнителя. Высокая огнестойкость минерала нашла свое применение во вспучивающихся огнезащитных покрытиях.

В силу высокой отражательной способности самих частиц вермикулита, их низкой теплопроводности и упругости, а также благодаря тонким прослойкам воздуха между чешуйками слюды, разработанные составы характеризуются низкой теплопроводностью и высокой огнестойкостью, а также химической стойкостью, нетоксичностью, отсутствием дымообразования.

Существенными достоинствами этого материала являются его легкость, плотность от 100-60 кг/м³, согласно ГОСТ 12865-67 [18]. А так же продолжительный срок службы.

Основной недостаток – гигроскопичность. Влажный, он утрачивает свои свойства. Нужно особое внимание уделять гидро- и пароизоляции.

Исходя из расчетов и сравнения двух конструкций явного лидера не обнаружено. Вермикулитобетон может быть использован при малоэтажном строительстве. С одновременной дешевизной, по сравнению с многослойной ОК, уменьшается и толщина конструкции. Что позволит в процессе строительства каркасных домов отойти от строительства многослойных конструкций.

Наружные ограждения зданий защищают помещения от атмосферных воздействий, а также выполняют функции защиты и регулирования воздушного, теплового и влажностного режимов. Влажностный режим влияет на теплофизические свойства применяемых материалов [9]. В свою очередь от теплофизических свойств зависят энергозатраты необходимые на эксплуатацию здания. Основной величиной, от которой зависят теплофизические свойства,

является сорбционная влажность, которая, в свою очередь, зависит от температуры и влажности материалов. Под сорбией строительных материалов чаще всего понимается физическая адсорбция водяного пара из воздуха на внутренних капиллярах, щелях, пустотах и прочих поверхностях, а также капиллярная конденсация водяного пара в его порах [10].

3.1 Результаты моделирования влажностного режима ограждающих конструкций

В ограждающих конструкциях помещений влажностное состояние материалов зависит от влажностного режима помещений и климатических характеристик района строительства, принимаемые согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» [15]. Различные сочетания наружных и внутренних влажностных режимов формируют два типа условий эксплуатации ограждающих конструкций: А и Б. Условиям эксплуатации А соответствуют сочетания сухого или нормального влажностного режима помещений с сухой зоной района строительства, а также сухого режима помещений с нормальной климатической зоной влажности. Все остальные сочетания влажностного режима помещений и климатических зон влажности формируют условия эксплуатации Б [14].

В результате расчета были получены значения относительной влажности φ для исследуемых узлов, выполненных из вермикулитобетона плотностью 600 кг/м³ и традиционной многослойной конструкции из кирпича, в качестве утеплителя минераловатные плиты.

По результатам расчета с использованием программного комплекса COMSOL во всех рассматриваемых узлах значение относительной влажности, φ достигало единицы. Это говорит о том, что в этих зонах образуется конденсат, который в свою очередь приводит к негативным последствиям. На рисунках 3.1; 3.3; 3.5-3.8, изображены области конденсации и изотермы -5, 0, +5 °C.

Графики распределения ϕ по сечению стены представлены на рисунках 3.2 и 3.4.

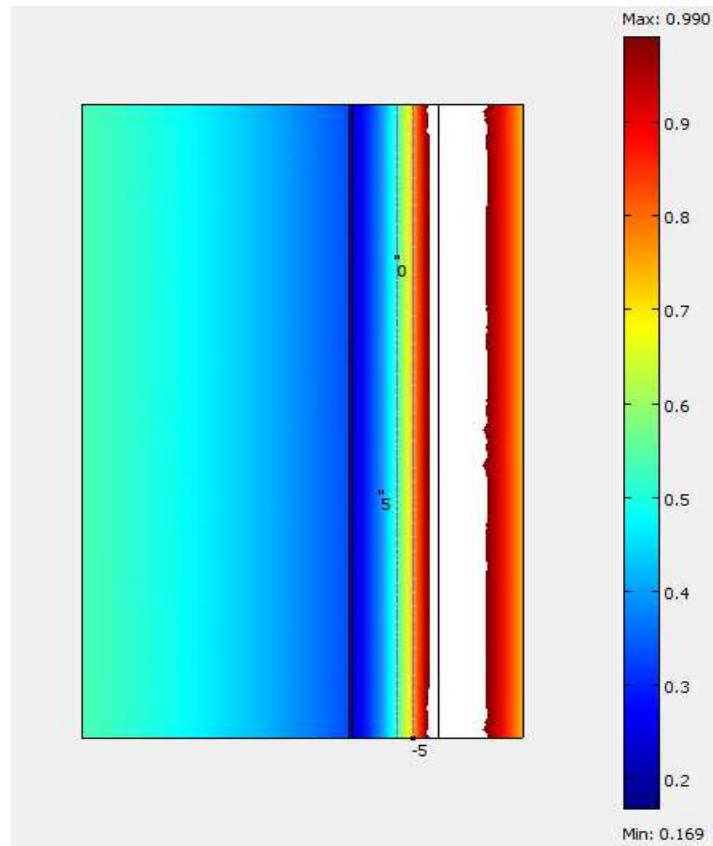


Рисунок 3.1 – Зона конденсации. Многослойная кирпичная стена.

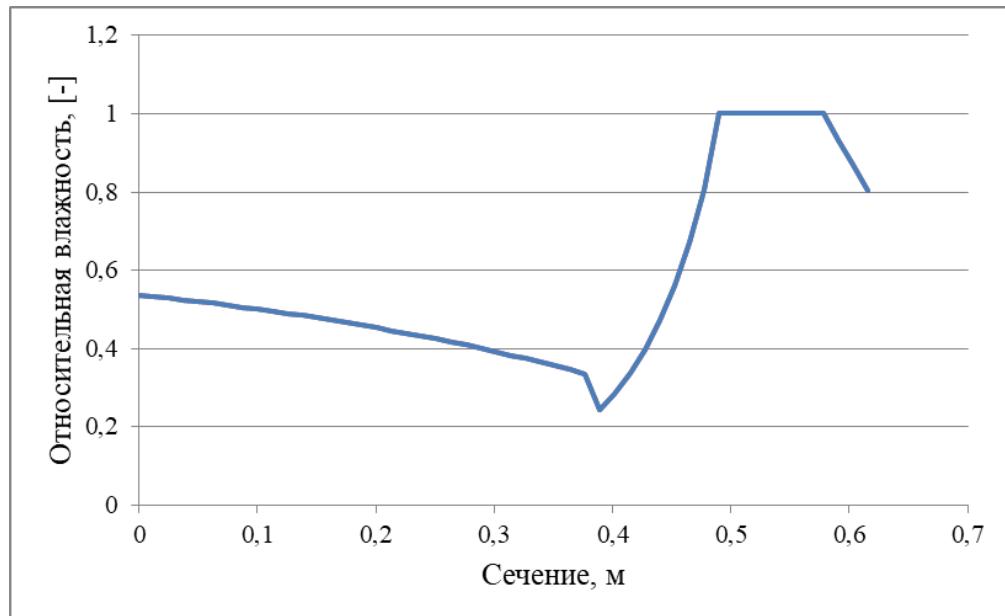


Рисунок 3.2 – График распределения значения ϕ в многослойной кирпичной стене.

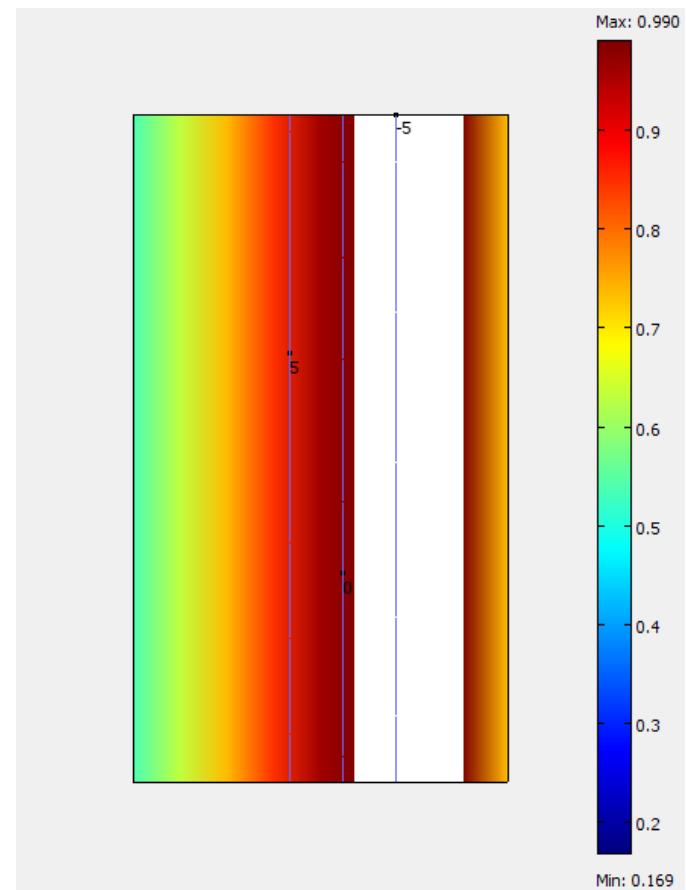


Рисунок 3.3 – Зона конденсации. Стена из вермикулитобетона.

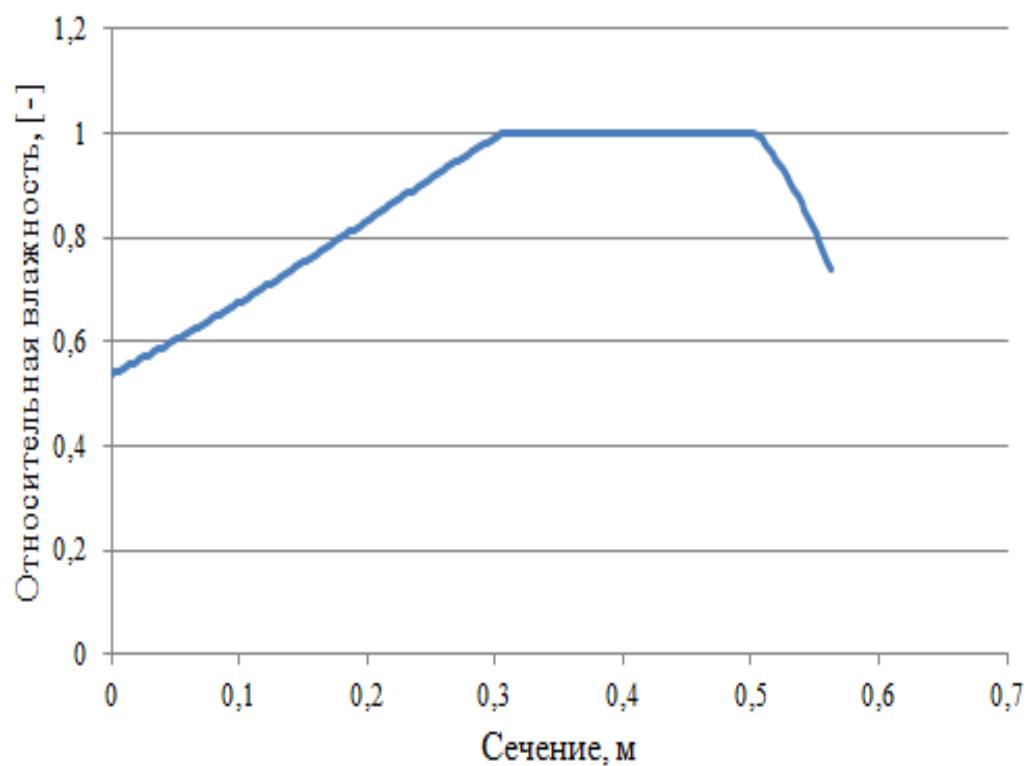


Рисунок 3.4 – График распределения значения φ в стене из вермикулитобетона.

Как видно из рисунка 3.2, в распределении относительной влажности по сечению многослойной конструкции ярко выражена плоскость максимального увлажнения на границе слоев утеплителя и облицовочного кирпича. На границе несущей кладки и минераловатных плит можно наблюдать резкое снижение влажности, которое связано с наличием пароизоляции в этой плоскости. После чего идет резкое повышение значения ϕ , вследствие резкого понижения температуры в утеплителе.

В конструкции из вермикулитобетона (Рисунок 3.4) влажность распределяется более равномерно по сечению стены, это связано с тем, что свойства стены равномерны по всему сечению, отсутствует пароизоляция, нет резких перепадов температур, как в случае многослойной стены.

Таким образом, конденсат в многослойной конструкции образуется более интенсивно, чем в однородной. Однако, для представления полной картины накопления влаги в ограждающих конструкциях в течение годового периода, необходимы более сложные расчеты в нестационарном режиме, с учетом изменения теплофизических параметров материалов в зависимости от влажности и температуры.

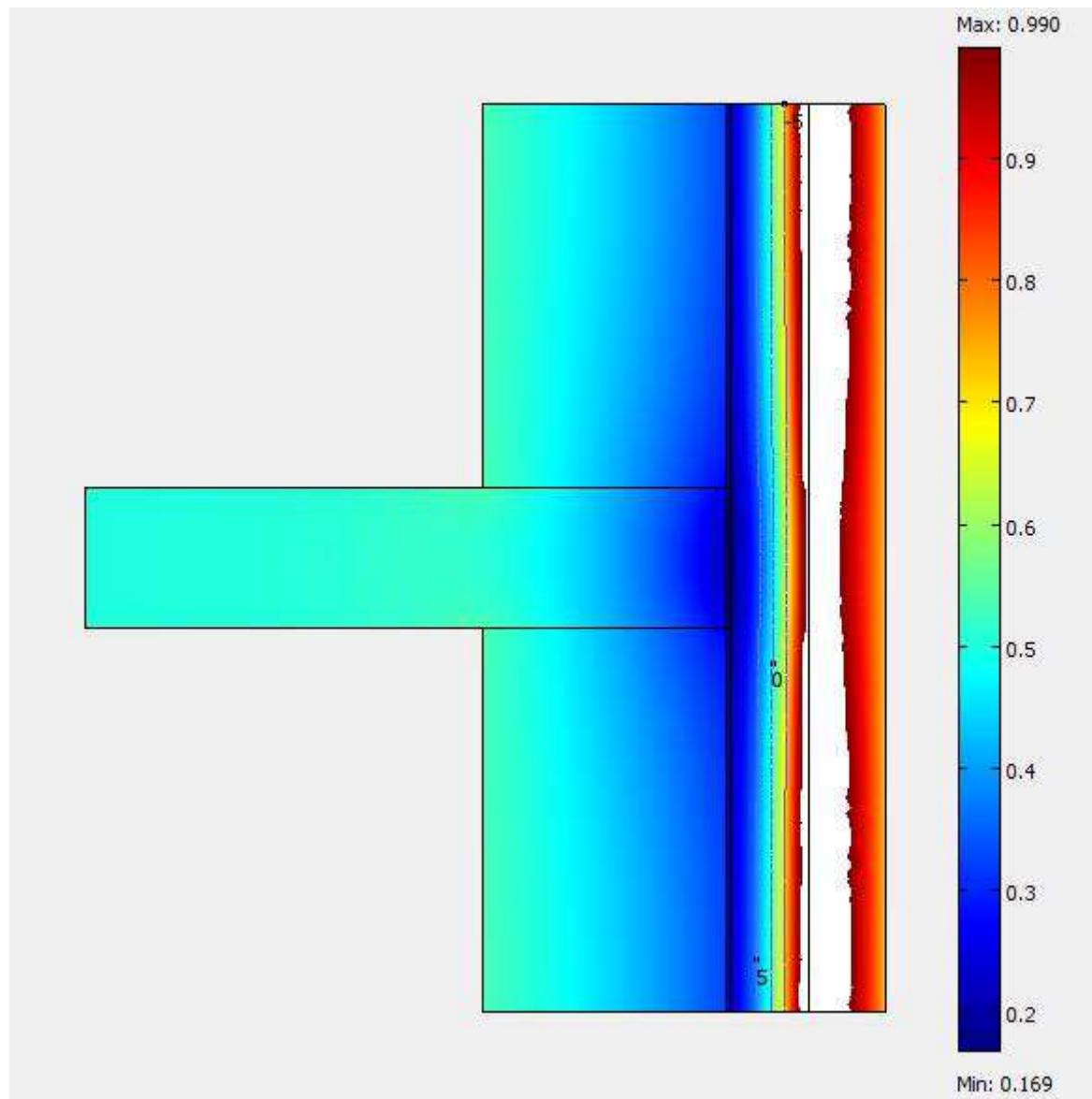


Рисунок 3.5 – Зона конденсации. Узел сопряжения монолитной ж/б плиты и кирпичной стены.

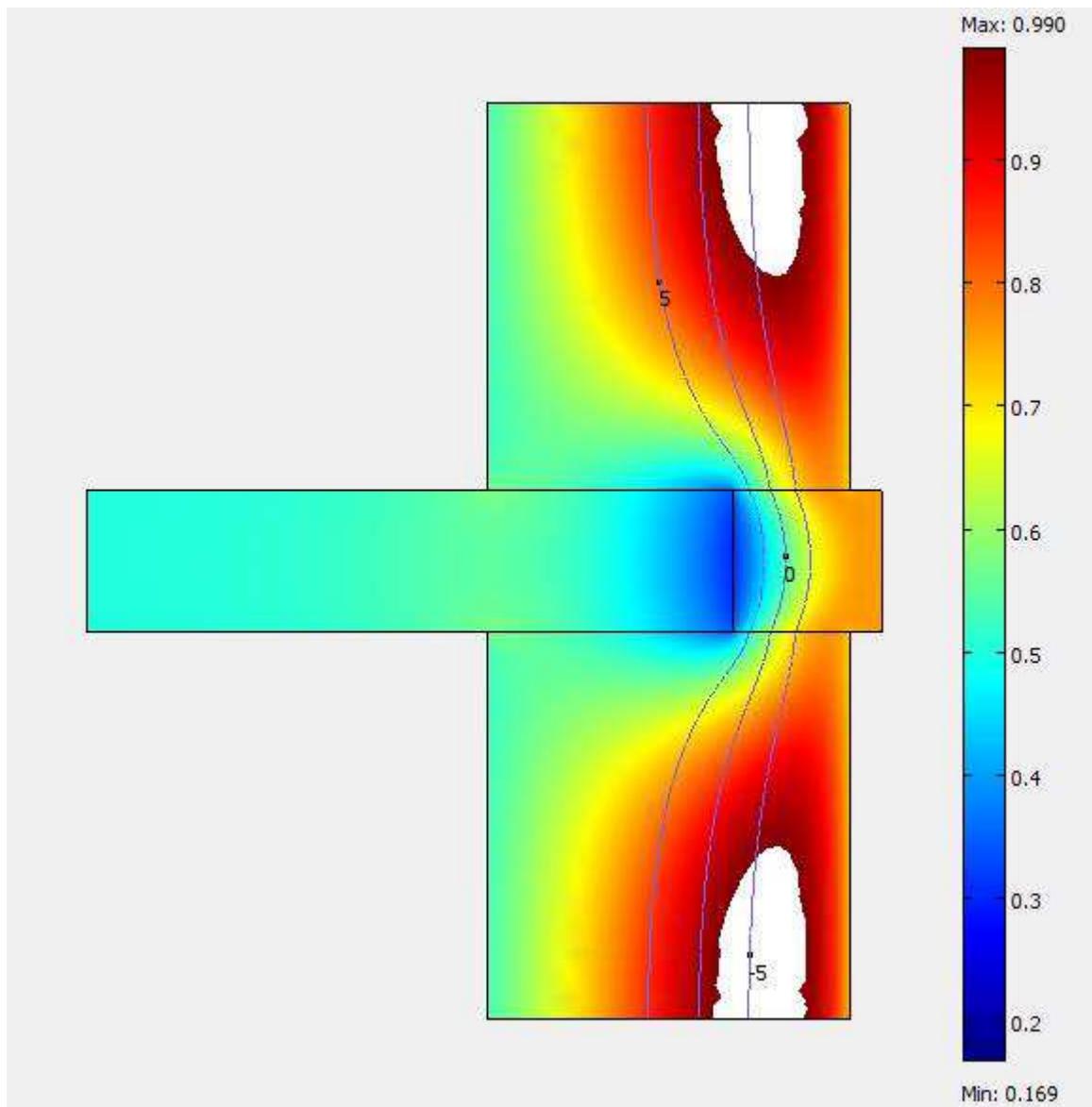


Рисунок 3.6 – Зона конденсации. Узел сопряжения монолитной ж/б плиты и стен из вермикулитобетона

На рисунках 3.5, 3.6 представлены распределения относительной влажности в узлах сопряжения плиты перекрытия и наружной стены. В случае ограждающей конструкцией из вермикулитобетона, конденсация влаги в месте плиты перекрытия отсутствует в отличие от кирпичной многослойной конструкции. Это связано с более интенсивным прогреванием плиты, что видно по результатам усредненных тепловых потоков, которые сведены в таблицу 3.1.

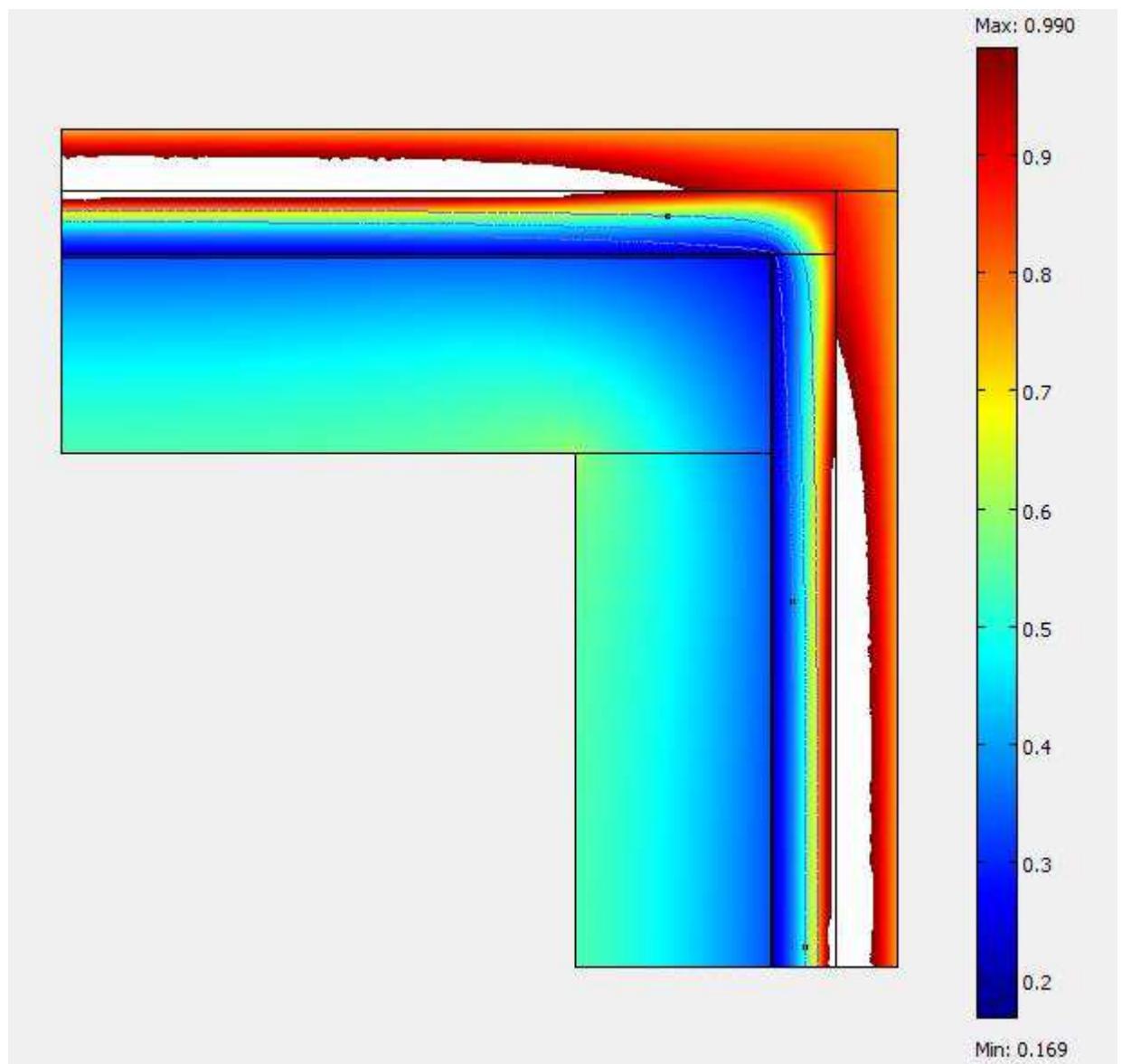


Рисунок 3.7 – Зона конденсации. Угловое сопряжение стены выполненное из кирпичной кладки.

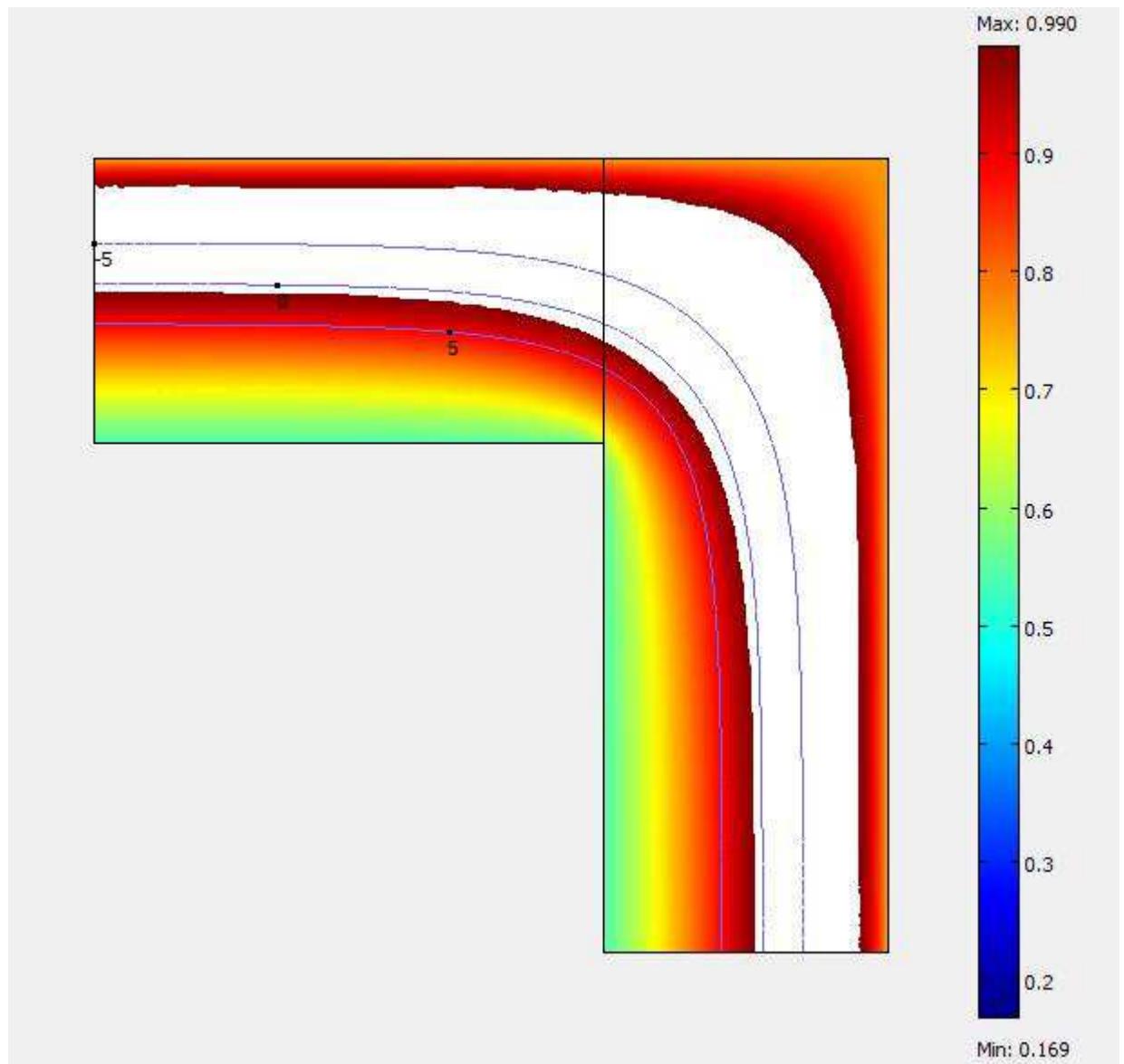


Рисунок 3.8 – Зона конденсации. Угловое сопряжение стены выполненное из вермикулитобетона.

На рисунках 3.7, 3.8 представлены распределения относительной влажности в угловых сопряжениях ограждающих конструкций. Здесь, по аналогии с узлами перекрытий, из-за большего теплового потока в многослойной конструкции влаги образуется меньше. Однако, больший тепловой поток означает большие тепловые потери.

Во всех случаях зоны увлажнения попадали в область отрицательных температур. При замерзании вода способствует разрушению материала, это

приводит к снижению долговечности материалов. Данная проблема, широко распространена в регионах с резко континентальным климатом. Из-за продолжительного межсезонья высокая частота периодов колебаний замерзания и оттаивания влаги обуславливает применение материалов с высокой морозостойкостью.

Выпадение влаги в ограждающих конструкциях так же негативно оказывается на тепловой защите ограждающих конструкций. С увеличением влажности материала значительно увеличивается его теплопроводность, что приводит к общему снижению сопротивления теплопередачи в ограждающей конструкции.

Повышенная влажность ограждений крайне неблагоприятно отражается и на санитарно-гигиеническом состоянии помещений. Сырость в жилых зданиях часто приводит заболеваниям проживающих в них людей и появлению плесени. Кроме того, чем выше влажность материала ограждения, тем меньше его морозо-, влаго- и биостойкость. Стойкость против коррозии также связана с влажностным состоянием ограждения.

В целом, по результатам расчета можно заключить, что с точки зрения влагопереноса конструкции ведут себя примерно одинаково.

Отличительной особенностью ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными качествами является наличие большого количества элементов крепления, каркасов, узлов сопряжений панелей из металла. Использование металлических элементов предопределяет возможность формирования в ограждающих конструкциях мостиков холода, существенно снижающих их сопротивление теплопередаче. Чтобы избежать указанного недостатка, необходимо на стадии проектирования выполнять достоверные расчеты температурных полей и на их основе прогнозировать и температурные и влажностные режимы конструкции в процессе эксплуатации здания.

3.2 Результаты моделирования температурного режима ограждающих конструкций

Современные программные комплексы позволяют инженерам различных отраслей решать поставленные задачи, требующие вычислений сложных дифференциальных уравнений, с помощью численных методов на ЭВМ. В строительной сфере одними из таких задач являются расчеты стационарного температурного и влажностного режимов ограждающих конструкций. Результаты расчета стационарных температурных полей применяются для анализа конструктивных решений узлов, для расчетов приведенного сопротивления теплопередаче сложных ограждающих конструкций и тд.

В рамках магистерской работы в программном комплексе Comsol Multiphysics были рассчитаны изополя температур исследуемых узлов. Результаты моделирования представлены на рисунках 3.9 – 3.12. В таблице 3.1 указаны усредненные по поверхности тепловые потоки, характеризующие тепловые расходы.

Таблица 3.1 – Тепловые потери в узлах.

Узел	Тепловой поток Вт/м ²	
	Многослойная ОК	Однослочная ОК
Стена	10,10	10,10
Перекрытие	10,36	11,00
Угол	13,23	11,46

Примечание: для стен и углов тепловой поток снят с внутренних поверхностей, для перекрытий с наружных

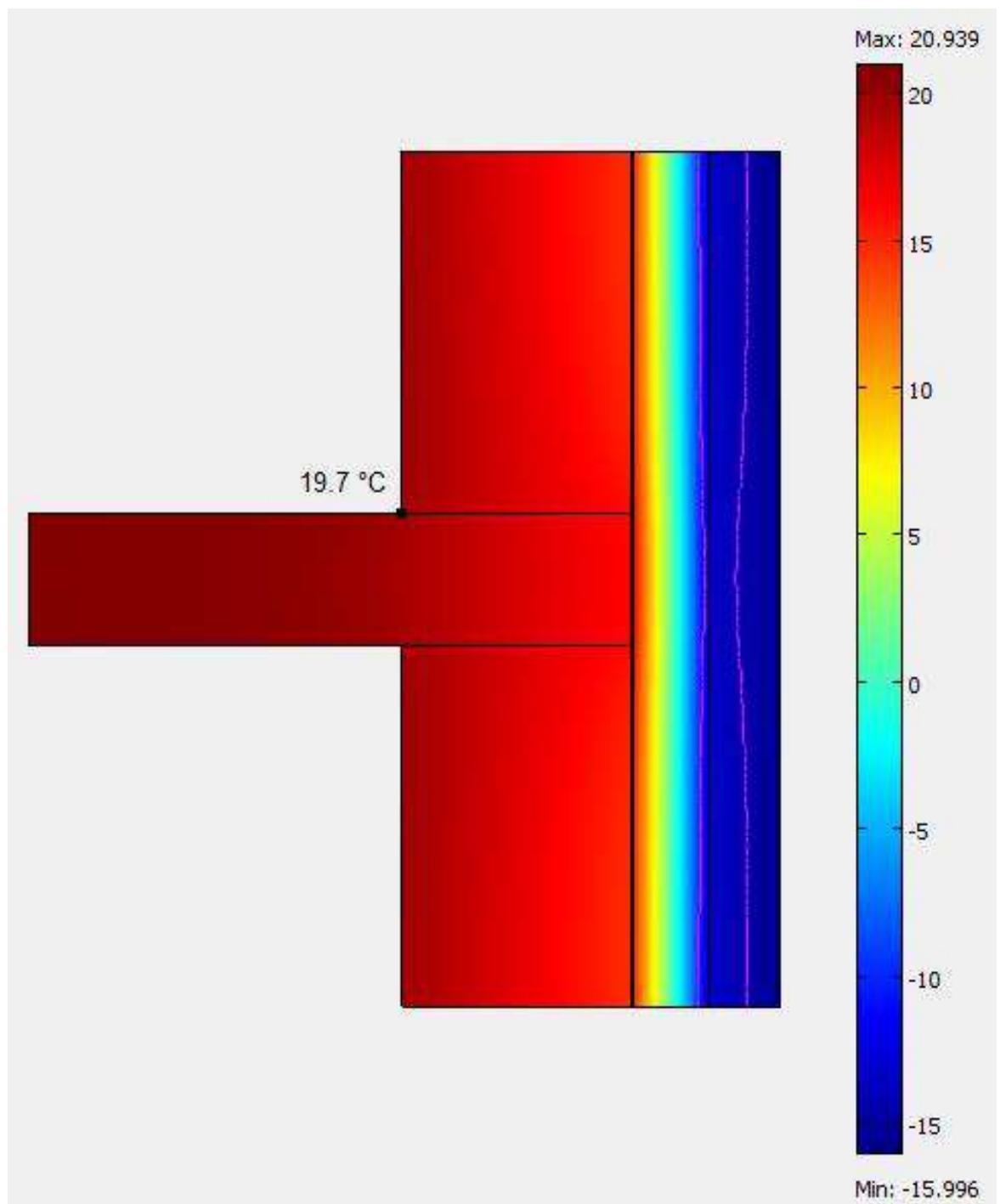


Рисунок 3.9 – Распределение температур. Узел сопряжения монолитной ж/б плиты и кирпичной стены.

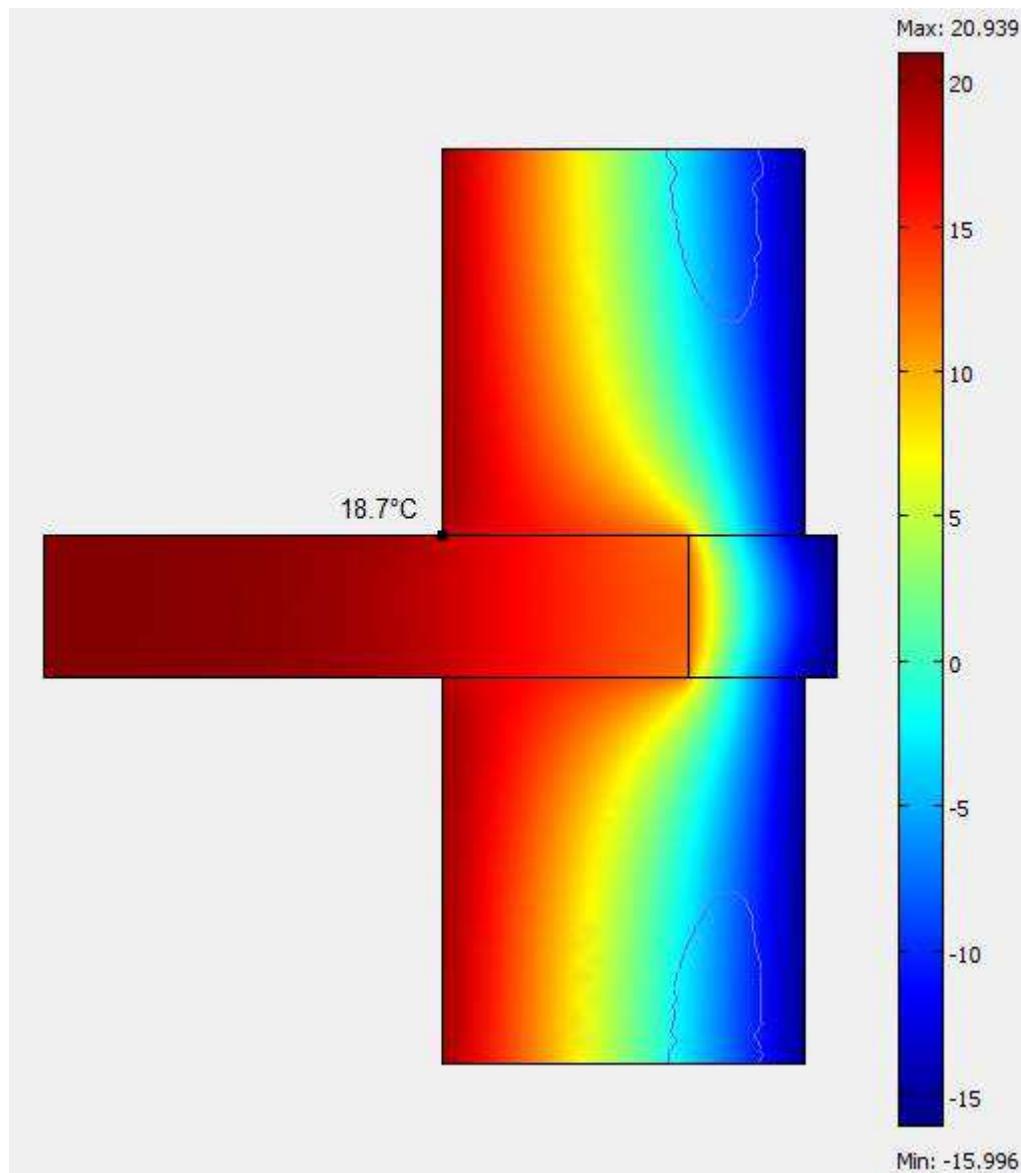


Рисунок 3.10 – Распределение температур. Узел сопряжения монолитной ж/б плиты и стен из вермикулитобетона

Как было описано выше, в случае с ограждающей конструкцией из вермикулитобетона влага не образуется в участке сопряжения плиты перекрытия и стен из-за лучшего прогревания плиты, что хорошо видно по распределениям температур по сечениям узлов (Рисунки 3.9, 3.10).

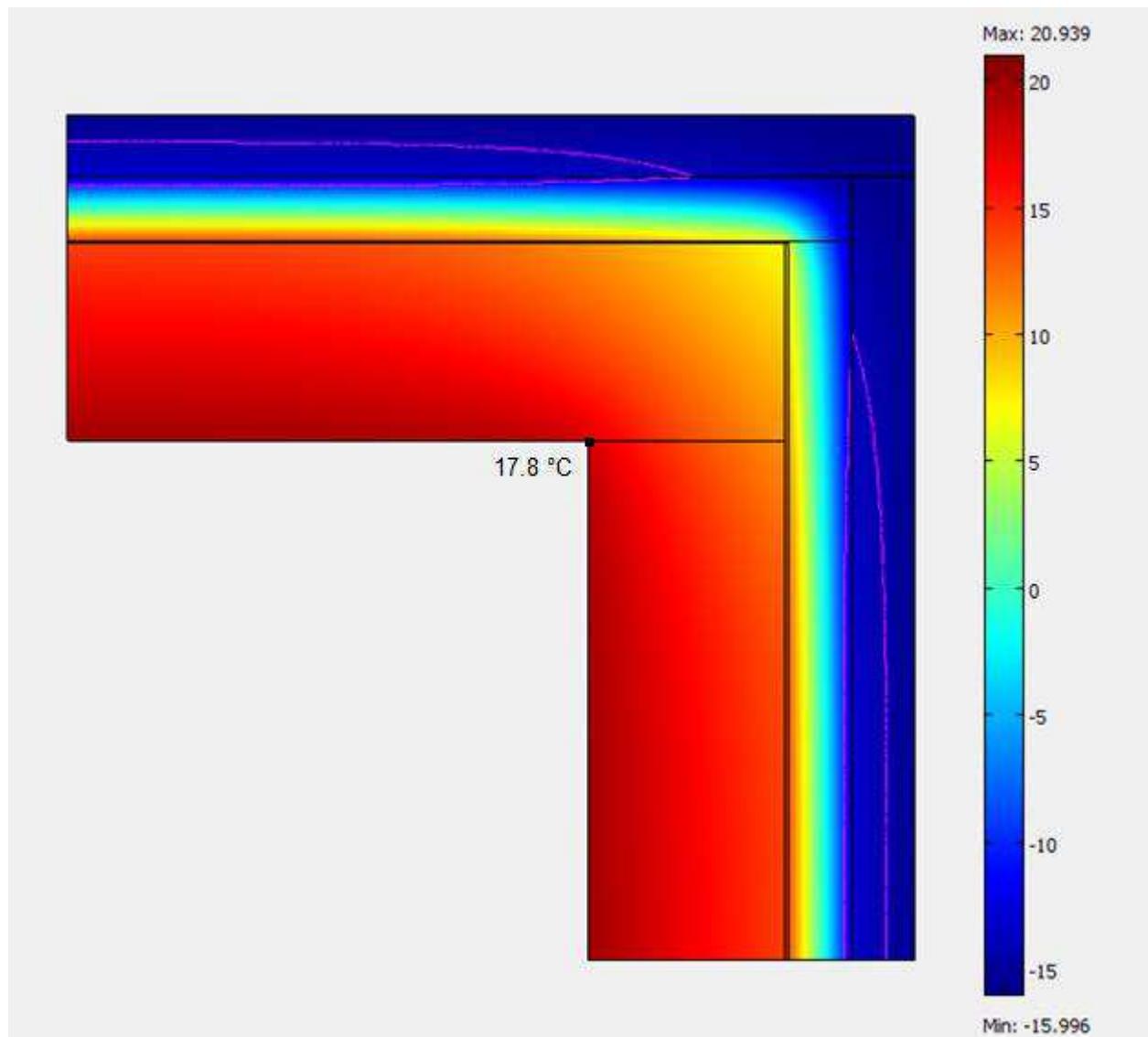


Рисунок 3.11 – Распределение температур. Угловое сопряжение стены выполнено из кирпичной кладки.

В ограждающей конструкции из кирпича влага равномерно распределяется на границе утеплителя и наружным слоем.

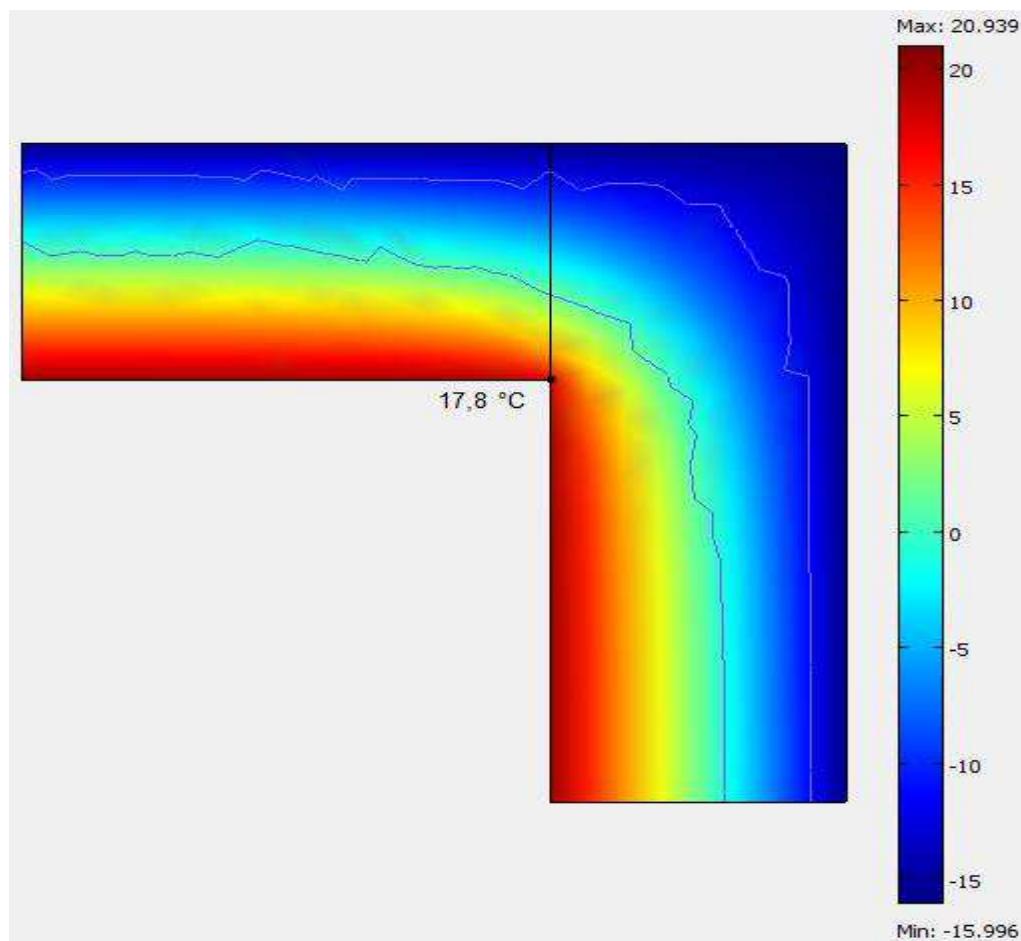


Рисунок 3.12 – Распределение температур. Угловое сопряжение стены выполненное из вермикулитобетона.

Согласно СП 50 «Тепловая защита зданий» для обеспечения санитарно-гигиенического требования к ограждающим конструкциям нормируемый температурный перепад для жилых зданий между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции не должен превышать 4 град. На рисунках 3.9-3.12 изображены точки с минимальными температурами внутренних поверхностей. Результаты расчета показывают, что данные конструкции соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям при расчете в условиях средней температуры наиболее холодного месяца.

3.3 Определение стоимости конструкций

В диссертационном исследовании для определения стоимости двух конструкций произведен локальный сметный расчет стоимости с использованием базисно-индексного метода.

Используемый метод составления сметной стоимости основан на сметных нормативных базах с пересчетом в текущие цены с помощью индексов пересчета.

В строительстве индексы пересчета сметной стоимости применяются к различным сметно-нормативным сборникам (ГЭСН, ФЕР, ТЕР и др.).

Приведение к текущему уровню цен производится путем перемножения элементов прямых затрат в базисном уровне цен на соответствующий индекс пересчета с последующим суммированием итогов.

В данной работе цены применялись согласно сметно-нормативным сборникам в базисном уровне, определяемом на основе действующих сметных норм и цен 2001 года. Для перевода в текущую стоимость использовался коэффициент на 1 квартал 2020 года.

На рисунке 3.13 представлена стоимость ограждающих конструкций представленная в виде диаграммы.

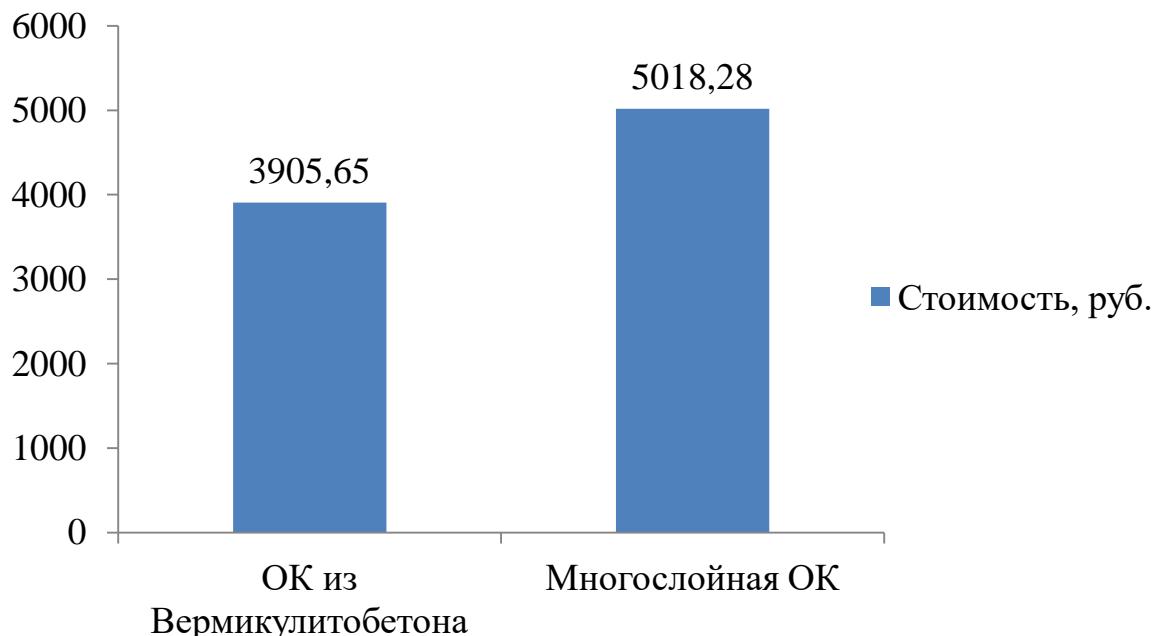


Рисунок 3.13 – Сметная стоимость конструкций

По результатам расчета сметная стоимость многослойной ограждающей конструкции из кирпича составила 5018,28 руб., стены выполненной из вермикулитобетона – 3905,65 руб. Разница стоимости составляет 22,4%.

Локальный сметный расчет представлен в приложении А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были рассмотрены конструктивные узлы ограждающих конструкций (узел стены, узел сопряжения плиты перекрытия и стен, угловое сопряжение стены).

Выявлено, что во всех случаях зоны увлажнения попадали в область отрицательных температур, что способствует разрушению материала из-за замерзания влаги в толще конструкции, это приводит к снижению долговечности материалов

Изучен опыт применения и методов исследования строительных конструкций с использованием вермикулита.

Исследована работа ограждающих конструкций на соответствие требований СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий по сопротивлению паропроницанию.

Представленные узлы для расчета соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям. А так же зависимость распределения влаги в конструкции от свойств стены, а именно от ее равномерности по всему сечению. По сравнению с многослойной стеной влага в конструкции из вермикулитобетона распределяется равномерно из-за отсутствия резких перепадов температур и сплошного равномерного сечения.

По итогам локального сметного расчета двух типов ограждающих конструкций, стена из вермикулитобетона оказалась дешевле, чем многослойная стена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рахманова Ирина Анатольевна, Саркисов Юрий Сергеевич, Верещагин Владимир Иванович Теплоизоляционные материалы на основе перлита и вермикулита // Вестник ТГАСУ. 2013. №2 (39).
2. Офий П. А., Пантиюшина Л. Н. Применение вермикулита в качестве утеплителя для ограждающий строительных конструкций // Ползуновский альманах №3, 2016, с. 4
- 3 . Ахтямов Р. Я. Вермикулит-сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов //Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – №. 1-2. – С. 58-64.
4. Ахтямов Р. Я. Вермикулит как основа для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов. Анализ сырьевой базы //Огнеупоры и техническая керамика. – 2007. – №. 11. – С. 47-51.
5. Казыева А. И., Сивкова В. И., Артюхова П. Н. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННАЯ ШТУКАТУРКА НА ОСНОВЕ ВСПУЧЕННОГО ВЕРМИКУЛИТА //«Энергия молодых–строительному комплексу»: Материалы научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых.–Братск: Изд-во БрГУ, 2017.–124 с. – 2017. – С. 55.
6. Лузин В. П. и др. Керамические строительные материалы с улучшенными теплоизоляционными свойствами //Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – №. 8.
7. Енджиевская И. Г., Василовская Н. Г., Слакова О. В. Составы для огнезащитных покрытий на основе вспученного вермикулита татарского месторождения //Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – №. 1.
8. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением N 1). – Введ. 01.07.2013. - НИИСФ РААСН.

9. Гагарин В. Г., Пастушков П. П. Количественная оценка энергоэффективности энергосберегающих мероприятий // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 7–9.
10. Гагарин В. Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий, диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М. : 2000.
11. А.В. Лыков. Теория теплопроводности // «Высшая школа» М. 1967. 599с.
12. Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar: Heat and mass transfer // McGraw-Hill Education, New York – 2015
13. Добросмыслов С.С, Пылаева М.М, Огорельцева Н.В, Перькова М.А.: Изменение теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций в условиях реального температурно-влажностного режима.
14. Малявина Е. Г. Теплопотери здания //М.: Авок-Пресс. – 2007.
15. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменениями № 1, 2). – Введ. 01.01.2013. - НИИСФ РААСН.
16. Об утверждении и введении в действие Методики определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации: постановление Госстроя России от 05.03.2004 № 15/1.
17. Протасевич А. М., Лешкевич В. В. Расчет температурного поля многослойных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями методом конечных элементов. – 2013.
18. ГОСТ 12865-67 Вермикулит вспученный
19. Василовская Н. Г. и др. Теоретические аспекты процесса вспучивания вермикулита Татарского месторождения //Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2012. – Т. 5. – №. 3.

20. Енджиевская И. Г. и др. Композиционный материал на основе вспученного вермикулита для огнезащитных покрытий //Фундаментальные исследования. – 2016. – Т. 1. – №. 2.
21. Хежев Т. А. и др. Теплоогнезащитные композиционные цементные растворы на основе вспученного вермикулита и вулканического пепла //Инженерный вестник Дона. – 2018. – №. 1 (48).
22. Шидловский Г. Л., Тихонов Ю. М. Огнезащитные композиты на основе вермикулита, перлита и волокнистых наполнителей //Управления рисками в техносфере. – 2015. – С. 41.
23. Енджиевская И. Г. и др. Влияние вспученного вермикулита на свойства огнезащитных покрытий //Строительство, дизайн, архитектура: проектные решения XXI века: Сборник материалов международного научного е-симпозиума. Россия, г. Москва, 27-28 декабря 2014 г. – 2014. – С. 36.
24. Везенцев А. И., Нурасыл Т. Е., Воловичева Н. А. ТЕКСТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСПУЧЕННОГО ВЕРМИКУЛITA ТАТАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ //«Innovations in Life Sciences». – С. 71.
25. Терехов Е. А. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ВСПУЧЕННОГО ВЕРМИКУЛITA. – 2014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 – Локальный сметный расчет стоимости ограждающей конструкции из кирпича.

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.	Стоимость единицы, руб.				Общая стоимость, руб.			
					Всего	В том числе			Всего	В том числе		
						Осн.3/п	Эк. Маш	З/п Мех		Осн.3/п	Эк. Маш	З/п Мех
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	ФЕР08-02-001-01	Кладка стен кирпичных наружных: простых при высоте этажа до 4 м	м3	0,25	1716,48	1185,85	520,13	169,72	429,12	296,46	130,03	42,43
2	ФССЦ-04.3.01.12-0001	Раствор кладочный, цементно-песчаный	м3	0,06	3188,16				191,29			

Продолжение таблицы 1

3	ФССЦ-06.1.01.05-0001	Кирпич керамический лицевой профильный, размер 250x120x65 мм, марка 75	1000 шт	0,095	15875,20					1508,14			
4	ФЕР12-01-013-03	Утепление покрытий плитами: из минеральной ваты или перлита на битумной мастике в один слой	100 м ²	0,001	19668,40	12045,55	1910,15	335,67	19,67	12,05	1,91	0,34	
5	ФССЦ-12.2.05.10-0002	Плиты минераловатные "Кавити Баттс" ROCKWOOL	м ³	0,0154	2614,75				40,40				
6	ФЕР08-02-001-01	Кладка керамического пустотного кирпича	м ³	0,12	1716,48	1185,85	520,13	169,72	205,98	142,30	62,42	20,37	

Окончание таблицы 1

7	ФССЦ-04.3.01.12-0001	Раствор кладочный, цементно-песчаный	м3	0,0288	3188,16				91,82			
8	ФССЦ-06.1.01.05-0001	Кирпич керамический лицевой профильный, размер 250x120x65 мм, марка 75	1000 шт	0,0456	15875,20				723,91			
Итого прямые затраты по смете в базисных ценах								3145,83	450,81	194,36	63,14	
Накладные расходы								626,77				
Сметная прибыль								409,30				
Итоги с учетом "Перевод в текущие цены 1 квартал 2020г. ОЗП=31,43, ЭМ=15,05, МАТ=6,56"												
Справочно, в базисных ценах:												
Материалы								2500,66				
Машины и механизмы								194,36				
ФОТ								513,95				
Накладные расходы								626,77				
Сметная прибыль								409,30				
НДС 20%								836,38				
ВСЕГО по смете								5018,28				

Таблица 2 – Локальный расчет стоимость конструкции из вермикулитобетона

№ п п	Обоснован ие	Наименование	Ед. изм . .	Кол.	Стоимость единицы, руб.				Общая стоимость, руб.			
					Всего	В том числе			Всего	В том числе		
						Осн.3/п	Эк. Маш	З/п Mex		Осн.3/ п	Эк. Маш	З/п Ме х
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	ФЕР06-06-001-05	Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 500 мм	100 м3	0.0025	226746.27	140665.59	47439.80	15197.98	566.87	351.66	118.60	38.00
2	Прайс	Вермикулитобетон 600 кг/м3	м3	0.255	7916.67				2018.75			
Итого прямые затраты по смете в базисных ценах									2858.62	351.66	118.60	38
Накладные расходы									409.14			
Сметная прибыль									253.28			
Итоги с учетом "Перевод в текущие цены 1 квартал 2020г. ОЗП=31,43, ЭМ=15,05, МАТ=6,56"												
Справочно, в базисных ценах:												
Материалы									2115.36			
Машины и механизмы									118.60			

Окончание таблицы 2

ФОТ	389.66			
Накладные расходы	409.14			
Сметная прибыль	253.28			
НДС 20%	649.61			
ВСЕГО по смете	3897.65			

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

« » 20 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Проектные решения с использованием материалов на основе вермикулита
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 Олег д.ц.н.т, канд.техн наук
подпись, дата звание, ученая степень

Е.М. Сергуничева
ициалы, фамилия

Выпускник Р.В. Откеев
подпись, дата

ициалы, фамилия

Рецензент К.М. Н.
подпись, дата звание, ученая степень

ициалы, фамилия

Красноярск 2020