

На правах рукописи



Сапарёв Михаил Евгеньевич

**Исследование теплового режима утепленных
ограждающих конструкций зданий и воздуховодов с
применением экранной тепловой изоляции**

Специальность 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент Ю. С. Вытчиков

Самара 2015

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Современное состояние вопросов в области исследования процессов теплопередачи в ограждающих конструкциях с экранной тепловой изоляцией.....	11
1.1 Обзор материалов теплового расчёта экранной изоляции.....	11
1.2 Обзор материалов экспериментального исследования эффективности экранной изоляции.....	24
1.3 Выводы по главе 1.....	28
Цели и задачи исследований.....	30
Глава 2 Математическое моделирование процессов теплообмена в ограждающих конструкциях с применением экранной изоляции	32
2.1 Математическое моделирование процесса теплопередачи в ограждающих конструкциях зданий и сооружений.....	32
2.2 Математическое моделирование процесса теплопередачи в ограждающих конструкциях утепленных воздуховодов.....	46
2.2.1 Математическое моделирование процесса стационарного теплообмена в ограждающих конструкциях коротких воздуховодов.....	47
2.2.2 Математическое моделирование процесса стационарного теплообмена в ограждающих конструкциях длинных воздуховодов.....	59
2.3 Выводы по главе 2.....	65
Глава 3 Исследование теплозащитных характеристик материалов экранной изоляции и ограждающих конструкций с ее применением.....	67
3.1 Методика проведения эксперимента.....	67
3.2 Оценка достоверности полученных данных.....	70
3.3 Исследование эффективной теплопроводности экранной тепловой изоляции с применением воздушных прослоек.....	71
3.4 Исследование эффективной теплопроводности теплоизоляционных керамических покрытий при совместном использовании воздушной прослойки.....	77
3.5 Экспериментальное исследование теплозащитных характеристик ограждающих конструкций с применением экранной изоляции.....	83
3.6 Выводы по главе 3.....	96
Глава 4 Техничко-экономическая оценка применения экранной изоляции в ограждающих конструкциях и ее практическое применение в строительстве.....	98
4.1 Практическое применение экранной тепловой изоляции в ограждающих конструкциях	98

4.2 Техничко-экономическая оценка применения экранной изоляции в ограждающих конструкциях	115
4.3 Выводы по главе 4.....	121
Общие выводы.....	122
Библиографический список.....	124
Приложения.....	136
Приложение А – Результаты теплотехнических испытаний ограждающих конструкций с применением экранной изоляции.....	137
Приложение Б – Акты и справки о внедрении.....	146
Приложение В – Расчет влажностного режима наружной стены, утепленной с применением экранной тепловой изоляции.....	150
Приложение Г – Исследование паропроницаемости вспененного полиэтилена	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В последние годы особое внимание в нашей стране уделяется вопросам энергосбережения. Необходимость в снижении потребления минерального сырья и ископаемого органического топлива прежде всего связано с сокращением их запасов и, как следствие, постоянным удорожанием. Поэтому осуществление мер по энерго- и ресурсосбережению является приоритетным направлением по снижению энергоёмкости российской экономики. В связи с этим был принят ряд нормативных документов, ужесточающих требования к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций зданий и сооружений, что позволяет снизить потребление тепловой энергии, необходимой для поддержания требуемых параметров микроклимата в помещениях.

Применение теплоизоляционных материалов напрямую и косвенно позволяет обеспечить надёжность эксплуатации строительных ограждений зданий, а также условия жизнедеятельности и выполнение требований энергосбережения.

Исследование вопросов энергосбережения в строительстве отражено в работах [7, 8, 108, 110]. Системы теплозащиты ограждающих конструкций энергоэффективных зданий подробно изложены в работах [4, 24, 33, 34, 38, 74]. Технологии по утеплению существующего жилого фонда России рассмотрены в [16, 29]. Чаще всего наиболее простой способ снижения тепловых потерь на отопление связан с повышением сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Но как показывает анализ указанных выше источников, такая мера по энергосбережению не всегда является экономически эффективной, поскольку увеличение сопротивления теплопередаче за счёт использования традиционных теплоизоляционных материалов может существенно увеличить себестоимость ограждающих конструкций. Такие затраты могут превысить экономию от увеличения теплозащитных свойств конструкции.

Достичь необходимого значения приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен возможно при использовании многослойных строительных

конструкций с использованием эффективных теплоизоляционных материалов, которые должны обладать высокими теплозащитными свойствами, экономичностью, применимостью для высоких и низких температур.

К таким теплоизоляционным материалам можно отнести материалы с высокой отражательной способностью. Преимущество экранной изоляции заключается в возможности эффективного использования такого природного теплоизолятора, как воздух. В строительных конструкциях, как правило, этот вид тепловой изоляции целесообразно использовать в виде пакета, представляемого собой совокупность материалов с малой поглощательной и большой отражательной способностями поверхностей экранов совместно с воздушными неветилируемыми воздушными прослойками между ними.

В настоящее время на отечественном рынке имеется большое количество подобных теплоизоляционных материалов. В первую очередь к ним можно отнести материалы из вспененного полиэтилена с экранной изоляцией из алюминиевой фольги. В виду того, что такие материалы в области строительства начали использоваться сравнительно недавно, то вполне закономерным является отсутствие объективной информации по их теплозащитным свойствам, а уже имеющаяся информация, которую, как правило, предоставляют производители данной продукции, носит весьма противоречивый характер. Учитывая возможность использования подобной теплоизоляции в совокупности с неветилируемой воздушной прослойкой, в настоящее время возникает необходимость в разработке инженерной методики теплотехнического расчёта строительных ограждающих конструкций с применением экранной тепловой изоляции.

Актуальность данного диссертационного исследования связана с изучением процессов теплообмена в ограждающих конструкциях зданий, сооружений и изолированных воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования воздуха с применением экранной тепловой изоляции, а также с разработкой инженерных методов расчета подобных конструкций.

Степень разработанности проблемы, изложенной в диссертации, является недостаточной в связи с появлением в последнее время экранной тепловой изоляции на основе материалов с низкой паропроницаемостью, таких как пенополиуретан, экструзионные пенополистиролы, вспененный полиэтилен.

Применение подобных материалов в строительстве сдерживается отсутствием экспериментальных данных по термическим сопротивлениям замкнутых экранированных воздушных прослоек, а также методики расчета строительных ограждающих конструкций, утепленных с применением экранной теплоизоляции.

Цель диссертационной работы заключается в разработке инженерных методов теплотехнического расчета ограждающих конструкций зданий, сооружений и воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования воздуха, утепленных с помощью экранной тепловой изоляции.

Задачи исследования:

- математическое моделирование процесса теплопередачи через строительные ограждающие конструкции, утепленные с помощью экранной тепловой изоляции;
- математическое моделирование процесса теплообмена в изолированных воздуховодах систем вентиляции и кондиционирования воздуха с применением экранной теплоизоляции;
- экспериментальное исследование теплопроводности вспененных полиэтиленов, защищенных алюминиевой фольгой, тонкостенных защитных покрытий;
- теоретическое и экспериментальное исследование теплозащитных характеристик замкнутых экранированных воздушных прослоек;
- разработка инженерной методики теплотехнического расчёта строительных ограждающих конструкций, а также коротких и длинных воздуховодов, утепленных с помощью экранной теплоизоляции;

- разработка строительных ограждающих конструкций и воздуховодов, утепленных с применением экранной теплоизоляции;
- оценка экономической эффективности способа теплозащиты наружной стены с применением экранной теплоизоляции.

Объектом исследования являются строительные ограждающие конструкции, утепленные с помощью экранной теплоизоляции.

Предметом исследования является изучение теплового режима строительных ограждающих конструкций, утепленных с применением экранной теплоизоляции в совокупности с неветилируемыми воздушными прослойками.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе все экспериментальные исследования выполнены в аккредитованной лаборатории теплотехнических испытаний СГАСУ. Определение термического сопротивления и коэффициента теплопроводности замкнутых экранированных горизонтальных воздушных прослоек при направлении теплового потока сверху-вниз осуществлялось с использованием измерителя теплопроводности ИТП-МГ 4 «250» согласно ГОСТ 7076-99. Исследование ограждающей конструкции, утепленной с применением экранной теплоизоляции, в климатической камере проводилось в соответствии с ГОСТ 26254-84. Экспериментальное исследование паропроницаемости материалов на основе вспененного полиэтилена проводилось в соответствии с ГОСТ 25898-83. Определение термического сопротивления замкнутых экранированных воздушных прослоек при различном направлении вектора теплового потока выполнялось на специально созданной установке. Натурные исследования ограждающих конструкций наружных стен выполнены в соответствии с ГОСТ 26629-85. Автоматизированная обработка полученных экспериментальных данных была осуществлена с применением программного пакета Microsoft Office Excel, построение двумерных температурных полей производилось с помощью специализированной программы THERM 6.3, предназначенной для решения двумерных задач теплопроводности и диффузии водяного пара в строительных ограждающих конструкциях здания. В качестве

теоретической базы для исследования использованы научные труды по теплопередаче и влагопереносу в ограждающих конструкциях, а также труды по энергосбережению в строительстве.

Достоверность научных положений и результатов исследования оценена с помощью современных математических методов обработки экспериментов и обуславливается удовлетворительным совпадением экспериментальных данных с данными, полученными расчётным путём. При постановке экспериментов использованы общепринятые методики, оборудование и приборы.

Научную новизну работы составляют:

- предлагаемый метод теплотехнического расчета строительных ограждающих конструкций, утепленных с применением экранной теплоизоляции;
- уточненная методика расчета теплотерь изолированными воздуховодами систем вентиляции и кондиционирования воздуха с применением экранной тепловой изоляции;
- экспериментальные методы исследования термического сопротивления замкнутых экранированных воздушных прослоек и тонкостенных защитных покрытий;
- результаты экспериментальных исследований термических сопротивлений замкнутых экранированных воздушных прослоек и вспененных полиэтиленов, защищенных алюминиевой фольгой;
- аналитическое решение задачи стационарного теплообмена в изолированных коротких воздуховодах с учетом влияния начального участка тепловой стабилизации на теплоотдачу при турбулентном режиме движения воздуха.

Теоретическая и практическая ценность работы заключается в том, что на основе обработки экспериментальных данных впервые получены значения термического сопротивления замкнутых экранированных воздушных прослоек при различных направлениях вектора теплового потока. На основе

математического моделирования и полученных экспериментальных данных по термическим сопротивлениям замкнутых воздушных прослоек разработан приближенный метод расчета теплопередачи через строительные ограждающие конструкции, которые рекомендуется использовать при проектировании зданий и сооружений. Также на основе теплотехнического расчета строительных ограждающих конструкций разработаны конструктивные решения по утеплению наружных стен и перекрытий с помощью экранной тепловой изоляции.

Предложенная методика инженерного расчета теплопотерь изолированными воздуховодами рекомендуется при проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

На основе математического моделирования процесса теплопередачи в длинных и коротких каналах разработаны конструктивные решения по утеплению воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования с применением экранной теплоизоляции.

Полученные значения теплопроводности материалов экранной теплоизоляции и теплоизоляционных керамических покрытий рекомендуется использовать при выполнении теплотехнических расчетов.

Апробация работы и публикации

Результаты исследований докладывались на научно-техническом совещании «Проектирование и строительство доступного и комфортного жилья с применением экологически чистого и энергоэффективного керамзитобетона» (11 сентября 2013 г., Самара), пятой международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» (20-22 ноября 2013 г., Москва), 69-й, 70-й и 71-й Всероссийских научно-технических конференции по итогам НИР (Самара, 2011, 2012, 2013 гг.), Тринадцатой и четырнадцатой Международных научно-практических конференциях «Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах» (Пенза, 2012, 2013 гг.), Третьем специализированном форуме «Девелопмент.

Строительство. Ресурсосбережение» в рамках программы «Энергосбережение в строительстве и ЖКХ» (Тольятти, 2014 г.).

По результатам выполненных исследований опубликовано 17 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ЭКРАННОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

1.1. Обзор исследований теплозащитных свойств и методов теплового расчета экранной теплоизоляции

По прогнозам специалистов мировое энергопотребление ежегодно будет возрастать на 3% и увеличение энергии за природных ресурсов окажется недостаточным для покрытия растущего энергопотребления. Проблема энергосбережения становится актуальной не только для России, но и для всего мира. Одной из главных причин повышенного расхода тепла на отопления и вентиляцию является низкий уровень теплозащиты ограждающих конструкций зданий.

Осуществление мер по энерго- и ресурсосбережению является приоритетным направлением по снижению энергоёмкости российской экономики, которая превышает в 3-4 раза удельную энергоёмкость экономики развитых стран Запада, а реальный удельный расход тепловой энергии на одного жителя превышает общеевропейские нормы в 2-3 раза.

Для решения проблем по энергосбережению в современном строительстве предусматривается использование теплоизоляционных материалов в многослойных ограждающих конструкциях. В настоящее время для утепления уже существующих и вновь возводимых зданий и сооружений широко применяются традиционные теплоизоляционные материалы, такие как минеральная вата и полимерные утеплители (пенополистирол, пенополиуретан).

Следует отметить, что увеличения сопротивления теплопередаче конструкции за счёт увеличения толщины эффективного утеплителя может привести к увеличению капитальных затрат на возведение строительных ограждений и оказаться экономически неэффективным шагом [31, 35].

Устройство теплоизоляции может достигать существенных материальных затрат, связанных с её производством и монтажом.

Повышенные требования по теплозащите зданий и сооружений должны рассматриваться с точки зрения охраны окружающей среды, а также рационального использования невозобновляемых энергоресурсов. Поэтому правильный выбор теплоизоляции для строительных конструкций является одним из важнейших факторов, определяющих их устойчивую и надёжную работу и долговечность.

Государственная программа «Энергосбережение в строительстве» предусматривает снижение тепловых потерь на отопление помещений в холодный период года, и удержанием холода, вырабатываемого установками по обеспечению микроклимата в тёплый период. Одним из вариантов решения данной задачи является усиление теплозащитных характеристик ограждающих конструкций, при котором возможно сохранение требуемого уровня сопротивления теплопередаче без перерасхода традиционных теплоизоляционных материалов. Эта мера осуществима только при использовании в строительстве высокоэффективной теплоизоляции, которая должна обладать высокими теплозащитными свойствами, экономичностью, применимостью для высоких и низких температур, а также должна быть безопасной для здоровья.

В нашей стране в связи с принятием Федерального закона № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении в отдельные законодательные акты Российской Федерации» в строительстве поставлена задача по снижению расхода тепла на отопление зданий, строящихся и реконструируемых не менее, чем на треть [81].

Поэтому одним из решений, позволяющих снизить тепловые потери через ограждающие конструкции, является повышение их теплозащитных свойств за счет применения современных эффективных теплоизоляционных материалов.

В качестве такой теплоизоляции предлагается использовать материалы с высокой отражательной способностью, преимущество которых заключается в возможности эффективного использования такого природного теплоизолятора, как воздух.

К такому виду тепловой изоляции можно отнести экранную изоляцию, которая обладает высокими теплозащитными характеристиками, имеет малый объемный вес, негигроскопична, применима для температур, при которых эксплуатируются ограждающие конструкции зданий.

На отечественном рынке строительных материалов широко представлено наличие подобных материалов. Увеличение номенклатурного ряда отражающей изоляции произошло не только из-за выпуска новых отечественных материалов, но и за счет прихода на рынок зарубежных производителей подобной продукции. В связи с этим наблюдается отсутствие объективной информации по теплозащитным свойствам таких материалов, а уже имеющаяся информация, которую, как правило, предоставляют производители данной продукции, носит весьма противоречивый характер. Поэтому в настоящее время возникает необходимость в подробном изучении свойств экранной изоляции, которое даст возможность наиболее правильного и эффективного ее применения в строительстве.

Как правило, экранную изоляцию в строительных конструкциях целесообразно использовать в виде пакета, представляющего собой совокупность материалов с малой поглощательной и большой отражательной способностями экранов совместно с невентилируемыми воздушными прослойками между ними. Однако широкое применение материалов, используемых в качестве экранной изоляции, в строительстве ограничено отсутствием подходящих для практического применения методов ее теплотехнического расчета.

Основные вопросы теории теплопроводности освещены в работах [1, 6, 41, 53, 70, 71, 111, 122]. В работах [6, 21, 22, 87, 99] рассмотрены различные методы решения задач теплопроводности.

Перенос теплоты согласно [48, 67, 69, 78, 121] через воздушную прослойку от одной поверхности к другой под действием разности температур осуществляется путем теплопроводности, конвекции и излучения. Ввиду того, что закономерности лучистого теплообмена, теплопроводности и конвекции сильно различаются, то решение задач существенно осложняется даже в случае, когда все три процесса протекают независимо друг от друга.

Исследованию процесса теплопередачи через газовые прослойки и определению их оптимальной толщины посвящено много работ как отечественных [3, 15, 50, 60, 61, 66, 75-77, 113, 117], так и зарубежных ученых [123-128, 51].

В случае теплообмена путем излучения, когда две плоскости расположены параллельно друг другу на небольшом расстоянии, количество тепла, проходящее между ними, определяется по формуле:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_0}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F, \quad (1.1)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты излучения поверхностей; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_1 и T_2 – температуры излучающих поверхностей; F – поверхность теплообмена.

К. Хенки [51] было введено понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности воздуха, и, в результате чего, появилась возможность вести расчеты теплопередачи через воздушные прослойки пользуясь формулами, подчиняющимися законам передачи тепла через твердые тела.

В работе [115] рассматривается целесообразность применения воздушных прослоек в строительных ограждениях здания. Для описания процесса теплопередачи через замкнутые воздушные прослойки в ограждающих конструкциях также используется понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_{\text{л}}\delta, \quad (1.2)$$

где λ_1 – теплопроводность воздуха; λ_2 – условный коэффициент передачи тепла за счет конвекции; $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, определяемый по формуле:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_0}} \frac{\left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 + \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_1 - t_2}, \quad (1.3)$$

t_1 и t_2 – температуры излучающих поверхностей, δ – толщина воздушной прослойки.

Основываясь на опытных данных Мюля и Рейера, Фокин К. Ф. [115] приводит значения величины коэффициентов $\lambda_1 + \lambda_2$ для вертикальных воздушных прослоек, учитывая направление теплового потока через них. Кроме того в работе отмечается нецелесообразность использования воздушных прослоек в строительных конструкциях толщиной более 5 см, а прослойки большей толщины рекомендуется делить на несколько.

Для уменьшения количества тепла, передаваемого путем излучения, автор рекомендует одну из поверхностей прослойки покрывать материалом с высокой отражательной способностью. Также отмечено, что покрытие второй поверхности подобными материалами практически не уменьшит теплопередачу.

Количество тепла, передаваемое путем теплопроводности, как это отмечено [56], при тепловой защите объектов с температурой менее 800 °С становится соизмеримо с количеством тепла, которое передается за счет излучения. В данном случае тепловой поток при суммарном теплообмене можно рассчитывать по следующей формуле:

$$q = \varepsilon_{np} C_0 \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_{i+1}}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_{\text{возд}} \varepsilon_k}{\delta_{\text{возд}}} [T_1 - T_{i+1}], \quad (1.4)$$

где $\delta_{\text{возд}}$ – толщина воздушной прослойки, $\lambda_{\text{возд}}$ – молекулярная теплопроводность воздуха, ε_k – коэффициент, учитывающий конвекцию.

Вследствие того, что на поверхностях прослойки при экранировании ее материалом с высокой отражательной способностью наблюдается существенный перепад температур, то следует учитывать изменения степени черноты экранов и молекулярной теплопроводности воздуха в зависимости от температуры. Тогда равенство (1.4) примет следующий вид:

$$q = \varepsilon_{np}(T) C_0 \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_{i+1}}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_{\text{возд}}(T) \varepsilon_k}{\delta_{\text{возд}}} [T_1 - T_{i+1}]. \quad (1.5)$$

В случаях экранирования прослойки, когда требуется учитывать теплоемкость экранов, тепловой поток определяется по следующей зависимости:

$$q = c_i \delta_i \rho_i \frac{dT_i}{d\tau} + \varepsilon_{np} C_0 \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_{i+1}}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_{\text{возд}} \varepsilon_k}{\delta_{\text{возд}}} [T_1 - T_{i+1}], \quad (1.6)$$

где c_i – удельная теплоемкость материала экрана;

δ_i – толщина экрана;

ρ_i – плотность материала, из которого изготовлен экран;

τ – время нагрева.

Для лучистой составляющей в процессе теплообмена, когда имеется система экранов, в литературе [9] для определения теплового потока приводится следующая зависимость:

$$q_{(1,2)nэ} = \varepsilon'_{np} C_0 \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1.7)$$

где

$$\frac{1}{\varepsilon'_{np}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\varepsilon'_{эi}} + \frac{1}{\varepsilon''_{эi}} - 1 \right).$$

При наличии системы экранов суммарное количество тепла, пройденное через нее, и температуру любого i – го экрана авторами работ [Л.11, 12 из Ковалевского] предложено определять по следующим формулам:

$$Q_{\Sigma} = \frac{F_m(t_0 - t_m)}{\sum_{i=0}^Z \frac{1}{\alpha_{(i+1)m}}};$$

$$t_i = \frac{t_0 \left(\frac{1}{\alpha_{\Sigma i}} \varphi_{(i+1)m} + \dots + \frac{1}{\alpha_{\Sigma Z}} \varphi_{(Z+1)m} \right)}{\sum_{i=0}^Z \frac{1}{\alpha_{(i+1)m}}} + \frac{t_m \left(\frac{1}{\alpha_{\Sigma 0}} \varphi_{1m} + \dots + \frac{1}{\alpha_{\Sigma(i-1)}} \varphi_{im} \right)}{\sum_{i=0}^Z \frac{1}{\alpha_{\Sigma i}}},$$

где F_0 и F_m – площади поверхностей источника тепла или теплоприемника;

t_0 и t_m – температуры поверхностей источника тепла и теплоприемника;

$\frac{1}{\alpha_{\Sigma i}}$ – суммарный коэффициент теплопередачи, который определяется как

сумма теплоотдачи α_{li} и теплопроводностью α_{ci} ;

Z – количество экранов;

$\varphi_{(i+1)m}$ – коэффициент облученности, равный F_m/F_{i+1} .

Исследование конвективной составляющей в процессе теплопереноса через замкнутую воздушную прослойку, разделенную листами стальфолевой изоляцией с дистанцией 2-5 мм при давлении P от 98 до 4600 кПа, описано в работе [80].

В рассматриваемом случае передача тепла осуществлялась путем теплопроводности и конвекции (λ_k), излучением (λ_l), а через материал экранов и дистанцирующих прокладок – путем теплопроводности материала (λ_m). Величина теплопроводности материала λ_m определялась экспериментальным путем. При известной мощности нагревателя и температурном перепаде в слое определялась эффективная теплопроводность:

$$\lambda_{эф} = \lambda_k + (\lambda_l + \lambda_m). \quad (1.8)$$

Суммарное значение величин λ_l и λ_m определялось в ходе эксперимента для каждого образца при рабочей разности температур Δt и атмосферном давлении в случае, когда $\lambda_l = \lambda_r$, где λ_r – коэффициент теплопроводности газа.

В литературе [47] предлагается коэффициент теплообмена при свободной конвекции уменьшать вдвое, т.к. при передаче теплоты с помощью конвекции от одной поверхности замкнутой воздушной прослойки к другой происходит преодоление сопротивления двух пограничных слоев воздуха, которые прилегают к этим поверхностям. Тогда тепловой поток Q , проходящий через прослойку можно выразить следующим образом:

$$Q = 0,5\alpha_k + \frac{\lambda_l}{\delta} + \alpha_l, \quad (1.9)$$

где α_k – коэффициент конвективного теплообмена;

δ – толщина прослойки;

λ – коэффициент теплопроводности воздуха;

λ_l – коэффициент лучистого теплообмена.

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде зависимости коэффициента конвекции ε_k от $Gr \cdot Pr$ для вертикальных и горизонтальных газовых прослоек.

В работе [78] рассматривается процесс передачи теплоты через замкнутые газовые прослойки, где также учитывается влияние естественной циркуляции среды в ограниченном пространстве. При этом учитывается взаимное расположение нагретых и холодных поверхностей, а также расстояние между ними.

Для упрощения расчетов сложный процесс теплообмена рассматривается как элементарное явление теплопроводности. При этом вводится понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности, которая определяется из выражения:

$$\lambda_{\varepsilon k} = \frac{Q\delta}{F\Delta t}. \quad (1.10)$$

Коэффициент конвекции ε_k равен отношению эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\varepsilon k}$ к коэффициенту теплопроводности среды λ . Поскольку циркуляция обусловлена разностью плотностей холодных и нагретых частиц и зависит от произведения Gr и Pr , то величина ε_k также является функцией того же аргумента, т.е.

$$\varepsilon_k = f(Gr \cdot Pr).$$

При определении численных значений Gr и Pr в качестве определяющего размера принимается толщина воздушной прослойки δ , а определяющая температура среды определялась как средняя температура:

$$t_{cp} = 0,5(t_1 + t_2), \quad (1.11)$$

где t_1 и t_2 – температуры нагретой и холодной стенок.

При $Gr \cdot Pr$ менее 1000 значение величины $\varepsilon_k = 1$. В этом случае теплоперенос через воздушную прослойку осуществляется только путем теплопроводности ограниченной среды и излучением.

При значениях $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^6$

$$\varepsilon_k = 0,105 (Gr \cdot Pr)^{0,3} . \quad (1.12)$$

Для приближенных расчетов ε_k при $Gr \cdot Pr > 10^3$ вместо формулы (1.12) М. А. Михеев рекомендует на основании экспериментальных данных использовать следующую зависимость

$$\varepsilon_k = 0,18 (Gr \cdot Pr)^{0,25} , \quad (1.13)$$

которую можно привести к виду

$$\varepsilon_k = A (\delta \cdot \Delta t)^{0,25} , \quad (1.14)$$

где

$$A = 0,18 \frac{(\beta \cdot g \cdot Pr)^{0,25}}{\nu^{0,5}} ,$$

где β – температурный коэффициент объёмного расширения;

g – ускорение свободного падения;

ν – коэффициент кинематической вязкости.

В работе также приведена графическая зависимость ε_k от $Gr \cdot Pr$, которая наглядно показывает результаты опытных данных и вышеприведенной расчетной обработки. Как видно из рис. 1.1, несмотря на условность обработки и выбора определяющих параметров, точки, полученные экспериментальным путем, для

плоских, цилиндрических и шаровых прослоек довольно хорошо укладываются на одну общую кривую.

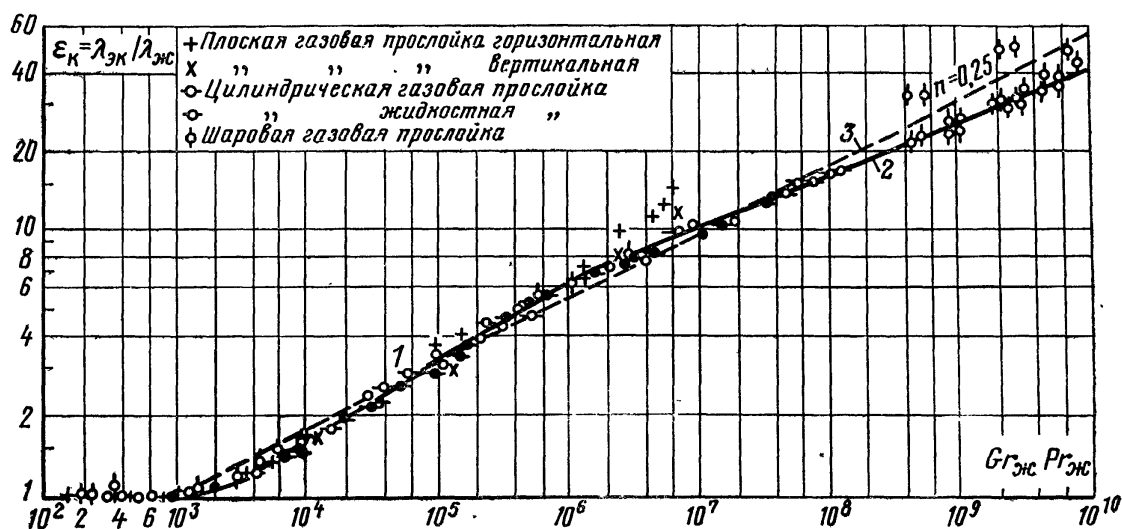


Рис. 1.1. Зависимость $\epsilon_k = f(GrPr)$ при естественной циркуляции в замкнутом пространстве

Богословский В. Н. в работе [10] также отмечает, что увеличение конвективной составляющей в процессе теплопередачи через замкнутые воздушные прослойки зависит в основном от ее толщины, и приводит примерные численные значения коэффициента конвективного теплообмена α_k в процентном выражении для следующих толщин прослоек: при $\delta=0,01\text{м}$ α_k составляет около 20%, при $\delta=0,05\text{м}$ α_k достигает значения 45%, а при дальнейшем увеличении толщины значение α_k снижается так, что при $\delta=0,1\text{м}$ оно составляет примерно 25%, при $\delta=0,2\text{м}$ – около 5%.

В работах [17, 120] указывает на необходимость армирования воздушной прослойки путем покрытия хотя бы одной из ее поверхностей материалом с высокой отражательной способностью или же установкой внутри прослойки диафрагмы из фольги. Прежде всего, это обусловливается тем, что теплопередача путем излучения преобладает над теплопередачей путем конвекции. Авторы отмечают, что с практической точки зрения следует производить армирование более теплой поверхности, где меньше вероятность появления конденсата, который способен ухудшить отражающие способности металла. Кроме того

приводится несколько вариантов практического применения замкнутых воздушных прослоек в строительных ограждающих конструкциях.

В. М. Ильинский в работе [47] отмечает, что применение с отражательной теплоизоляции с ограниченной долговечностью для повышения термического сопротивления замкнутых воздушных прослоек в строительных ограждениях будет обоснованным только в конструкциях сухих зданий. Автор не рекомендует использовать алюминиевую фольгу для армирования воздушных прослоек в конструкциях из камня и бетона, имеющих большую начальную влажность. Как и у многих других авторов, в работе указывается на максимальный эффект отражающей изоляции в случае применения ее в горизонтальных воздушных прослойках, когда тепловой поток направлен сверху вниз.

Следует отметить, что некоторые исследователи в работах [51, 113] в отличие от предыдущего, наоборот, подчеркивают высокие эксплуатационные свойства отражающей изоляции при использовании ее в строительных ограждающих конструкциях. Так, в работе [113] автор из положительных свойств подобной теплоизоляции выделяет постоянство отражательной способности алюминиевой фольги и термического сопротивления экранированной воздушной прослойки даже при неблагоприятных условиях.

Кроме того, высокие эксплуатационные свойства подобной тепловой изоляции подтверждены экспериментальными исследованиями, результаты которых приведены в работах [3, 60, 61]. Например, в [3] авторы указывают на надежную работу экранной изоляции в условиях вибрации, а также многократных увлажнений.

Из зарубежных работ, посвященных исследованию свойств многоэкранной изоляции, можно отметить [123-128]. Так, в работе [123] указывается, что простые невакуумные системы, которые состоят из нескольких экранов с прослойками воздуха между ними, наиболее применимы в условиях средних температур. Толщина такой изоляции в зависимости от условий составляла 3-5 см. Однако в

этой работе рассматривалась только радиационная составляющая в процессе теплопереноса через систему экранов. В статье указывается не только на трудности при определении температурных полей, но и на затруднения при практическом применении экранной изоляции. Вместе с тем следует избегать возникновения контактной теплопроводности в системе экранов вследствие соприкосновения ее отдельных слоев, что приводит к увеличению теплового потока.

При проектировании воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования необходимо учитывать теплообмен между транспортируемым воздухом и воздухом окружающей среды, что следует из работы Е. В. Стефанова [106]. Поддержание заданной температуры приточного воздуха, как это отмечается в работах [2, 5, 57, 106], является одним из основных требований, предъявляемых к системам обеспечения микроклимата. В связи с этим возникает необходимость в тепловой изоляции воздуховодов.

Оценить эффективность применения экранной тепловой изоляции при утеплении воздуховодов возможно путем определения величины изменения температуры транспортируемого воздуха на изолированном участке.

Решить поставленную задачу можно, рассмотрев процесс взаимосвязанного теплообмена между изолированным трубопроводом и движущимся в нем воздухом, который описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности в трубопроводе и уравнении энергии для движущегося потока воздуха, решение которой приведено в [25, 57, 100].

Для определения величины изменения температуры транспортируемого воздуха по длине изолированного воздуховода можно применить расчетные методики, изложенные в работах [112, 117]. Однако при расчете не учитывается переменность коэффициента теплоотдачи на начальном термическом участке воздуховода.

С физической точки зрения рассматриваемый воздуховод можно считать рекуперативным теплообменным аппаратом с постоянной температурой окружающего воздуха. Вопросам теоретического исследования процессов стационарного теплообмена в рекуператорах посвящены работы В. М. Кейса, А. Л. Лондона [55], Г. Д. Рабиновича [85], Ю. И. Данилова [32, 38], Ф. А. Вульмана, Н. С. Хорькова [23], А. С. Сукомела [107], Ю. С. Вытчикова [25].

1.2. Обзор материалов экспериментального исследования эффективности экранной изоляции

Экспериментальное исследование является основным источником получения достоверной информации по теплофизическим характеристикам экранной тепловой изоляции. С целью определения свойств подобной изоляции было проведено много экспериментальных исследований. Следует отметить, что для области строительства наибольший интерес представляют результаты исследований, проводимых в среде воздуха при атмосферных условиях.

Так, например, в работах [14, 40, 56, 60, 61, 65, 66, 82-84, 114, 118, 119] описаны экспериментальные методы исследования тепловых свойств экранной изоляции. Опыты, описанные в указанных работах, проводились при стационарном и нестационарном режимах.

В работе [64] для стационарного режима при изучении теплозащитных свойств отражающей изоляции применялся метод неограниченного цилиндрического слоя.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.2.

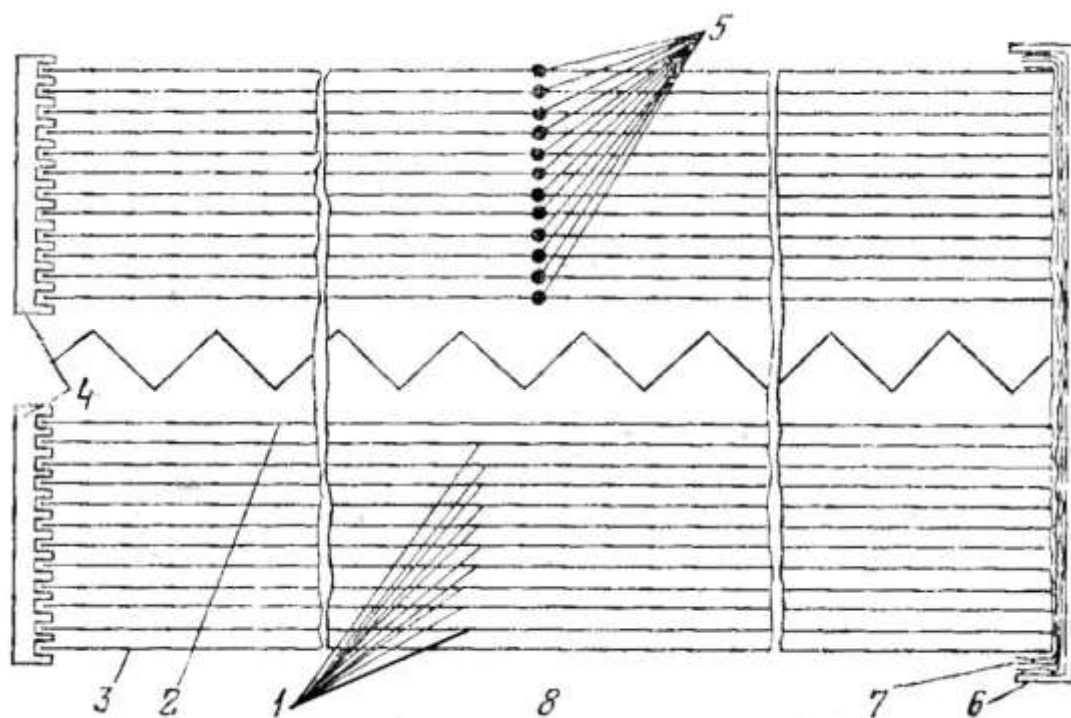


Рис. 1.2. Схематический разрез установки для исследования экранной изоляции методом неограниченного цилиндрического слоя

1 – цилиндрические экраны, 2,3 – внешняя и внутренняя поверхности установки; 4 – центрирующие гребенки; 5 – места установки рабочих спаев термопар; 6 – торцовая поверхность установки; 7 – стекловата; 8 – электрический нагреватель.

Установка состояла из двух концентрических и цилиндрических поверхностей длиной по 2 м и диаметром соответственно 150 и 304 мм. В пространстве между цилиндрами было расположено десять экранов из окисленного алюминия толщиной 0,9 мм. Расстояние между экранами составляло 6 мм.

Для предотвращения циркуляции воздуха между слоями зазоры между экранами в торцовой части уплотнялись стекловатой с последующей изоляцией алюминиевой гофрированной фольгой и образованием воздушной прослойки между листами фольги. Далее эта система укреплялась внутри торцовой поверхности установки с целью защиты системы от механических повреждений. Нагрев осуществлялся с помощью электрического нагревателя, мощность

которого составляла 1 кВт. Нагреватель помещался в центре системы по всей ее длине. Регулирование питания производилось регулятором типа РНО-250-2. Мощность электрического тока измерялась с помощью астатических приборов.

Медноконстантовыми термопарами с диаметром термоэлектродов 0,28 мм измерялось температурное поле системы экранов. Термопары выводились по изотермам на термопарную панель типа ПДП-ТП-72. Измерение температурного поля осуществлялось с помощью потенциометра постоянного тока типа КП-59 класса 0,05.

Эксперимент проводился при горизонтальном и вертикальном положениях установки на режимах, соответствующих температурам первого экрана 100, 132, 164, 212 и 246°С.

В результатах эксперимента представлены графики, на которых показано не только распределение температур по экранам, но и результаты, полученные расчетным путем. Отмечено, что расхождение составляло 6-10%.

Ввиду того, что при нестационарном режиме следует ожидать большого искажения температурного поля, чем в случае стационарного состояния на примере системы цилиндрических экранов то возникла необходимость экспериментального исследования нестационарного режима на системе экранов шаровой формы.

Разрез экспериментальной установки представлен на рис. 1.3.

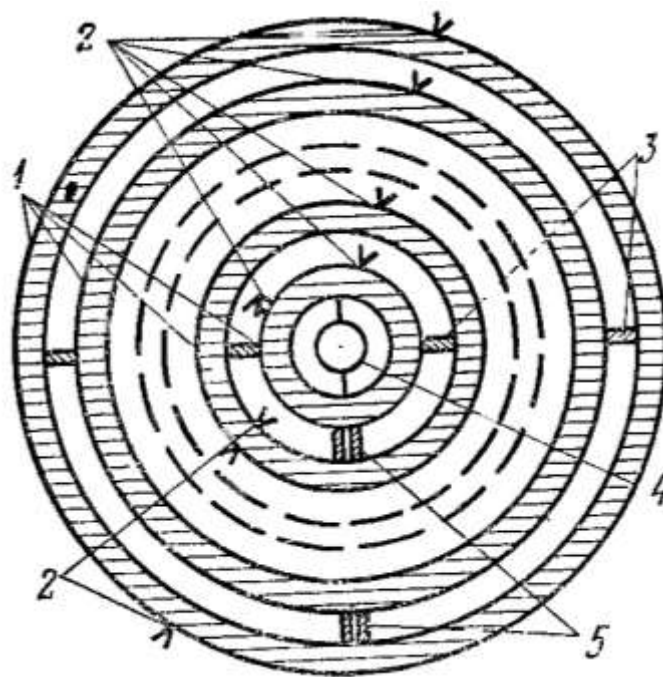


Рис. 1.3. Схематический разрез установки для исследования экранной для исследования нестационарного режима экранной изоляции.

1 – сферические экраны; 2 – места установки рабочих спаев термопар;
3 – асбестошиферные распорки; 4 – нагреватель; 5 – прокладки.

Установка состояла из алюминиевых экранов толщиной 10 мм, которые располагались друг от друга на одинаковом расстоянии. Наружный диаметр наружной и внешней поверхностей составлял соответственно 0,312 и 0,504 м. Опыты проводились при количестве экранов: 3; 4; 5; 7. Толщина воздушной прослойки между экранами при их разном количестве составляла 6 и 26 мм.

В результате проведения эксперимента были получены температурные поля, где учитывалось изменение степени черноты экранов, коэффициента теплопроводности воздуха и коэффициентов теплоотдачи с наружной поверхности.

Исследования с целью определения теплотехнических свойств стен с замкнутыми экранированными воздушными прослойками одним из первых провел Б. Ф. Васильев [19]. Данные исследования проводились в 1943 г. в опытном павильоне и в основном были ориентированы на оценку изменения

влажности материалов стен. В 1948 г. Б. Ф. Васильев проводил натурные исследования теплотехнических свойств вентилируемых и неventилируемых совмещенных покрытий [18]. В результате автором был сделан вывод о целесообразности экранирования алюминиевой фольгой внутренних поверхностей воздушной прослойки для увеличения ее термического сопротивления.

В работе [44] отмечено, что экранирование вентилируемых воздушных прослоек существенно повышает теплоустойчивость ограждающих конструкций.

У А. Н. Могилата [79] приведены некоторые результаты натурных исследований каркасных асбестоцементных панелей с экранами. Работы проводились в экспериментальном павильоне Полтавского инженерно-строительного института. В результате было установлено, что использование в конструкции панели экранов приводит к снижению максимальных температур на внутренней поверхности панелей примерно на 30%.

В работе [116] приведены результаты зимних исследований ограждающих конструкций с экранированными вентилируемыми воздушными прослойками. Экспериментальное исследование проводилось в г. Витебске для 4-х этажного дома, торцевая стена которого была выполнена из панелей с железобетонным экраном. В результате было установлено, что даже зимой экранированная вентилируемая воздушная прослойка способствует повышению теплозащитных свойств наружных ограждений.

1.3. Выводы по главе 1

1. Отражающая теплоизоляция весьма эффективна в температурных условиях холодного периода года, в которых эксплуатируются ограждающие конструкции зданий, сооружений и инженерных систем.

2. Возникает необходимость в разработке методики теплового расчета экранной изоляции, которая оказалась бы приемлемой для практического

применения. Имеющиеся методы теплового расчета экранной изоляции при стационарном теплопереносе, в основном, учитывает радиационную составляющую в процессе передачи тепла, а методики, которые учитывают все виды теплопередачи через замкнутую экранированную газовую прослойку, сопряжены с большим объемом вычислений. В нормативной литературе термическое сопротивление замкнутой экранированной воздушной прослойки оценивается весьма приближенно.

3. Высокие эксплуатационные свойства отражающей изоляции, как это указывается во многих работах, практически не изменяются в условиях высоких и низких температур, а также в условиях высокой влажности и вибрации. Одним из существующих недостатков отражающей изоляции является возможность наличия контакта между отдельными экранами, который может возникнуть при монтаже или деформации. Это, безусловно, приводит к изменению толщины воздушных прослоек и изменению температур на поверхности экранов, что впоследствии является причиной снижения эффективности работы изоляции.

4. Обзор экспериментальных исследований теплофизических свойств экранной изоляции в ограждающих конструкциях показывает, что в большинстве случаев для натурных наблюдений использовались экспериментальные павильоны. Подобные методы позволяют получить достоверную информацию об исследуемом объекте, но в свою очередь являются весьма затруднительными при реализации, поскольку подразумевают наличия большого количества высокоточных измерительных приборов, а также возведение экспериментальных павильонов.

5. В настоящее время достоверная информация по теплозащитным свойствам экранной изоляции практически отсутствует, а уже имеющаяся информация, которую, как правило, предоставляют сами производители, носит противоречивый характер.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наличие перечисленных фактов затрудняет эффективное применение материалов экранной тепловой изоляции в ограждающих конструкциях зданий, сооружений и инженерных систем (воздуховодов систем вентиляции) и, как следствие, препятствует осуществлению мер по энерго- и ресурсосбережению в строительстве.

В связи с этим разработка инженерных методов теплотехнического расчета ограждающих конструкций зданий, сооружений и воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования воздуха, утепленных с помощью экранной тепловой изоляции определяют **цель диссертационного исследования**.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- математическое моделирование процесса теплопередачи через строительные ограждающие конструкции, утепленные с помощью экранной тепловой изоляции;
- математическое моделирование процесса теплопередачи через ограждающие конструкции изолированных воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования воздуха с применением экранной теплоизоляции;
- экспериментальное исследование теплопроводности вспененных полиэтиленов, защищенных алюминиевой фольгой, тонкостенных защитных покрытий;
- теоретическое и экспериментальное исследование теплозащитных характеристик замкнутых экранированных воздушных прослоек;
- разработка инженерной методики теплотехнического расчёта строительных ограждающих конструкций, а также коротких и длинных воздуховодов, утепленных с помощью экранной теплоизоляции;

- разработка строительных ограждающих конструкций и воздуховодов, утепленных с применением экранной теплоизоляции;
- оценка экономической эффективности способа теплозащиты наружной стены с применением экранной теплоизоляции.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКРАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В настоящей главе описывается математическое моделирование процессов стационарного теплообмена в ограждающих конструкциях зданий, сооружений и воздуховодов, утепленных с использованием экранной теплоизоляции. Для решения задачи стационарного теплообмена в ограждающих конструкциях зданий и сооружений используется метод последовательных приближений.

В рамках задачи стационарного теплопереноса в ограждающих конструкциях воздуховодов систем приточной вентиляции рассматриваются решения для коротких (при соотношении $(l/d_{\text{экв}}) < 50$) и длинных каналов. Для решения задачи теплообмена в ограждающих конструкциях коротких каналов применен разработанный автором метод. С целью определения изменения температуры транспортируемого воздуха в длинных каналах на решение задачи теплопередачи через ограждающие конструкции был применен метод безразмерных характеристик, разработанный В. М. Кейсом и А. Л. Лондоном [55].

2.1. Математическое моделирование процесса стационарного теплообмена в утепленных ограждающих конструкциях с применением экранной теплоизоляции

При проектировании ограждающих конструкций, утепленных с помощью экранной изоляции, необходимо учитывать особенности процессов теплопереноса, которые происходят в таких ограждениях.

Как правило, экранную изоляцию в строительных конструкциях целесообразно использовать в виде пакета, представляющего собой совокупность материалов с малой поглощательной и большой отражательной способностями экранов с воздушными неветилируемыми прослойками между ними.

Теплопередача через воздушную прослойку от одной поверхности к другой согласно [115] происходит путём теплопроводности, конвекции и излучения. Теплопроводность воздушной прослойки, определение которой является одной из главных задач теплотехнического расчёта таких конструкций, величина непостоянная, зависящая от многих факторов, в том числе и от абсолютного значения температур на поверхностях.

Схематизация процесса теплообмена в наружной стене, утепленной с помощью экранной тепловой изоляции, представлена на рис. 2.1.

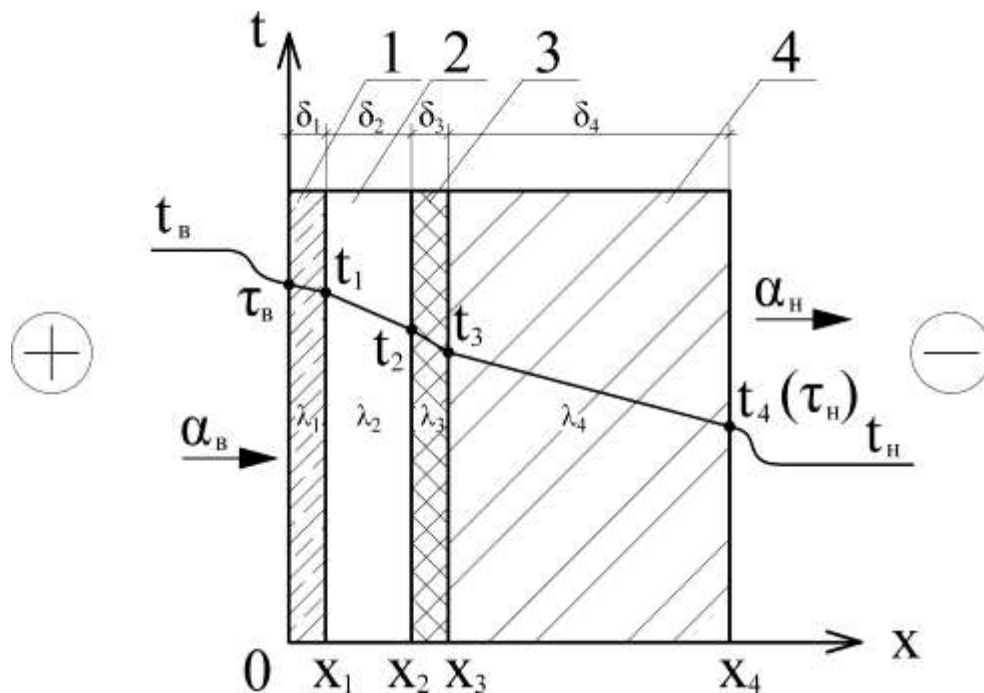


Рис. 2.1. Схематизация теплообмена в наружной стене

1 – гипсокартон (внутренний отделочный слой); 2 – воздушная неветилируемая прослойка; 3 – фольгированный вспененный материал; 4 – несущая часть наружной стены

Запишем постановку задачи стационарного теплообмена в наружной стене, утепленной с помощью экранной тепловой изоляции, при следующих допущениях:

- переносом теплоты в направлении осей y , z пренебрегаем, т.е. решение задачи рассматриваем в одномерной постановке для гледи наружной стены;

- коэффициенты теплопроводности вспененного полиэтилена и существующей части наружной стены принимаем линейно зависящими от температуры в виде выражений

$$\lambda = \lambda_0(1 + \varepsilon t), \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C} \quad (2.1)$$

где λ_0 – теплопроводность при $0^\circ C$;

ε – поправочный коэффициент.

Значения λ_0 и ε определяются по результатам обработки экспериментальных данных [112].

- Между утеплителем и наружной стеной принимается условие идеального контакта.

При указанных выше допущениях математическая постановка рассматриваемой задачи имеет вид:

$$-\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} = \alpha_{\varepsilon} [\tau_{\varepsilon} - t_{\varepsilon}]; x=0 \quad (2.2)$$

$$\frac{d^2 t_1}{dx^2} = 0; 0 \leq x \leq x_1 \quad (2.3)$$

$$\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} = \lambda_{\text{экв}} \frac{dt_2}{dx}; x = x_1 \quad (2.4)$$

$$t_1 = t_2 = \tau_1; x = x_1 \quad (2.5)$$

$$\frac{d^2 t_2}{dx^2} = 0; x_1 \leq x \leq x_2 \quad (2.6)$$

$$\lambda_2 \frac{dt_2}{dx} = \lambda_3 \frac{dt_3}{dx}; x = x_2 \quad (2.7)$$

$$t_2 = t_3 = \tau_2; x = x_2 \quad (2.8)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\lambda_3(t_3) \frac{dt_3}{dx} \right] = 0; x_2 \leq x \leq x_3 \quad (2.9)$$

$$\lambda_3 \frac{dt_3}{dx} = \lambda_4 \frac{dt_4}{dx}; x = x_3 \quad (2.10)$$

$$t_3 = t_4 = \tau_3; x = x_3 \quad (2.11)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\lambda_4(t_4) \frac{dt_4}{dx} \right] = 0; x_3 \leq x \leq x_4 \quad (2.12)$$

$$-\lambda_4 \frac{dt_4}{dx} = \alpha_n [\tau_n - t_n]; x = x_4 \quad (2.13)$$

где t_b, t_n – температура воздуха внутри помещения и снаружи соответственно; τ_b, τ_n – температура внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции; τ_1, τ_2, τ_3 – температуры на стыках слоев 1, 2, 3, 4 соответственно; t_1, t_2, t_3, t_4 – текущие температуры в слоях 1, 2, 3, 4 соответственно; x_1, x_2, x_3, x_4 – расстояния от внутренней поверхности до стыков слоев и наружной поверхности ограждающей конструкции; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – коэффициенты теплопроводности слоев ограждающей конструкции; α_b и α_n – коэффициенты теплообмена на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции соответственно.

Уравнения (2.9), (2.12) представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка относительно температуры теплоизоляционного и стенового материала соответственно ввиду зависимости коэффициента теплопроводности от температуры. Коэффициент теплопроводности воздушной прослойки $\lambda_{эkv}$ существенно зависит от перепада температур на ее поверхностях.

Преобразуем уравнения (2.9), (2.12) путем введения новой переменной

$$t^* = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^t \lambda(t) dt, \quad (2.14)$$

где λ_0 – значение коэффициента теплопроводности материала при 0°C .

В результате преобразований получим линейное дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^2 t_3^*}{dx^2} = 0; \quad x_2 \leq x \leq x_3 \quad (2.15)$$

$$\frac{d^2 t_4^*}{dx^2} = 0; \quad x_3 \leq x \leq x_4 \quad (2.16)$$

Проинтегрировав уравнения (2.15), (2.16), получим выражение для определения теплового потока

$$q = \overline{\lambda}_3 \frac{\tau_2 - \tau_3}{x_2 - x_3}; \quad (2.17)$$

$$q = \overline{\lambda}_4 \frac{\tau_3 - \tau_4}{x_3 - x_4}; \quad (2.18)$$

где

$$\overline{\lambda}_3 = \frac{1}{\tau_3 - \tau_2} \int_{\tau_2}^{\tau_3} \lambda_3(t) dt; \quad (2.19)$$

$$\overline{\lambda}_4 = \frac{1}{\tau_4 - \tau_3} \int_{\tau_3}^{\tau_4} \lambda_4(t) dt. \quad (2.20)$$

Величины $\overline{\lambda}_3$, $\overline{\lambda}_4$ представляют собой среднеинтегральные значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного и стенового материалов соответственно.

Для большинства строительных и теплоизоляционных материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры носит линейный характер и имеет следующий вид

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta_\lambda t). \quad (2.21)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности материала при 0 °С;

β_λ – коэффициент, определяемый опытным путем;

t – температура материала.

С учетом (2.21) выражения для определения $\overline{\lambda}_3$ и $\overline{\lambda}_4$ примут следующий вид

$$\overline{\lambda}_3 = \lambda_0 \left(1 + \beta_{\lambda_3} \frac{\tau_2 + \tau_3}{2} \right); \quad (2.22)$$

$$\overline{\lambda}_4 = \lambda_0 \left(1 + \beta_{\lambda_4} \frac{\tau_3 + \tau_4}{2} \right). \quad (2.23)$$

Температура на расстоянии x от внутренней поверхности слоя наружной стены определяется по формулам

$$t_3 = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta_{\lambda_3}} + \tau_2 \right)^2 - \frac{2qx}{\lambda_0 \beta_{\lambda_3}}} - \frac{1}{\beta_{\lambda_3}}; \quad (2.24)$$

$$t_4 = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta_{\lambda_4}} + \tau_3 \right)^2 - \frac{2qx}{\lambda_0 \beta_{\lambda_4}}} - \frac{1}{\beta_{\lambda_4}}. \quad (2.25)$$

Для определения удельных потерь теплоты через ограждающую конструкцию запишем следующие уравнения

$$q = \alpha_\epsilon (t_\epsilon - \tau_\epsilon), \quad (2.26)$$

$$q = \frac{\tau_\epsilon - \tau_1}{R_1}, \quad (2.27)$$

$$q = \frac{\tau_1 - \tau_2}{R_{\epsilon n}}, \quad (2.28)$$

$$q = \frac{\tau_2 - \tau_3}{R_3}, \quad (2.29)$$

$$q = \frac{\tau_3 - \tau_n}{R_4}, \quad (2.30)$$

$$q = \alpha_n(t_n - \tau_n), \quad (2.31)$$

где

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}, R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}, R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3}, R_4 = \frac{\delta_4}{\lambda_4}.$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ – толщины гипсокартона, воздушной прослойки, фольгированного вспененного материала и несущей части наружной стены соответственно;

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности гипсокартона и воздушной прослойки соответственно.

Среднеинтегральный коэффициент теплопроводности $\overline{\lambda_3}$ зависит от температуры вспененного фольгированного полиэтилена t_3 :

$$\overline{\lambda_3} = f(t_3).$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха определяется согласно [48] по формуле

$$\lambda_2 = \lambda_m \varepsilon_k + \alpha_l \delta_2, \quad (2.32)$$

где λ_m – значение коэффициента теплопроводности воздуха, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$; ε_k – поправочный коэффициент, учитывающий влияние естественной конвекции; α_l – коэффициент теплоотдачи излучением, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$.

Коэффициент ε_k в свою очередь зависит от разности температур на поверхностях воздушной прослойки

$$\varepsilon_k = f(\tau_1 - \tau_2).$$

Значение коэффициента ε_k можно определить, используя уравнение, полученное М. А. Михеевым при $10^3 < GrPr < 10^6$ [78]:

$$\varepsilon_k = 0,105 \left[\frac{g \delta^3 \left(\frac{1}{0,5(\tau_1 + \tau_2) + 273} \right) (\tau_1 - \tau_2)}{\nu^2} Pr \right]^{0.3}, \quad (2.33)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

δ – определяющий размер воздушной прослойки, м;

Pr – критерий Прандтля.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется из следующего выражения

$$\alpha_l = \frac{C_o \left[\left(\frac{\tau_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\tau_2 + 273}{100} \right)^4 \right]}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) (\tau_1 - \tau_2)}, \quad (2.34)$$

где $C_o = 5,67 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$ – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степень черноты внутренних поверхностей прослойки.

Для того, чтобы получить уравнение теплопередачи через рассматриваемую ограждающую конструкцию, необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений (2.26) – (2.31), исключив неизвестные температуры на внутренней и наружной поверхностях и на стыках слоев. Точное решение данной системы не представляется возможным. Поэтому предлагается приближенный итерационный метод, суть которого заключается в следующем:

- в качестве первого приближения принимаются коэффициенты теплопроводности всех материалов, входящих в состав конструкции, при

температуре 20 °С согласно [37] и выписываются значения из нормативной литературы [104];

- термическое сопротивление воздушной прослойки предварительно определяется согласно [104].

В результате получаем уравнение теплопередачи

$$q = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0}, \quad (2.35)$$

где

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (2.36)$$

$\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ - коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей рассматриваемой конструкции соответственно, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

R_i - термическое сопротивление i -го слоя конструкции, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, определяется по формуле

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (2.37)$$

δ_i - толщина i -го слоя конструкции, м

λ_i - теплопроводность i -го слоя конструкции, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Вычислив значение удельного теплового потока q , последовательно определяются температуры на внутренней и наружной поверхностях и на стыках слоев $\tau_{\text{в}}$, τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 , $\tau_{\text{н}}$.

Температуры на стыках слоев определяется по формуле

$$\tau_i = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_{i=1} R_i \right), \quad ^\circ\text{C} \quad (2.38)$$

где τ_i - температура на поверхности i -го слоя, $^\circ\text{C}$;

$\sum_{i=1} R$ – сумма термических сопротивлений $i-1$ слоёв конструкции до рассматриваемого сечения, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) / \text{Вт}$.

Далее определяются среднеинтегральные значения коэффициентов теплопроводности теплоизоляционного и стенового материалов рассматриваемой конструкции и эквивалентный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки $\lambda_{\text{экв}}$. Уточняется значение сопротивления теплопередаче R_0 и величина удельного теплового потока q . Расчет повторяется до достижения необходимой точности.

Данная методика позволяет учесть влияние направления теплового потока, отражательные способности поверхностей материалов и значения температур ограничивающих поверхностей на термическое сопротивление воздушной прослойки.

В качестве примера рассмотрим теплотехнический расчёт конструкции сэндвич-панели, представленной на рис. 2.2.

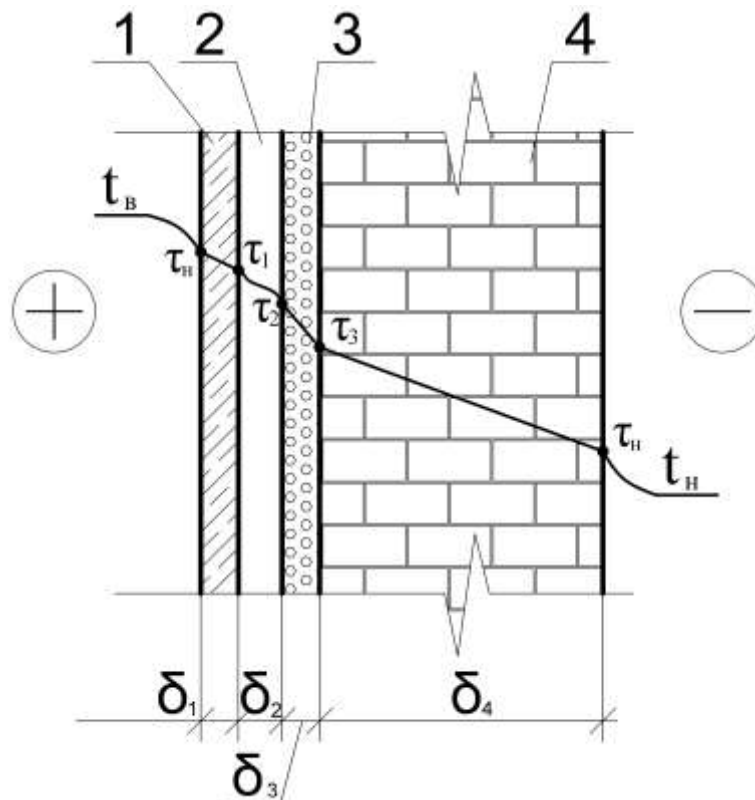


Рис. 2.2. Конструкция сэндвич-панели с экранной изоляцией

1 – гипсокартонный лист: $\delta_1 = 0,02 \text{ м}$, $\lambda_1 = 0,34 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;

2 – воздушная прослойка: $\delta_2 = 0,015 \text{ м}$;

3 – пенофол: $\delta_3 = 0,01 \text{ м}$, $\lambda_3 = 0,033 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;

4 – кладка из силикатного кирпича: $\delta_4 = 0,02 \text{ м}$, $\lambda_4 = 0,76 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Примем, что температура наружного воздуха t_n составляет -30 °C , а температура внутреннего воздуха $t_e = 20 \text{ °C}$.

1. В первом приближении по [104] примем значения термических сопротивлений для экранированных воздушных прослоек R_2 и R_4 равными $0,28$ и $0,3 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$.

2. Определим сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции по формуле (2.36)

$$R_o = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,34} + 0,28 + \frac{0,01}{0,033} + \frac{0,51}{0,76} + \frac{1}{23} = 1,47, \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

3. По формуле (2.38) определим температуру на стыке слоев:

$$\tau_s = 20 - \frac{20 + 30}{1,47} \cdot \frac{1}{8,7} = 16,09 \text{ °C};$$

$$\tau_1 = 20 - \frac{20 + 30}{1,47} \cdot \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,34} \right) = 14,09 \text{ °C};$$

$$\tau_2 = 20 - \frac{20 + 30}{1,47} \cdot \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,34} + 0,28 \right) = 4,57 \text{ °C};$$

$$\tau_3 = 20 - \frac{20 + 30}{1,47} \cdot \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,34} + 0,28 + \frac{0,01}{0,033} \right) = -5,74 \text{ °C};$$

$$\tau_n = 20 - \frac{20 + 30}{1,47} \cdot \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,34} + 0,28 + \frac{0,01}{0,033} + \frac{0,51}{0,76} \right) = -28,57 \text{ °C}.$$

4. Определяем значение эквивалентного коэффициента теплопроводности воздушной прослойки по формуле (2.32), предварительно определив значения всех величин, входящих в эту формулу:

$$\lambda = 0,024 Bm / (м \cdot ^\circ C);$$

$$v_1 = 1,36 \cdot 10^{-5} м^2 / с;$$

$$Pr = 0,71;$$

$$\varepsilon_\kappa = 0,105 \left(\frac{g \delta^3 \left(\frac{1}{0,5(\tau_1 + \tau_2) + 273} \right) (\tau_1 + \tau_2)}{v^2} Pr \right)^{0,3} =$$

$$= 0,105 \left(\frac{\frac{1}{0,5(14,09 + 4,57) + 273} (14,09 + 4,57)}{1,36 \cdot 10^{-5}} 0,71 \right)^{0,3} = 1,29;$$

$$\alpha_\lambda = \frac{5,67 \left[\left(\frac{14,09 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{4,57 + 273}{100} \right)^4 \right]}{\left(\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,04} - 1 \right) (14,09 - 4,57)} = 0,202 \frac{Bm}{м^2 \cdot ^\circ C};$$

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,024 \cdot 1,29 + 0,202 \cdot 0,015 = 0,034 \frac{Bm}{м \cdot ^\circ C};$$

5. С учетом $\lambda_{\text{экв}}$ рассчитываем сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции по формуле (2.36)

$$R_o = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,34} + \frac{0,015}{0,034} + \frac{0,01}{0,033} + \frac{0,51}{0,76} + \frac{1}{23} = 1,63, \frac{м^2 \cdot ^\circ C}{Bm}$$

Полученное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции отличается от первоначального его значения, поэтому необходимо производить расчет с п.2 по п.5 до тех пор, пока вновь полученные величины $\lambda_{\text{экв}}$ не достигнут заданной точности и не перестанут отличаться от значений, полученных в предшествующем приближении. В данном примере было использовано дополнительно два подобных приближения, в результате чего получено окончательное значение коэффициента теплопроводности воздушной прослойки в рассматриваемой конструкции:

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,037 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

На рис. 2.3 представлена зависимость термического сопротивления воздушной прослойки от ее толщины, полученная в результате расчета по изложенной выше методике, и зависимость термического сопротивления воздушной прослойки от ее толщины, полученная по данным [104].

Для проверки изложенной методики расчёта был проведён эксперимент с использованием климатической камеры (см. главу 3).

В главе 3 приведены формулы для определения значений термических сопротивлений замкнутых экранированных воздушных прослоек при различных направлениях теплового потока через них.

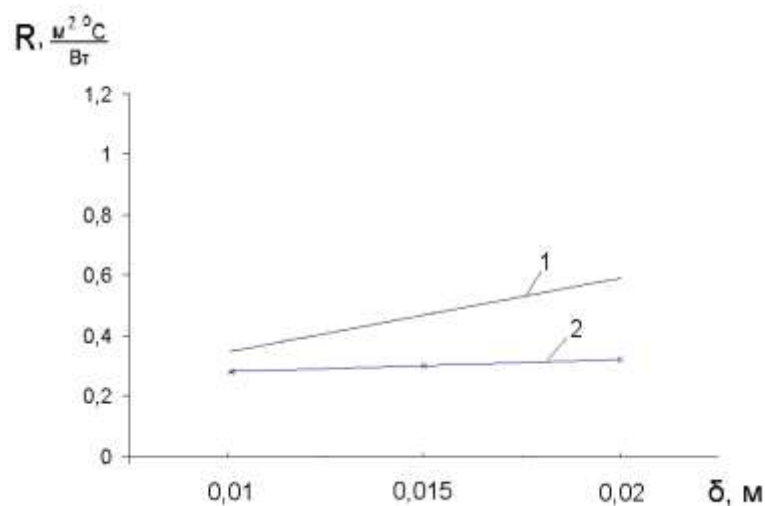


Рис. 2.3. Зависимость термического сопротивления воздушной прослойки от её толщины

1 — расчётные данные автора; 2 — данные [104]

В целях упрощения подбора толщины воздушной прослойки для ограждающих конструкций наружных стен предлагается использовать номограмму, представленную на рис. 2.4, позволяющую определить требуемую толщину прослойки при расположении её с внутренней поверхности ограждения.

Для того, чтобы воспользоваться номограммой, в качестве исходных данных необходимо принять термическое сопротивление неутепленной ограждающей конструкции $R_{ст}$, $(м^2 \cdot ^\circ C) / Вт$, значение коэффициента теплотехнической однородности r , и следовать описанному ниже алгоритму подбора толщины воздушной прослойки.

1. Согласно [104] определить нормируемое значение сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_0^{норм}$, $(м^2 \cdot ^\circ C) / Вт$.

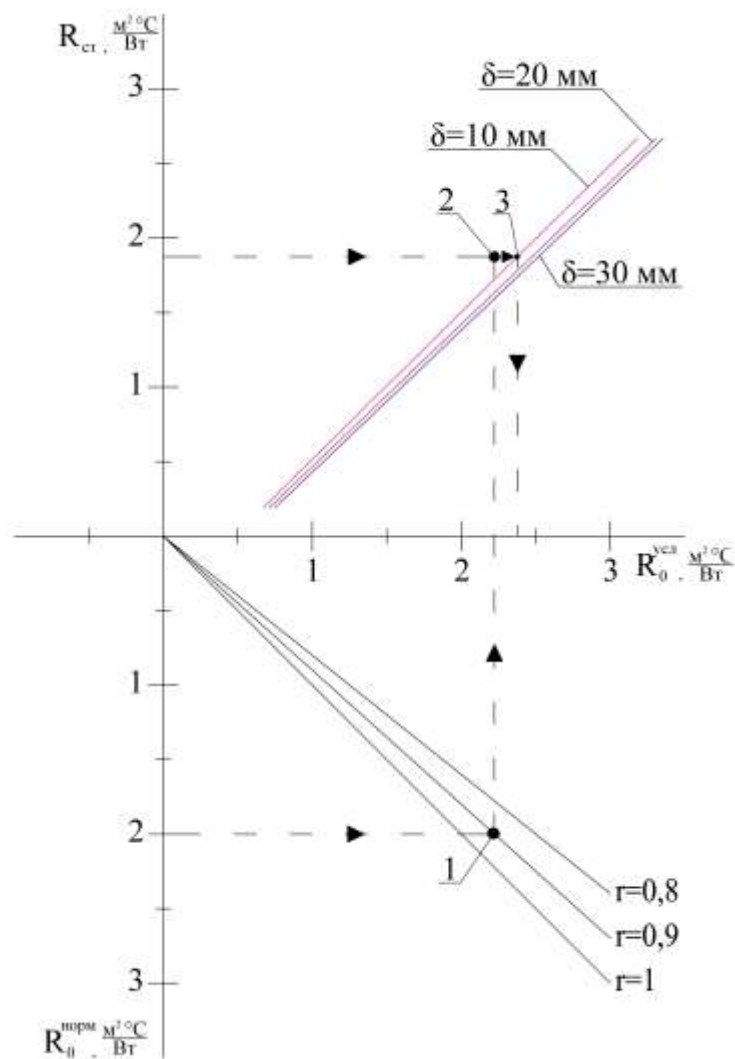


Рис. 2.4. Номограмма для определения толщины воздушной прослойки

2. По значению $R_0^{норм}$ и величине r графическим путем определяем величину абсциссы точки пересечения (точка 1). На оси ординат откладываем

значение термического сопротивление неутепленной стены $R_{ст}$ и проводим горизонтальную линию до пересечения с вертикальной линией, проведенной вверх из точки 1.

3. Из точки 2 проводим горизонтальную линию до пересечения наклонной прямой, характеризующую зависимость между термическим сопротивлением неутепленной стены и сопротивлением теплопередаче $R_0^{усл}$ глади, утепленной наружной стены при определении толщины воздушной прослойки.

2.2 Математическое моделирование процесса теплопередачи в ограждающих конструкциях утепленных воздуховодов

При проектировании систем вентиляции с целью поддержания постоянства температуры приточного воздуха возникает необходимость в теплоизоляции воздуховодов, что следует из анализа работ [11, 12, 52]. В системах кондиционирования воздуха, особенно в теплый период года, необходимо уменьшить нагрев приточного воздуха.

Оценить эффективность применения экранной теплоизоляции при утеплении воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования возможно на основании данных теплотехнического расчета конструкций воздуховодов с применением указанных выше материалов. Следует отметить, что в ходе расчета необходимо определить не только теплозащитные характеристики рассматриваемых конструкций, но и найти величину изменения температуры транспортируемого воздуха на изолируемом участке воздуховода.

Решить поставленную задачу можно, рассмотрев процесс взаимосвязанного теплообмена между изолированным трубопроводом и движущимся в нем воздухом, который описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности в трубопроводе и уравнении энергии для движущегося потока воздуха, решение которой приведено в [25,

85, 100]. С физической точки зрения рассматриваемый воздуховод можно считать рекуперативным теплообменным аппаратом с постоянной температурой окружающего воздуха.

2.2.1 Математическое моделирование процесса стационарного теплообмена в ограждающих конструкциях коротких воздуховодов

Используемые в настоящее время воздуховоды, имеющие отношение $(l/d_{\text{экв}}) < 50$, относятся к коротким каналам, в которых существенное влияние оказывает начальный участок на значение коэффициента теплоотдачи. В коротких каналах значение местных коэффициентов теплоотдачи значительно выше по сравнению со значениями тех же коэффициентов для стабилизированного теплообмена [107]. В связи с этим возникает необходимость в разработке инженерной методики, учитывающей влияние переменности теплоотдачи на теплотери изолированного воздуховода.

Схематизация процесса стационарного теплообмена в изолированном воздуховоде с помощью экранной тепловой изоляции представлена на рис. 2.5.

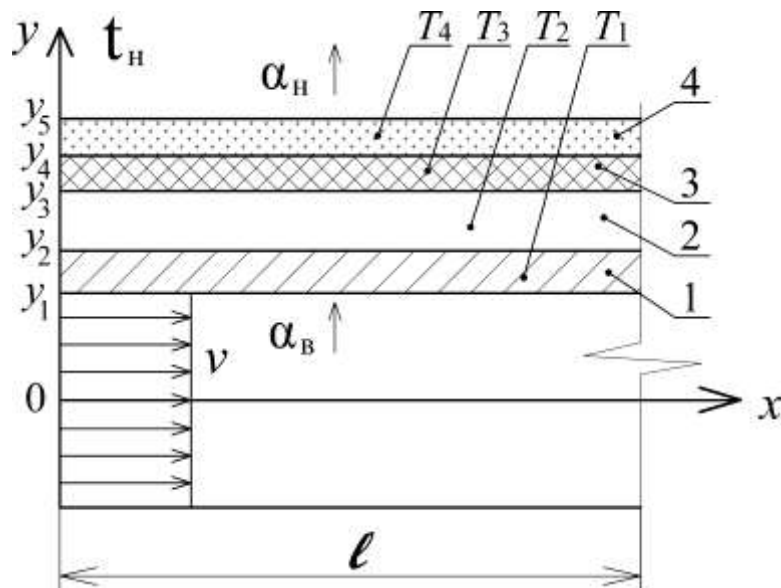


Рис. 2.5. Схематизация процесса стационарного теплообмена в изолированном воздуховоде с помощью экранной тепловой изоляции

1 – стенка воздуховода; 2 – воздушная прослойка; 3 – фольгированный вспененный полиэтилен; 4 – защитный короб

Решение рассматриваемой задачи стационарного теплообмена выполним при следующих допущениях:

- передачей теплоты путем теплопроводности в направлении осей x и z пренебрегаем;
- режим течения воздуха в воздуховоде считаем турбулентным.

При указанных выше допущениях математическая постановка задачи примет следующий вид:

$$r \frac{d\Theta}{dx} + \alpha_1(\Theta - T_1) = 0; y = y_1; 0 \leq x \leq l \quad (2.22)$$

$$\frac{d^2 T_1}{dy^2} = 0; y_1 \leq y \leq y_2; 0 \leq x \leq l \quad (2.23)$$

$$-\lambda_1 \frac{dT_1}{dy} = -\lambda_2 \frac{dT_2}{dy}; y = y_2; 0 \leq x \leq l \quad (2.24)$$

$$T_1 = T_2; y = y_2; 0 \leq x \leq l \quad (2.25)$$

$$\frac{d^2 T_2}{dy^2} = 0; y_2 \leq y \leq y_3; 0 \leq x \leq l \quad (2.26)$$

$$-\lambda_2 \frac{dT_2}{dy} = -\lambda_3 \frac{dT_3}{dy}; y = y_3; 0 \leq x \leq l \quad (2.27)$$

$$T_2 = T_3; y = y_3; 0 \leq x \leq l \quad (2.28)$$

$$\frac{d}{dy} \left[\lambda_3(T_3) \frac{dT_3}{dy} \right] = 0; y_3 \leq y \leq y_4; 0 \leq x \leq l \quad (2.29)$$

$$-\lambda_3 \frac{dT_3}{dy} = -\lambda_4 \frac{dT_4}{dy}; y = y_4; 0 \leq x \leq l \quad (2.30)$$

$$T_3 = T_4; y = y_4; 0 \leq x \leq l \quad (2.31)$$

$$-\lambda_4 \frac{dT_4}{dy} = \alpha_n (T_4 - t_n); y=y_5; 0 \leq x \leq l \quad (2.32)$$

где

$$r = \frac{c_p \cdot G_\phi}{U},$$

c_p – теплоемкость воздуха;

G_ϕ – расход воздуха;

U – смоченный периметр

α_1 – значение местного коэффициента теплоотдачи;

α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности изолированного воздуховода;

y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 – расстояния от оси до стыков между слоями, а также до внутренней и наружной поверхностей изолированного воздуховода;

T_1, T_2, T_3, T_4 – температуры в слоях рассматриваемой конструкции;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – коэффициенты теплопроводности слоев конструкции;

t_n – температура воздуха окружающей среды .

Пренебрегая термическим сопротивлением металлического воздуховода и защитного короба, а также считая коэффициент теплопроводности экранной изоляции постоянным, получим упрощенную математическую постановку рассматриваемой задачи.

$$r \frac{d\Theta}{dx} + \alpha_1 (\Theta - T_1) = 0; y=y_1; 0 \leq x \leq l \quad (2.33)$$

$$\alpha_1 (\Theta - T_1) + k(t_n - T_1) = 0; y=y_5; 0 \leq x \leq l \quad (2.34)$$

$$\Theta \big|_{x=0} = \Theta_0; 0 \leq y \leq y_1 \quad (2.35)$$

где

$$k = \frac{1}{\frac{\delta_2}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n}}; \quad (2.36)$$

Для определения значения местного коэффициента теплоотдачи используем критериальное уравнение, полученное А. С. Сукомелом и др. [107]

$$Nu = 0,022 Re^{0.8} Pr^{0.43} \varepsilon_l, \quad (2.37)$$

где ε_l – коэффициент, учитывающий изменение коэффициентов теплоотдачи на начальном участке воздуховода при $\frac{x}{d_{\text{экв}}} < 15$, определяется по формуле

$$\varepsilon_l = 1,38 \left(\frac{x}{d_{\text{экв}}} \right)^{-0,12}. \quad (2.38)$$

Из уравнения (2.34) выразим температуру T_1 и подставим ее в уравнение (2.33)

$$r \frac{d\Theta}{dx} + \Theta \frac{\alpha_1 k}{\alpha_1 + k} = \frac{\alpha_1 k}{\alpha_1 + k} t_n. \quad (2.39)$$

С учетом r уравнение (2.39) перепишем в следующем виде

$$\frac{d\Theta}{dx} + a(x) \cdot \Theta = b(x), \quad (2.40)$$

где a и b – переменные коэффициенты

$$a(x) = \frac{\alpha_1 k U}{(\alpha_1 + k) c_p G}; \quad b(x) = \frac{\alpha_1 k U}{(\alpha_1 + k) c_p G} t_n.$$

Уравнение (2.40) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка с переменными коэффициентами $a(x)$ и $b(x)$. Решение данного уравнения получено в работе [76] и имеет следующий вид

$$\Theta(x) = e^{-\int_0^x a(x) dx} \left[\Theta_0 + \int_0^x b(x) e^{\int_0^x a(x) dx} dx \right], \quad (2.41)$$

где Θ_0 – температура воздуха в начале участка воздуховода

$$\int_0^x a(x) dx = \frac{kU}{c_p G_0} \int_0^x \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + k} d\xi; \quad \int_0^x b(x) dx = \frac{kUt_h}{c_p G_0} \int_0^x \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + k} d\xi. \quad (2.42)$$

С учетом изменения локальных коэффициентов теплоотдачи на начальном участке воздуховода интегральное выражение $\int_0^x \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + k} d\xi$ запишем в следующем

виде

$$\int_0^x \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + k} d\xi = \int_0^x \frac{c\xi^{-0,12}}{c\xi^{-0,12} + k} d\xi, \quad (2.43)$$

где

$$c = \frac{0,018 \cdot Re^{0,8} \lambda_f}{d_{\text{эКВ}}^{0,88}}.$$

С учетом выражений (2.42) и (2.43) решение (2.41) запишем в следующем виде

$$\Theta(x) = e^{-\frac{kU}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c\xi^{-0,12}}{c\xi^{-0,12} + k} d\xi} \left[\Theta_0 + \frac{kUt_h}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c\xi^{-0,12}}{c\xi^{-0,12} + k} d\xi \cdot e^{\frac{kU}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c\xi^{-0,12}}{c\xi^{-0,12} + k} d\xi} \right]$$

или

$$\Theta(x) = \exp \left[-\frac{kU}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c \xi^{-0,12}}{c \xi^{-0,12} + k} d\xi \right] \times \\ \times \left[\Theta_0 + \frac{kU t_h}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c \xi^{-0,12}}{c \xi^{-0,12} + k} d\xi \cdot \exp \left[\frac{kU}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c \xi^{-0,12}}{c \xi^{-0,12} + k} d\xi \right] \right]. \quad (2.44)$$

Преобразуем выражение (2.44) и окончательно запишем в виде

$$\Theta(x) = \exp \left[-\frac{U}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c \xi^{-0,12}}{\frac{c}{k} \xi^{-0,12} + 1} d\xi \right] \times \\ \times \left[\Theta_0 + \frac{U t_h}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c \xi^{-0,12}}{\frac{c}{k} \xi^{-0,12} + 1} d\xi \cdot \exp \left[\frac{U}{c_p G_0} \int_0^x \frac{c \xi^{-0,12}}{\frac{c}{k} \xi^{-0,12} + 1} d\xi \right] \right]. \quad (2.45)$$

Для вычисления определенных интегралов, входящих в выражение (2.45), применяется формула Симпсона.

Рассмотрим изменение температуры при движении воздуха в воздуховоде системы кондиционирования, утепленного с помощью экранной изоляции. В рассматриваемом случае воздуховод прокладывается в помещении. Схема конструкции утепленного воздуховода приведена на рис. 2.6.

При расчете принимались следующие исходные данные:

температура воздуха в помещении (температура окружающей среды)
 $t_h = 25^\circ \text{C}$;

температура воздуха, поступающего в воздуховод $t_g'' = \Theta_0 = 19^\circ \text{C}$;

размеры воздуховода – 250x250 мм;

расход транспортируемого воздуха $G_6=0,34$ кг/с;

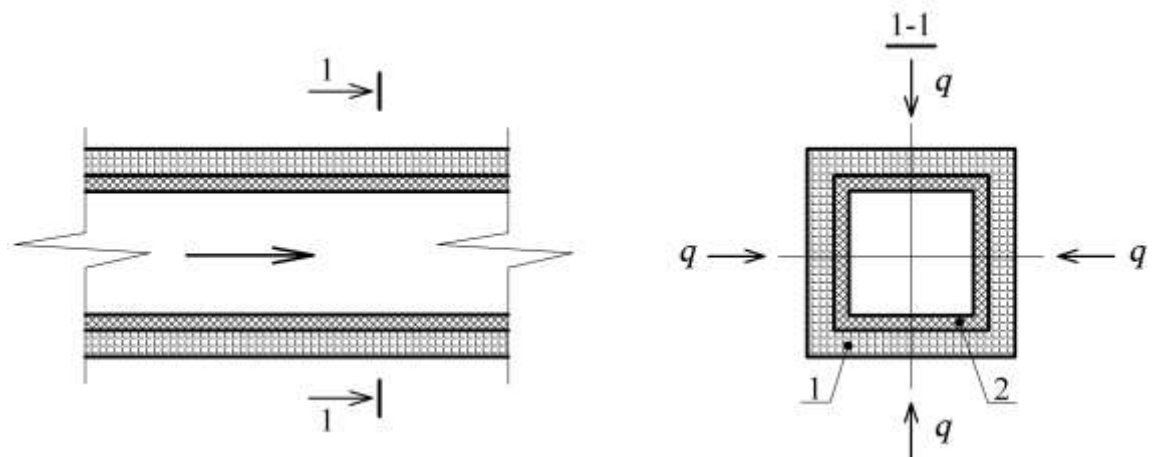


Рис. 2.6. Схема конструкции утепленного воздуховода

1 – экранная теплоизоляция; 2 – металлический воздуховод

коэффициенты теплопроводности металлического воздуховода $\lambda_1=40$ Вт/(м·°С) и экранной теплоизоляции $\lambda_2=0,037$ Вт/(м·°С);

толщины металлического воздуховода $\delta_1=0,001$ м и слоя экранной теплоизоляции $\delta_2=0,005$ м;

теплоемкость транспортируемого воздуха c_p , Дж/(кг·°С); $c_p=1005$ Дж/(кг·°С);

смоченный периметр воздуховода определяется по формуле

$$U = 2(a + b) = 2(0,25 + 0,25) = 1\text{ м},$$

где a и b – стороны воздуховода;

λ_f - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С), $\lambda_f=0,025$ Вт/(м·°С);

Критерий Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{w \cdot d_{\text{экв}}}{\nu},$$

w – скорость воздуха в воздуховоде, м/с;

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с;

коэффициент теплопередачи изолированного воздуховода k для данного случая будет определяться по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_n}} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)},$$

где α_n - коэффициент теплообмена на наружной поверхности изолированного воздуховода, Вт/(м²·°C).

$$\alpha_n = \alpha_k + \alpha_l, \quad (2.46)$$

где α_k и α_l - коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена на поверхности изолированного воздуховода, Вт/(м²·°C).

Согласно [48]

$$Nu_n = 0,695 \cdot Gr^{0.25}, \quad (2.47)$$

$$\alpha_k = \frac{Nu_n \cdot \lambda_{\text{в}}}{d_{\text{экв}}}. \quad (2.48)$$

Коэффициент лучистого теплообмена определяется по формуле

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_{uz} C_o \left[\left(\frac{t_{\text{г}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_n + 273}{100} \right)^4 \right]}{(t_{\text{г}} - t_n)}, \quad (2.49)$$

где ε_{uz} - степень черноты поверхности изоляционного слоя, $\varepsilon_{uz} = 0,04$;

t_n - температура поверхности изолированного воздуховода, °C:

$$t_n = t_{\text{г}}^H + \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{г}}^H}{R_o} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{г}}} + \sum_{i=1} R \right),$$

R_o - сопротивление теплопередаче изолированного воздуховода, (м²·°C)/Вт, определяется по формуле

$$R_o = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_n},$$

где

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{Nu_{\text{в}} \cdot \lambda_f}{d_{\text{экв}}}.$$

В результате расчета получаем, что среднее повышение температуры транспортируемого воздуха на 1 м длины изолированного воздуховода при заданных исходных данных составило 0,07 °С/м.

В работах [26, 91, 97] отмечается, что применение невентилируемой воздушной прослойки может существенно повысить теплозащитные свойства утепляемых конструкций.

Рассмотрим вариант прокладки воздуховодов, утепленных с применением экранной тепловой изоляции и невентилируемой воздушной прослойки, при аналогичных условиях. Схема выше указанной конструкции воздуховода представлена на рис. 2.7.

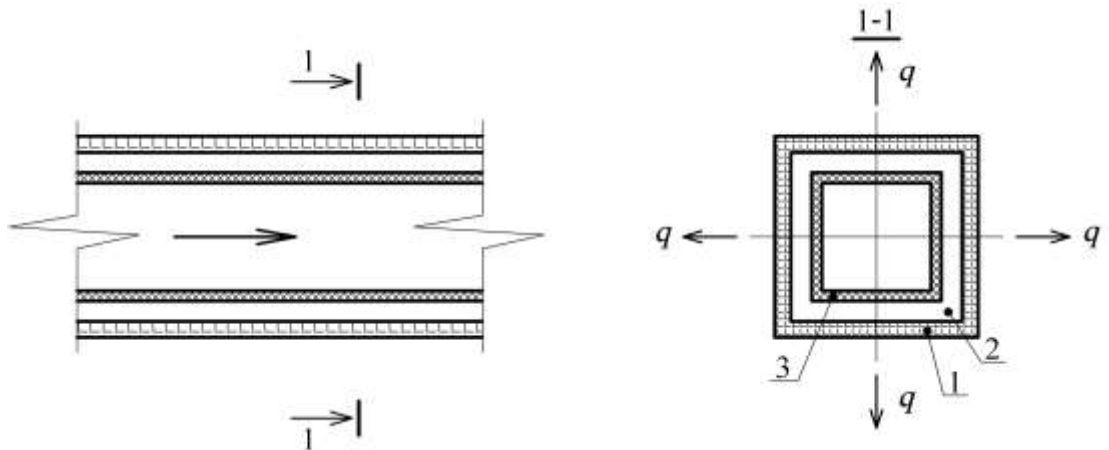


Рис. 2.7. Схема конструкции воздуховода, утепленного с применением экранной тепловой изоляции и воздушной невентилируемой прослойки
1 – экранная теплоизоляция; 2 – воздушная прослойка; 3 – металлический воздуховод

Толщина воздушной прослойки $\delta_{\text{в}}$ принята равной 10 мм, теплопроводность $\lambda_{\text{экв}}$ замкнутой экранированной воздушной прослойки определялась по методике, изложенной в п. 2.1.

По результатам расчета среднее повышение температуры транспортируемого воздуха на 1 м длины изолированного воздуховода в этом случае при заданных исходных данных составило 0,028 °C/м.

Результаты расчета изменения температуры транспортируемого воздуха представлены на рис. 2.8.

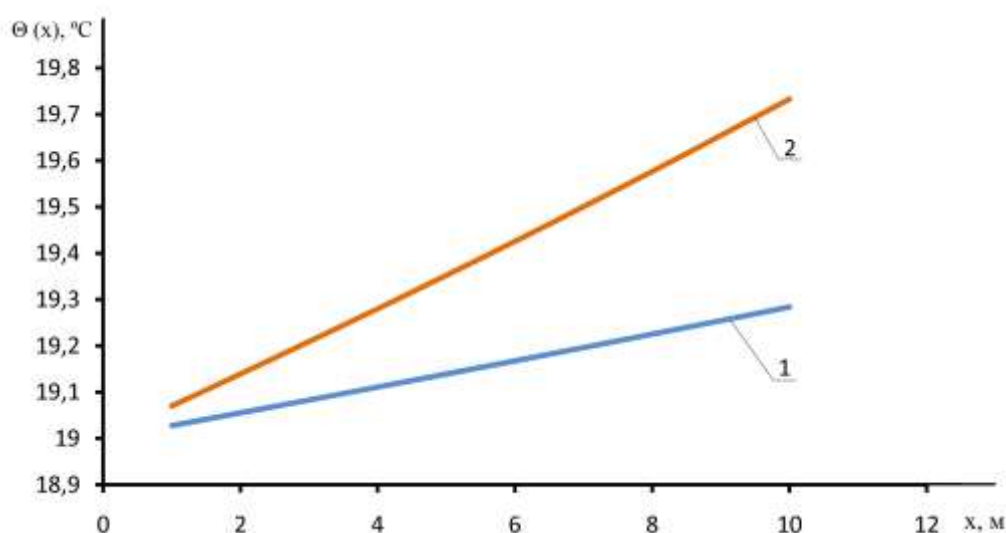


Рис. 2.8. Результаты расчета повышения температуры транспортируемого воздуха: 1 – для конструкции воздуховодов с замкнутой воздушной прослойкой; 2 – для конструкции воздуховодов без замкнутой воздушной прослойки

Результаты расчета также представлены в виде зависимости (рис. 2.9) безразмерной температуры $\bar{\Theta}$ от безразмерной координаты $\frac{l}{d_{\text{экв}}}$. Значение безразмерной температуры $\bar{\Theta}$ определяется выражением

$$\bar{\Theta} = \frac{\Theta_0 - \Theta_l}{\Theta_0 - t_n}, \quad (2.50)$$

где Θ_l – температура транспортируемого воздуха в конце участка.

Рассмотрим вариант прокладки воздуховодов на открытом воздухе. В этом случае будем определять понижение температуры транспортируемого воздуха.

При расчете принимаются следующие исходные данные:

температура наружного воздуха $t_n = -30^\circ\text{C}$, принимается по СП 131.13330.2012 «Строительная климатология»;

максимальная из средних скоростей ветра за январь $v_n = 5,4$ м/с, принимается по [102];

температура воздуха, поступающего в воздуховод $t_e^H = \Theta_0 = 25^\circ\text{C}$;

исходные данные для конструкций воздуховодов, представленных на рис. 2.6 и 2.7, такие же, как и в предыдущем варианте.

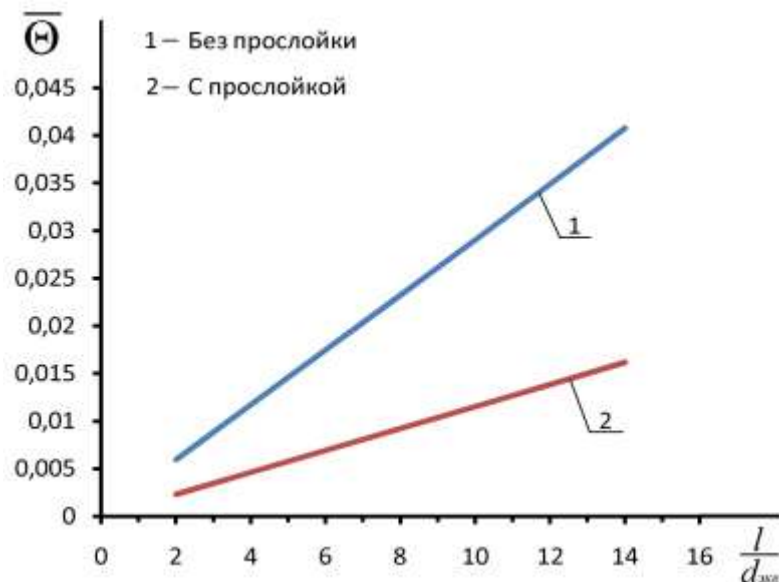


Рис. 2.9. Зависимость изменения температуры транспортируемого воздуха по изолированному воздуховоду, проложенному в помещении: 1 — для конструкции воздуховодов с замкнутой воздушной прослойкой; 2 — для конструкции воздуховодов без замкнутой воздушной прослойки

В результате расчета при заданных исходных данных среднее понижение температуры транспортируемого воздуха на изолированном участке воздуховода, утепленного экранной тепловой изоляцией без воздушной прослойки, составило $0,56^\circ\text{C/м}$. Среднее понижение температуры транспортируемого воздуха на изолированном участке воздуховода,

утепленного экранной тепловой изоляцией с воздушной прослойкой, составило $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

На рис. 2.10-2.11 представлены результаты расчета изменения температуры транспортируемого воздуха в размерных и безразмерных координатах для воздуховода, проложенного на открытом воздухе.

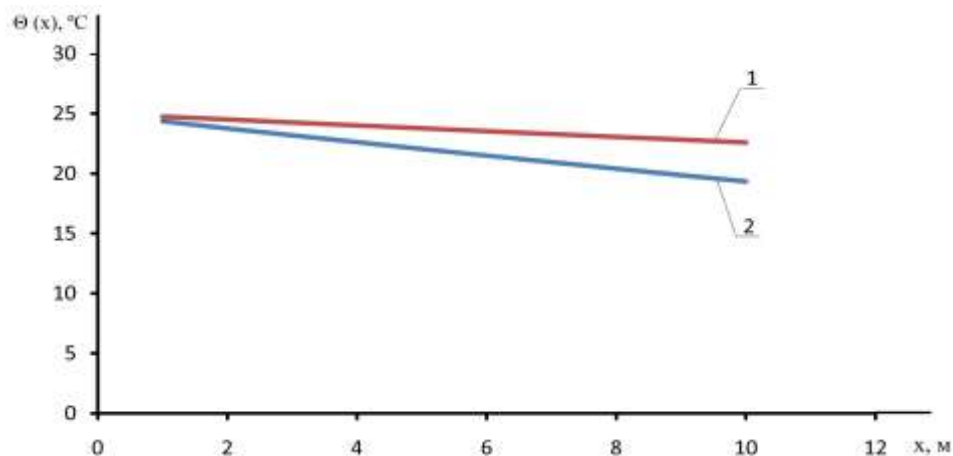


Рис. 2.10. Результаты расчета понижения температуры транспортируемого воздуха: 1 – для конструкции воздуховодов с замкнутой воздушной прослойкой; 2 – для конструкции воздуховодов без замкнутой воздушной прослойки

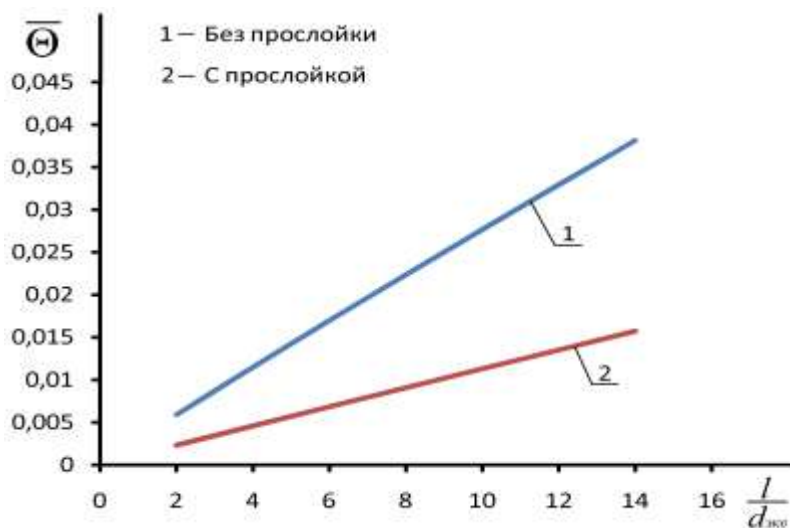


Рис. 2.11. Зависимость изменения температуры транспортируемого воздуха по изолированному воздуховоду, проложенному снаружи: 1 – для конструкции воздуховодов с замкнутой воздушной прослойкой; 2 – для конструкции воздуховодов без замкнутой воздушной прослойки

С физической точки зрения безразмерная температура $\bar{\Theta}$ представляет собой эффективность теплообмена между транспортируемым воздухом и воздухом окружающей среды. Графические зависимости, представленные на рис. 2.9 и 2.11, показывают, что эффективность теплообмена увеличивается по длине начального участка. Однако очевидной остается эффективность применения невентилируемой воздушной прослойки при утеплении воздуховода.

2.2.2 Математическое моделирование процесса стационарного теплообмена в ограждающих конструкциях длинных воздуховодов

Изложенная в п. 2.2.1 расчетная методика применима для коротких каналов (воздуховодов), для которых местный коэффициент теплоотдачи способен изменяться в 2 раза и более.

Для длинных воздуховодов (длиной $\frac{l}{d_{э\kappa\theta}} \geq 50$) поправка, учитывающая изменения среднего коэффициента теплоотдачи, $\varepsilon_l = 1$. В этом случае тепловой расчет ограждающих конструкций воздуховодов возможно производить при постоянном коэффициенте теплопередачи.

В связи с этим на решение задачи стационарного теплопередачи через ограждающие конструкции воздуховодов можно распространить метод безразмерных характеристик, разработанный В. М. Кейсом и А. Л. Лондоном [55]. Данный метод основывается на использовании критериев эффективности рекуперативных теплообменных аппаратов ε и безразмерного числа переноса тепла NTU .

Рассмотрим повышение температуры при движении воздуха в воздуховоде длиной, превышающей длину начального термического участка ($\frac{l}{d_{э\kappa\theta}} \geq 15$),

утепленного с помощью экранной изоляции. Условия для расчета примем аналогичные условиям, рассматриваемым в п. 2.2.1.

График изменения температур транспортируемого воздуха по длине воздуховода и воздуха внешней окружающей среды представлен на рис. 2.12. Температура t_{θ} соответствует температуре воздуха в помещении, температуры t_B^H и t_B^K равны температурам транспортируемого воздуха в начале и в конце рассматриваемого участка воздуховода соответственно.

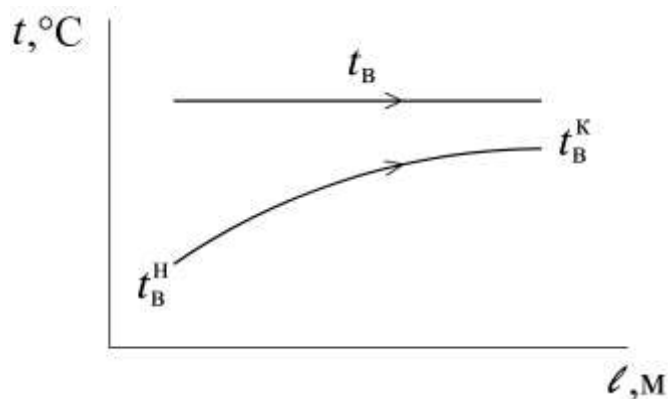


Рис. 2.12. График изменения температур транспортируемого воздуха по длине воздуховода, прокладываемого в помещении, и воздуха внешней окружающей среды

Эффективность теплообмена ε в данном случае определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{t_{\theta}^K - t_{\theta}^H}{t_B - t_{\theta}^H}. \quad (2.51)$$

Согласно [55] выражение (2.51) можно записать в следующем виде

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}, \quad (2.52)$$

где NTU – безразмерное число единиц переноса тепла, определяется по формуле

$$NTU = \frac{k \cdot F_{из}}{c_{\epsilon} \cdot G_{\epsilon}}, \quad (2.53)$$

k – коэффициент теплопередачи изолированного воздуховода, Вт/м²·°С, определяется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\epsilon}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_n}}. \quad (2.54)$$

Коэффициенты α_{ϵ} и α_n определяются так же, как в примере, рассмотренном в п. 2.2.1.

С учетом выражений (2.51) и (2.52) температуру воздуха в конце участка определяем по формуле

$$t_{\epsilon}^K = t_{\epsilon}^H + (1 - e^{-NTU})(t_{\epsilon} - t_{\epsilon}^H). \quad (2.55)$$

В результате расчета получаем, что среднее повышение температуры транспортируемого воздуха на 1 м длины изолированного воздуховода без применения замкнутой воздушной прослойки при заданных исходных данных составило 0,018 °С/м, а для изолированного воздуховода с применением замкнутой воздушной прослойки – 0,012 °С/м.

Результаты расчета представлены в виде графических зависимостей в размерных (рис. 2.13) и безразмерных (рис. 2.14) координатах.

Рассмотрим вариант прокладки воздуховодов на открытом воздухе. В этом случае будем определять понижение температуры транспортируемого воздуха.

График изменения температур транспортируемого воздуха по длине воздуховода и воздуха внешней окружающей среды t_n для рассматриваемого случая представлен на рис. 2.15.

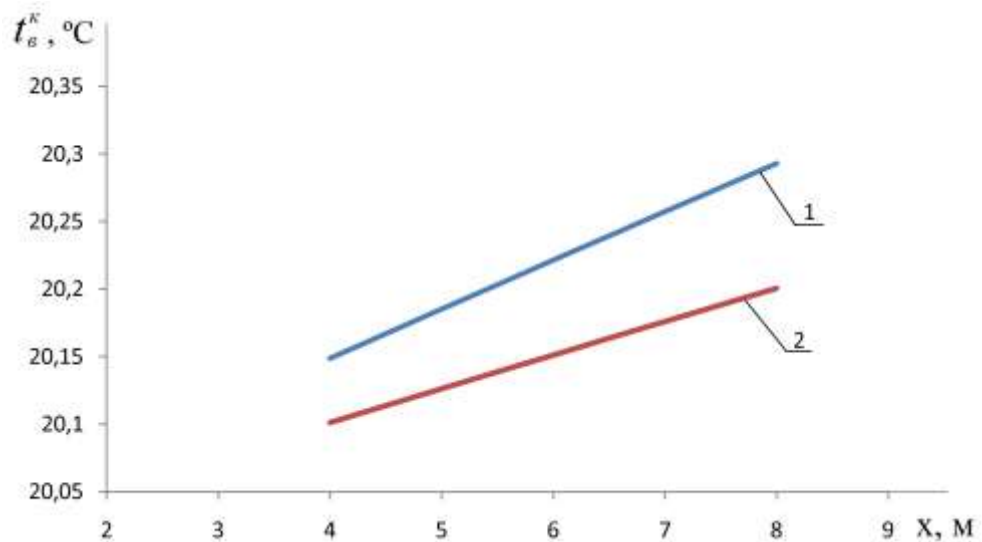


Рис. 2.13. Результаты расчета повышения температуры транспортируемого воздуха методом безразмерных характеристик: 1 – для конструкции воздуховодов с замкнутой воздушной прослойкой; 2 – для конструкции воздуховодов без замкнутой воздушной прослойки

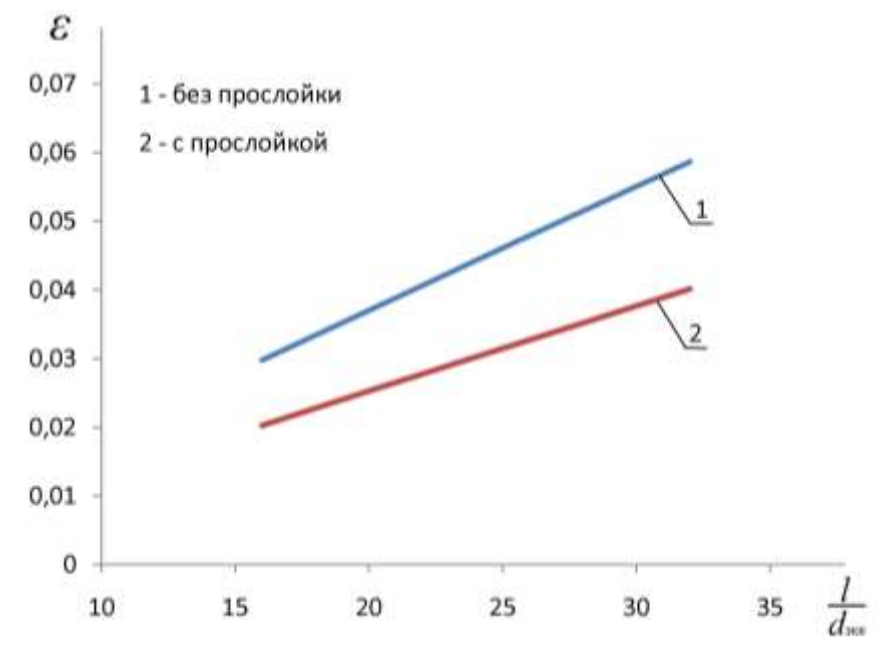


Рис. 2.14. Зависимость изменения температуры транспортируемого воздуха по изолированному воздуховоду, проложенному в помещении: 1 – для конструкции воздуховодов с замкнутой воздушной прослойкой; 2 – для конструкции воздуховодов без замкнутой воздушной прослойки

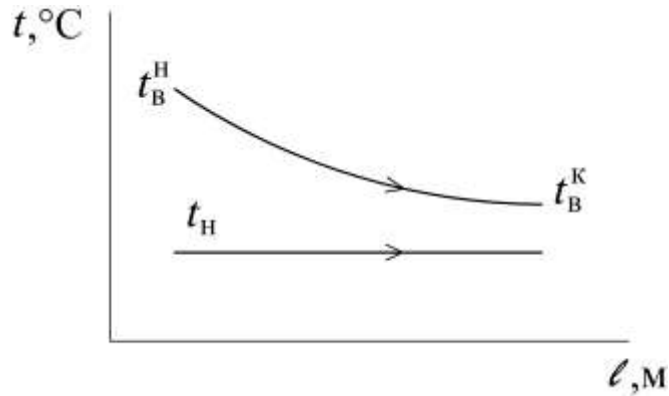


Рис. 2.15. График изменения температур транспортируемого воздуха по длине воздуховода и воздуха внешней окружающей среды

Эффективность теплообмена ε в данном случае определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{t_{\theta}^H - t_{\theta}^K}{t_{\theta}^H - t_H} \quad (2.56)$$

Температуру воздуха в конце участка определяется по формуле:

$$t_{\theta}^K = t_{\theta}^H - (1 - e^{-NTU})(t_{\theta}^H - t_H). \quad (2.57)$$

Коэффициент теплоотдачи путем конвекции от наружной поверхности изолированного воздуховода, прокладываемого на открытом воздухе, определяется критериальным уравнением

$$Nu_H = 0,22 \cdot Re^{0.6},$$

$$\alpha_K = \frac{Nu_H \cdot \lambda_B}{d_{\text{ЭКВ}}}.$$

Результаты расчета понижения температуры транспортируемого воздуха по изолированным воздуховодам, проложенным на открытом воздухе, представлены на рис. 2.16-2.17.

Среднее понижение температуры транспортируемого воздуха на 1 м длины изолированного воздуховода без применения замкнутой воздушной прослойки составило $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$, а для изолированного воздуховода с применением замкнутой воздушной прослойки – $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

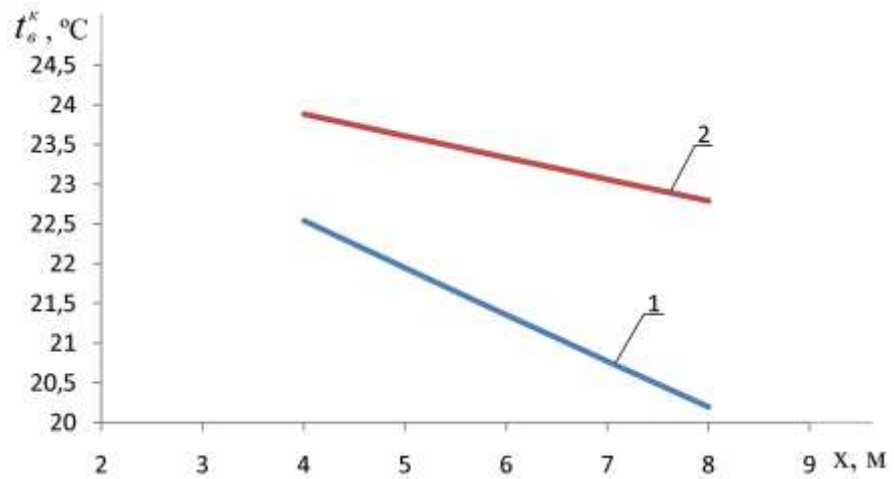


Рис. 2.16. Результаты расчета понижения температуры транспортируемого воздуха методом безразмерных характеристик: 1 – для конструкции воздуховодов с замкнутой воздушной прослойкой; 2 – для конструкции воздуховодов без замкнутой воздушной прослойки

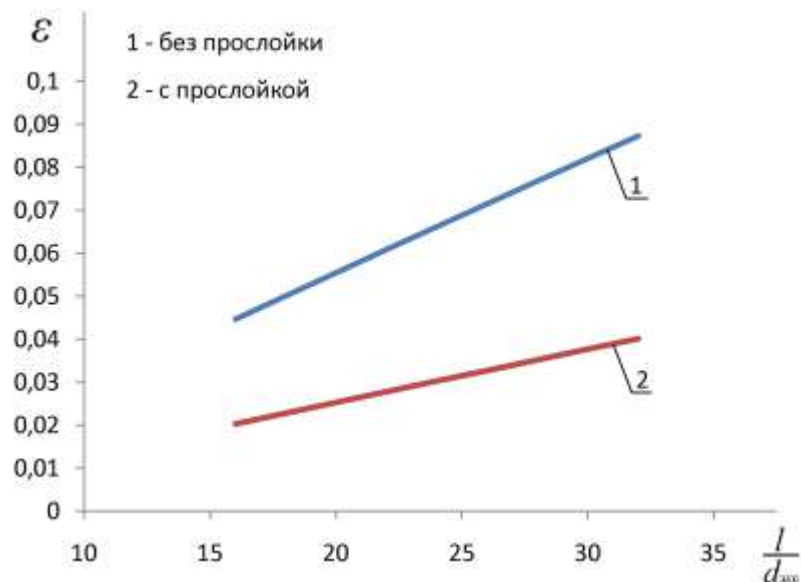


Рис. 2.17. Зависимость изменения температуры транспортируемого воздуха по изолированному воздуховоду, проложенному на открытом воздухе: 1 – для конструкции воздуховодов с замкнутой воздушной прослойкой; 2 – для конструкции воздуховодов без замкнутой воздушной прослойки

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что больший эффект от применения экранной теплоизоляции при утеплении воздуховодов можно получить при использовании ее в совокупности с невентилируемой воздушной прослойкой. Однако толщину воздушной прослойки следует выбирать относительно небольшую с целью снижения конвективной составляющей в процессе теплопередачи через прослойку.

2.3 Выводы по главе 2

1. Полученная математическая модель процесса передачи тепла через многослойную ограждающую конструкцию с практически достаточной для инженерных расчётов точностью описывает рассматриваемый физический процесс.

2. Усовершенствована методика теплотехнического расчета ограждающих конструкций зданий и сооружений (наружных стен, перекрытий над неотапливаемыми подвалами, чердачных покрытий) с применением экранной тепловой изоляции.

3. Показано, что полученные автором в результате теплотехнического расчета строительной ограждающей конструкции значения термических сопротивлений замкнутых экранированных воздушных прослоек существенно отличаются от данных, приведенных в нормативной литературе [103, 104].

4. Получена математическая модель стационарного теплообмена в ограждающих конструкциях воздуховодов, утепленных с применением экранной тепловой изоляции. На основе приведенной математической модели получено дифференциальное уравнение первого порядка, описывающее изменение температуры транспортируемого воздуха для коротких воздуховодов (длиной до $(l/d_{\text{экв}}) < 50$) и учитывающее изменение коэффициента теплоотдачи по длине начального термического участка.

5. Для решения задачи стационарной теплопередачи через ограждающие конструкции длинных воздуховодов применен метод безразмерных характеристик.

6. При сравнении результатов теплотехнического расчета ограждающих конструкций длинных и коротких воздуховодов по изложенным методикам очевидно, что за счет увеличения местных коэффициентов теплоотдачи для коротких воздуховодов изменение температуры транспортируемого воздуха по ним больше по сравнению с изменением температуры воздуха в длинных воздуховодах.

7. Результаты теплового расчета ограждающих конструкций воздуховодов, утепленных с помощью экранной тепловой изоляции, показывают эффективность применения замкнутых воздушных прослоек.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ЭКРАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ И ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕМ

С практической точки зрения исследование теплофизических свойств экранной изоляции имеет весьма большое значение для оценки теплозащитных характеристик строительных ограждающих конструкций.

Данные по коэффициентам теплопроводности экранной изоляции являются необходимыми для проведения научных и инженерных расчётов, а также исследования теплового режима ограждающих конструкций, утеплённых с помощью таких материалов. Имеющиеся данные по теплопроводности, представленные производителями, весьма противоречивы из-за значительного разброса значений, полученных в различных лабораториях.

Целью исследования являлось определение теплопроводности материалов экранной изоляции, а также теплозащитных характеристик ограждающих конструкций, утепленных с применением подобных материалов. Объектом исследования являлись современные материалы, применяемые в качестве экранной изоляции, и ограждающие конструкции, утепленные с помощью этих материалов.

3.1. Методика проведения эксперимента

В данном подразделе подробно изложен экспериментальный метод определения теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов.

Определение коэффициента теплопроводности проводилось стационарным методом в соответствии с [37].

Прибор обеспечивает определение коэффициента теплопроводности в диапазоне значений $\lambda = 0,02 \div 1,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Погрешность определения коэффициента теплопроводности составляет не более 5 %.

Принцип работы прибора заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к его лицевым граням, измерении толщины образца, плотности теплового потока и температуры противоположных лицевых граней.

Общий вид прибора представлен на рис. 3.1.

Нагревательная установка прибора включает блок управления нагревателем и холодильником, а также источник питания.

В верхней части установки размещен винт, снабженный отсчетным устройством для измерения толщины образца и динамометрическим устройством с трещоткой для создания постоянного усилия прижатия испытываемого образца.

Образцы для испытаний подготавливают в виде прямоугольного параллелепипеда, наибольшие (лицевые) грани которого имеют форму квадрата со стороной 250×250 мм.

Длину и ширину образца в кладке измеряют линейкой с погрешностью не более 0,5 мм. Толщина испытываемого образца должна составлять от 5 до 50 мм.

Толщину образца H в метрах, и разницу температур между нагревателем и холодильником ΔT в градусах Кельвина, необходимо выбирать в соответствии с рекомендациями, приведенными в [46] в зависимости от прогнозируемой теплопроводности материала.



Рис. 3.1. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4 «250»

Вычисление коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·°C), и термического сопротивления R , (м²·°C)/Вт, производится вычислительным устройством прибора по формулам:

$$\lambda = \frac{H \cdot q}{T_n - T_x}; \quad (3.1)$$

$$R = \frac{T_n - T_x}{q} - 2 \cdot R_k. \quad (3.2)$$

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

R – термическое сопротивление испытываемого образца, (м²·°C)/Вт;

R_k – термическое сопротивление между лицевой гранью образца и рабочей поверхностью плиты прибора, (м²·°C)/Вт. Оно учитывается при калибровке прибора по эталонным образцам.;

H – толщина образца, м;

T_n – температура горячей лицевой грани испытываемого образца, К;

T_x – температура холодной лицевой грани испытываемого образца, К.

3.2. Оценка достоверности полученных данных

Достоверность полученных экспериментальных результатов согласно [54, 86] оценивалась по их воспроизводимости, полученной в пяти сериях опытов. Повторение опытов проводилось в одинаковых условиях.

При оценке достоверности экспериментальных данных производились вычисления следующих показателей:

1. Среднеарифметическое значение определяемого параметра X_i при числе повторенных опытов $n=5$ ($n<30$)

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (3.3)$$

2. Величина погрешности (отклонения) для рассматриваемого измерения

$$\Delta_i = X_i - \bar{X} \quad (3.4)$$

3. Величина среднеарифметической погрешности измерений серии опытов

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta_i| \quad (3.5)$$

4. Относительная погрешность измерений серии опытов

$$\delta = \frac{\bar{\Delta}}{\bar{X}} 100 \quad (3.6)$$

5. Величина среднеквадратичной ошибки (среднеквадратичного отклонения) серии опытов

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}} \quad (3.7)$$

6. Величина ошибки серии опытов

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.8)$$

7. Погрешность серии опытов с числом степеней свободы $\nu = n - 1 = 5 - 1 = 4$ при требовании надежности измерений $\beta = 0,95$ и показателе надежности $T = 3,2$

$$a = m \cdot T \quad (3.9)$$

8. Коэффициент вариации серии опытов

$$K_i = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (3.10)$$

Коэффициент вариации во всех случаях не превышал значения 5%, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

3.3. Исследование эффективной теплопроводности экранной тепловой изоляции с применением воздушных прослоек

В лаборатории теплотехнических испытаний СГАСУ по вышеизложенной методике был проведён ряд испытаний по определению теплопроводности теплоизоляционного материала λ_m с применением экранов из алюминиевой фольги. В качестве испытуемого образца была принята теплоизоляция Aluthermo QUATRO бельгийской фирмы Aluthermo. Данный материал состоит из двух слоёв 30-ти микронного фольгированного алюминия, между которыми находится два слоя огнеупорной пузырчатой полиэтиленовой плёнки, наполненной пузырьками осушенного воздуха, и слоя огнеупорного и водонепроницаемого вспененного полимерного материала. Также определялась теплопроводность материалов отечественного производства, таких как Пенофол, Теплофол и Фольгоизол. Данные материалы на основе вспененного полиэтилена в отличие от Aluthermo QUATRO имели одностороннее фольгирование.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Результаты экспериментальных исследований по определению теплопроводности экранной изоляции

Исследуемый материал	Толщина исследуемого материала, мм	Коэффициент теплопроводности λ_m , Вт/(м·°С)
Aluthermo QUATRO	10	0,039
Пенофол	4	0,033
Теплофол	4	0,037
Фольгоизол	10	0,045

С целью оценки эффективности применения воздушных прослоек в сочетании с теплоизоляционными материалами Aluthermo QUATRO, Фольгоизол и Пенофол были проведены эксперименты при расстоянии между материалом и греющей плитой прибора ИТП-МГ4 «250» в 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 мм. Сам материал устанавливался на нижнюю охлаждающую плиту прибора.

Схема рассматриваемой конструкции представлена на рис. 3.2.

Подробные результаты испытаний приведены в приложении 1 в таблицах, а также представлены в виде графических зависимостей термических сопротивлений прослоек от толщины. В таблице 3.2 приведены значения термических сопротивлений воздушных прослоек исследуемых в сочетании с указанными выше материалами экранной изоляции.

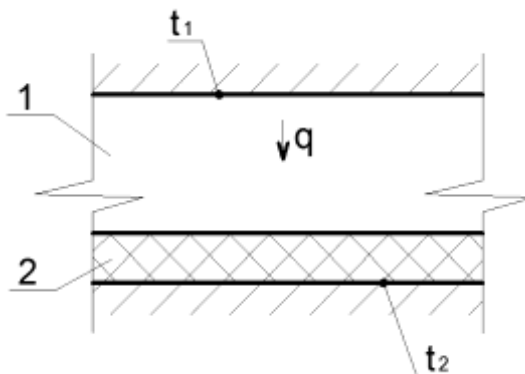


Рис. 3.2. Схема рассматриваемой конструкции

1 – воздушная прослойка; 2 – теплоизоляционный материал

Таблица 3.2

Результаты теплотехнических исследований горизонтальных воздушных прослоек при направлении теплового потока сверху-вниз

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки R_v , ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, в сочетании с материалом			Среднее значение термического сопротивления воздушной прослойки $R_{\text{ср}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Среднее значение теплопроводности воздушной прослойки $\lambda_{\text{ср}}$, Вт/($\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$)
	Aluthermo QUATRO	Фольгоизол	Пенофол		
10	0,285	0,256	0,312	0,284	0,035
15	0,439	0,400	0,441	0,427	0,035
20	0,601	0,507	0,584	0,564	0,035
25	0,668	0,610	0,642	0,640	0,039
30	0,719	0,687	0,689	0,698	0,043
35	0,780	0,738	0,745	0,754	0,046
40	0,829	0,821	0,800	0,817	0,049

Результаты, представленные в таблице 3.2, обработаны в виде графических зависимостей (рис. 3.3-3.4).

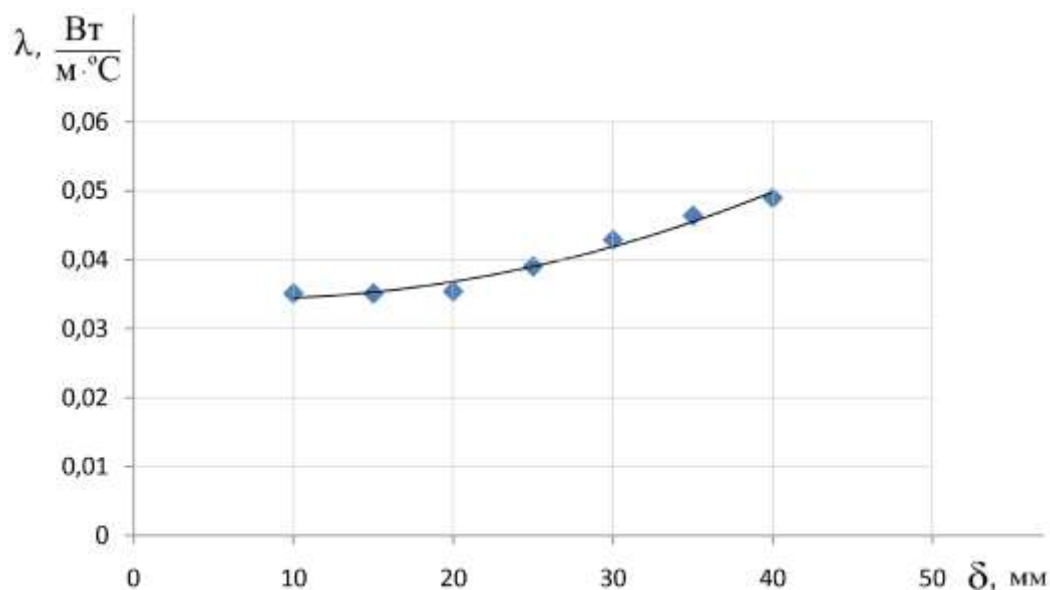


Рис. 3.3. Зависимость теплопроводности воздушной прослойки от её толщины при использовании материалов экранной теплоизоляции

Данные исследования показали, что с увеличением толщины воздушной прослойки до 30 мм, термическое сопротивление существенно возрастает. При дальнейшем увеличении толщины термическое сопротивление увеличивается незначительно, что связано с увеличением конвективного переноса.

При сравнении данных, полученных расчетным путем по методике, изложенной в главе 2, видно, что расчет дает значительно завышенные значения термических сопротивлений воздушных прослоек. Поэтому при теплотехническом расчете горизонтальных ограждающих конструкций при направлении теплового потока через них сверху-вниз полученное значение термического сопротивления следует умножать на поправочный коэффициент μ , значение которого приведено в таблице 3.3.

Анализируя полученные данные, можно установить зависимость, по которой будет определяться термическое сопротивление горизонтальных экранированных воздушных прослоек при направлении теплового потока через них сверху-вниз. Эта зависимость будет иметь вид:

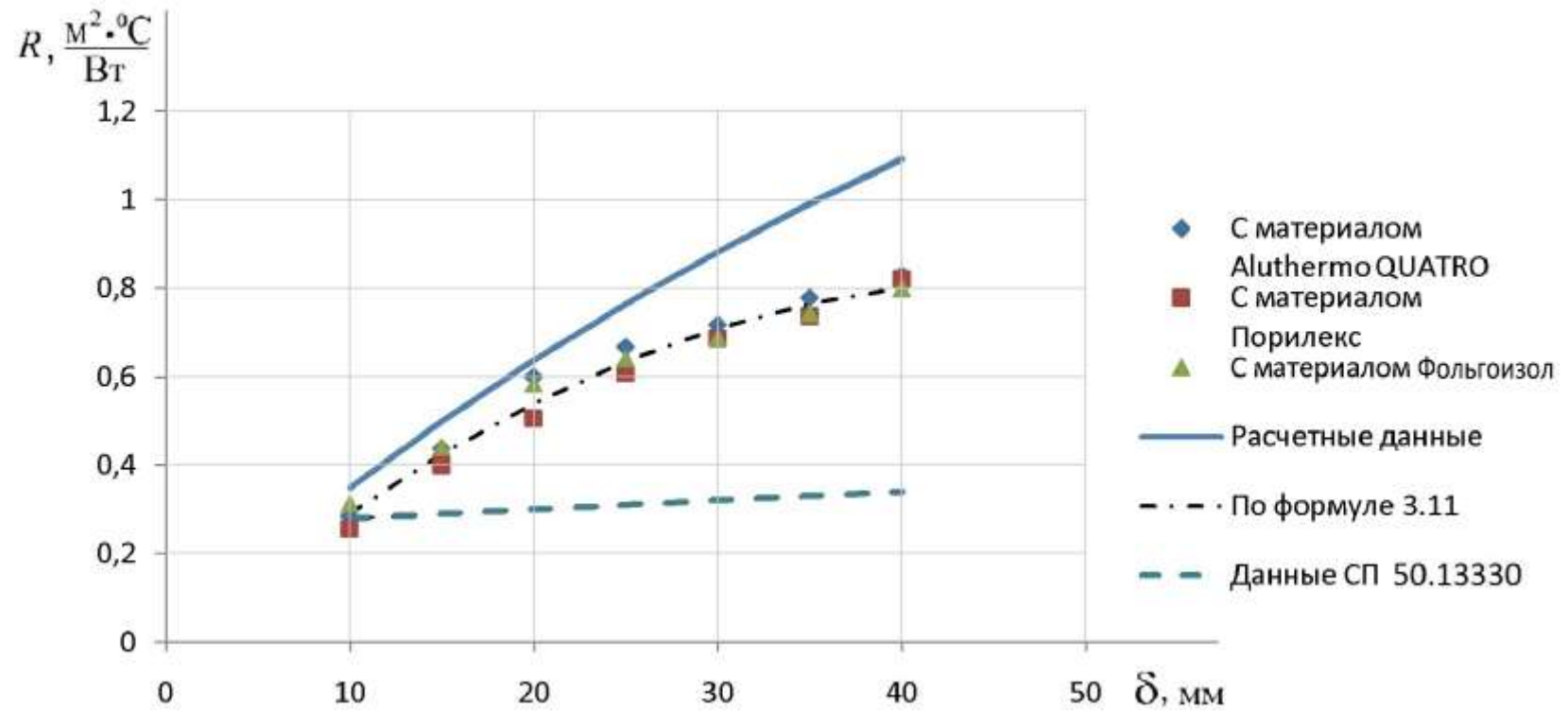


Рис. 3.4. Зависимость термического сопротивления воздушной прослойки от её толщины при использовании материалов экранной теплоизоляции

$$R_g = -3,76 \cdot 10^{-4} \delta^2 + 0,0355\delta, \quad (3.11)$$

где R_g – термическое сопротивление экранированной замкнутой воздушной прослойки, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;

δ – толщина воздушной прослойки, мм.

Таблица 3.3

Значения поправочного коэффициента μ в зависимости от толщины воздушной прослойки

Толщина воздушной прослойки, мм	10	15	20	25	30	35	40
Значения поправочного коэффициента μ	0,81	0,85	0,88	0,84	0,79	0,76	0,75

По приведенной выше методике экспериментального исследования были определены термические сопротивления конструкции, указанной на рис. 3.5. Конструкция состояла из теплоизоляционного материала Aluthermo QUATRO толщиной 10 мм и двух воздушных прослоек.

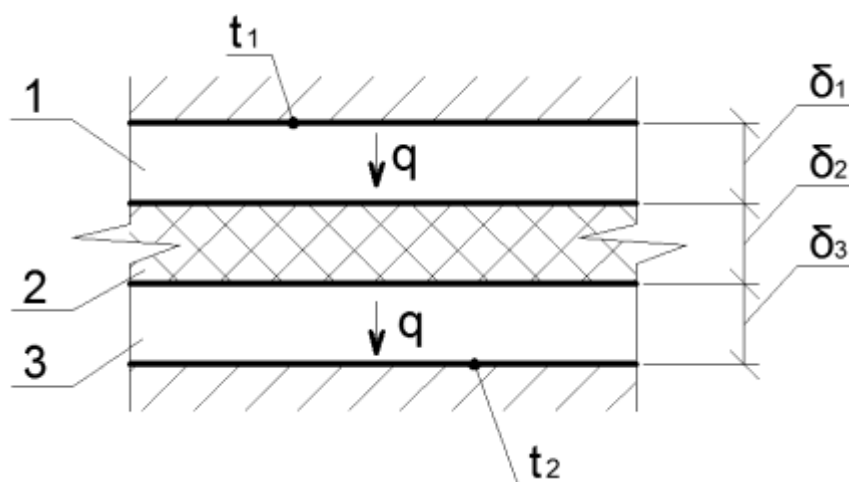


Рис. 3.5. Схема рассматриваемой конструкции с двумя воздушными прослойками

1, 3 – воздушная прослойка; 2 – теплоизоляционный материал Aluthermo QUATRO

Результаты испытаний материала с двумя воздушными прослойками приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Термическое сопротивление воздушных прослоек с применением экранной изоляции Aluthermo QUATRO

Толщины воздушных прослоек $\delta_1=\delta_3$, мм	Суммарное термическое сопротивление $R_1+R_2+R_3$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$
10	0,909
15	1,212
20	1,476

Сравнительный анализ экспериментальных данных и данных, приведённых в нормативной литературе [104], показывает, что при увеличении толщины воздушной прослойки от 10 мм и выше её термическое сопротивление значительно превышает значения, приведённые в нормативной литературе.

3.4. Исследование эффективной теплопроводности теплоизоляционных керамических покрытий при совместном использовании воздушной прослойки

Производители керамических теплоизоляционных покрытий предлагают использовать данный материал для изоляции наружных и внутренних поверхностей ограждающих конструкций зданий и сооружений, а также изоляции трубопроводов, воздухопроводов и оборудования.

В настоящее время в технических условиях на теплоизоляционные покрытия приводятся весьма противоречивые данные по теплопроводности. Как правило, в технических характеристиках величина коэффициента теплопроводности варьируется в пределах от $0,001 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ (по данным НИИ «Сантехники» г. Москва) до $0,08 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ (по данным НИИ «Стройфизики» г.

Москва), что бесспорно затрудняет эффективное использование таких материалов в строительстве.

Керамическое теплоизоляционное покрытие представляет собой жидкую композицию на водной, клеевой или другой основе, состоящую из синтетического каучука, акриловых полимеров, диспергированных в этой композиции керамических (размером до 0,01 мм) и силиконовых (размером до 0,02 мм) микросфер, а также оксида титана, кальция, цинка.

Возможный теплозащитный эффект от применения керамического теплоизоляционного покрытия связан с относительно низким коэффициентом молекулярной теплопроводности самого материала, а также его теплоотражающей способностью. Практическое использование покрытия свидетельствует о наличии положительного эффекта, однако существенно отличающегося от заявленного. Более высокий эффект можно ожидать от применения этого материала в конструкциях с воздушными прослойками.

Сложность получения достоверной информации объясняется отсутствием методики оценки теплозащитных характеристик керамических покрытий. Поэтому в настоящее время возникает необходимость в разработке методики экспериментального исследования, которая позволит реально оценить эффективность применения теплоизоляционных керамических покрытий в строительстве.

В лаборатории теплотехнических испытаний СГАСУ были проведены экспериментальные исследования по определению теплопроводности таких керамических теплоизоляционных покрытий, как «Акварелла ТМ-150», «Корунд» и «Thermal-Coat».

Испытываемый материал с толщиной слоя δ_1 , м, наносился на металлическую пластину толщиной δ_2 , м, и размером 250x250 мм. Определение коэффициента теплопроводности проводилось стационарным методом в соответствии с ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод

определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном режиме» с использованием измерителя теплопроводности ИТП-МГ 4 «250».

При определении теплопроводности материала жидкого керамического покрытия использовалась схема конструкции, приведенная на рис. 3.6.

При стационарном режиме плотность теплового потока постоянна и для всех слоев одинакова. Поэтому для рассматриваемой конструкции принимается следующая система уравнений

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_1}; \\ q &= \frac{t_{w2} - t_{w3}}{R_2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

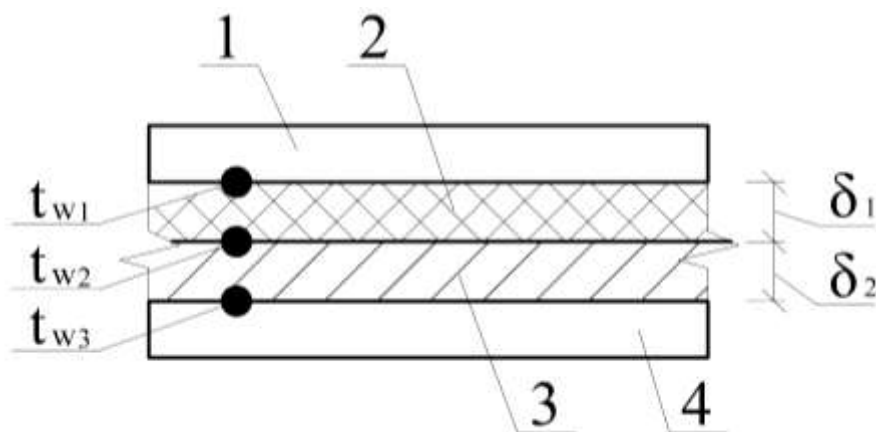


Рис. 3.6. Схема рассматриваемой конструкции: 1 – греющая плита, 2 – исследуемый материал, 3 – металлическая пластина, 4 – охлаждающая плита

Значения температурных напоров в каждом слое будут описываться следующей системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} t_{w1} - t_{w2} &= qR_1; \\ t_{w2} - t_{w3} &= qR_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Складывая левые и правые части системы уравнений (3.13), получим

$$t_{w1} - t_{w3} = q(R_1 + R_2). \quad (3.14)$$

Из выражения (3.14) определяется плотность теплового потока

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w3}}{R_1 + R_2}. \quad (3.15)$$

Термическим сопротивлением металлической пластины R_2 ввиду его малости можно пренебречь. Поэтому выражение (3.15) можно записать в следующем виде

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w3}}{R_1} = \frac{t_{w1} - t_{w3}}{\frac{\delta_1 + \delta_2}{\lambda_{\text{экв}}}}, \quad (3.16)$$

где $\lambda_{\text{экв}}$ – значение теплопроводности рассматриваемой конструкции.

Из выражения (3.16) следует, что

$$R_1 = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\lambda_{\text{экв}}}. \quad (3.17)$$

Принимая, что $R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}$, выражение (3.17) можно записать в следующем

виде

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\lambda_{\text{экв}}}. \quad (3.18)$$

Из выражения (3.18) окончательно определяется значение теплопроводности исследуемого материала

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{экв}} \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2}. \quad (3.19)$$

В ходе эксперимента определялось значение теплопроводности рассматриваемой конструкции $\lambda_{экв}$. Коэффициент теплопроводности исследуемого материала λ_1 определялся по формуле (3.19).

Были проведены экспериментальные исследования по определению теплопроводности таких керамических теплоизоляционных покрытий, как «Акварелла ТМ-150», «Корунд» и «Thermal-Coat».

Составляющие компоненты рассматриваемых керамических покрытий приведены в таблице 3.5. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.5

Состав рассматриваемых керамических покрытий

Керамическое покрытие	Состав
Акварелла ТМ-150	вакуумированные алюмосиликатные микросферы, термостойкая стирол-акрилатная дисперсия, ингибиторы коррозии, фунгициды, модифицирующие добавки
Корунд	сверхтонкие керамические микросферы с разряженным воздухом, акриловое связующее, композиция из фиксаторов и катализаторов
Thermal-Coat	заполненные вакуумом керамические и силиконовые шарики, которые находятся во взвешенном состоянии в жидкой композиции, состоящей из синтетического каучука, акриловых полимеров и неорганических пигментов

Таблица 3.6

Результаты исследования теплопроводности жидких керамических покрытий

Керамическое покрытие	Толщина исследуемого образца, мм	Среднее значение теплопроводности, Вт/(м·°С)
Акварелла ТМ-150	0,87	0,040
Корунд	1,10	0,036
Thermal-Coat	1,31	0,109

Также был проведён ряд экспериментальных испытаний, целью которых являлось определение сопротивления теплопередаче воздушных прослоек в конструкциях с применением жидкого керамического теплоизоляционного покрытия «Акварелла ТМ-150».

Результаты экспериментального определения термического сопротивления воздушных прослоек R_1 , $\frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}}$, представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Результаты экспериментального определения термического сопротивления воздушных прослоек

Толщина воздушной прослойки, мм	Сопротивление теплопередаче керамического покрытия R_2 , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$	Сопротивление теплопередаче воздушной прослойке R_1 , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$	Сопротивление теплопередаче всей конструкции $R_0 = R_1 + R_2$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$
10	0,022	0,293	0,315
20	0,022	0,334	0,356
30	0,022	0,356	0,378

Из полученных экспериментальных данных видно, что большую часть величины сопротивления теплопередаче всей конструкции составляет термическое сопротивление воздушной прослойки, а термическое сопротивление самого покрытия весьма незначительно. Значительная доля

сопротивления теплопередаче, относящаяся к воздушной прослойке, объясняется относительно низкой теплопроводностью воздуха. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что жидкая теплоизоляция не способна заменить традиционные теплоизоляционные материалы в строительстве, такие как пенопласт, минеральная вата, пенополиуретан и т.п., а наибольший эффект от керамических покрытий возможен при применении их в конструкциях с замкнутыми воздушными прослойками.

Теплоотражающая способность теплоизоляционных покрытий по данным исследований, проведенных в ОАО «Институт стекла» (г. Москва), находится в области относительно коротких волн, характерных для ультрафиолетового излучения. Поэтому данные материалы можно рекомендовать для использования в качестве защиты полимерных материалов, таких как пенополиуретан.

3.5. Экспериментальное исследование теплозащитных характеристик ограждающих конструкций с применением экранной изоляции

Для определения теплотехнических характеристик строительных конструкций нередко приходится создавать искусственным путём климатические условия, в которых эти конструкции будут в дальнейшем эксплуатироваться. В этом случае для эксперимента используются климатические камеры, которые позволяют имитировать агрессивное воздействие окружающей среды, например, высокие и низкие температуры.

С целью определения сопротивления теплопередаче сэндвич-панели, представленной на рис. 3.7, был проведён эксперимент с использованием климатической камеры испытательного центра «Самарастройиспытания», организованного на базе СГАСУ.

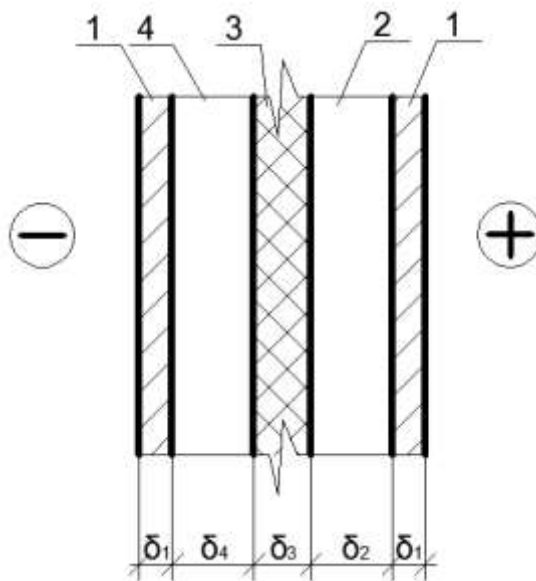


Рис. 3.7. Рассматриваемая конструкция сэндвич-панели

1 – плита древесно-стружечная; 2 – воздушная прослойка; 3 – материал Aluthermo QUATRO; 4 – воздушная прослойка.

Принципиальная схема климатической камеры представлена на рис. 3.8. Климатическая камера имеет рабочий проём 1700x1700 мм и температуру в холодном отсеке, достигаемой при испытании, равную -25°C .

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций» [36].

Изготовленный фрагмент сэндвич-панели соответствовал конструкции, описанной в приведённом выше теплотехническом расчёте, и выдерживался в помещении с температурой воздуха $17-20^{\circ}\text{C}$ и относительной влажностью 45-55%. Перед проведением испытаний фрагмент панели устанавливался в климатическую камеру. Зазоры по контуру камеры запенивались пенофлэксом.

На внутренней и наружной поверхностях фрагмента конструкции устанавливались хромель-копелевые термодары. В качестве измерителей тепловых потоков использовались тепломеры ИТП-11 и ИПП-2.

Приведенное сопротивление теплопередаче определялось по формуле:

$$R_{0np} = R_{\epsilon} + R_{\kappa} + R_{\eta} = \frac{t_{\epsilon} - \tau_{\epsilon}}{q} + \frac{\tau_{\epsilon} - \tau_{\eta}}{q} + \frac{\tau_{\eta} - t_{\eta}}{q}, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Bm} \quad (3.20)$$

где R_{ϵ} , R_{η} – термические сопротивления внутренней и наружной поверхности, соответственно, $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Bm}$;

t_{ϵ} , t_{η} – средние за период измерений температуры внутреннего и наружного воздуха, $^\circ C$;

τ_{ϵ} , τ_{η} – средние за период измерений температуры внутренней и наружной поверхностей фрагмента, соответственно, $^\circ C$;

q – средняя за период измерений плотность теплового потока, проходящего через фрагмент конструкции, $Вт/м^2$.

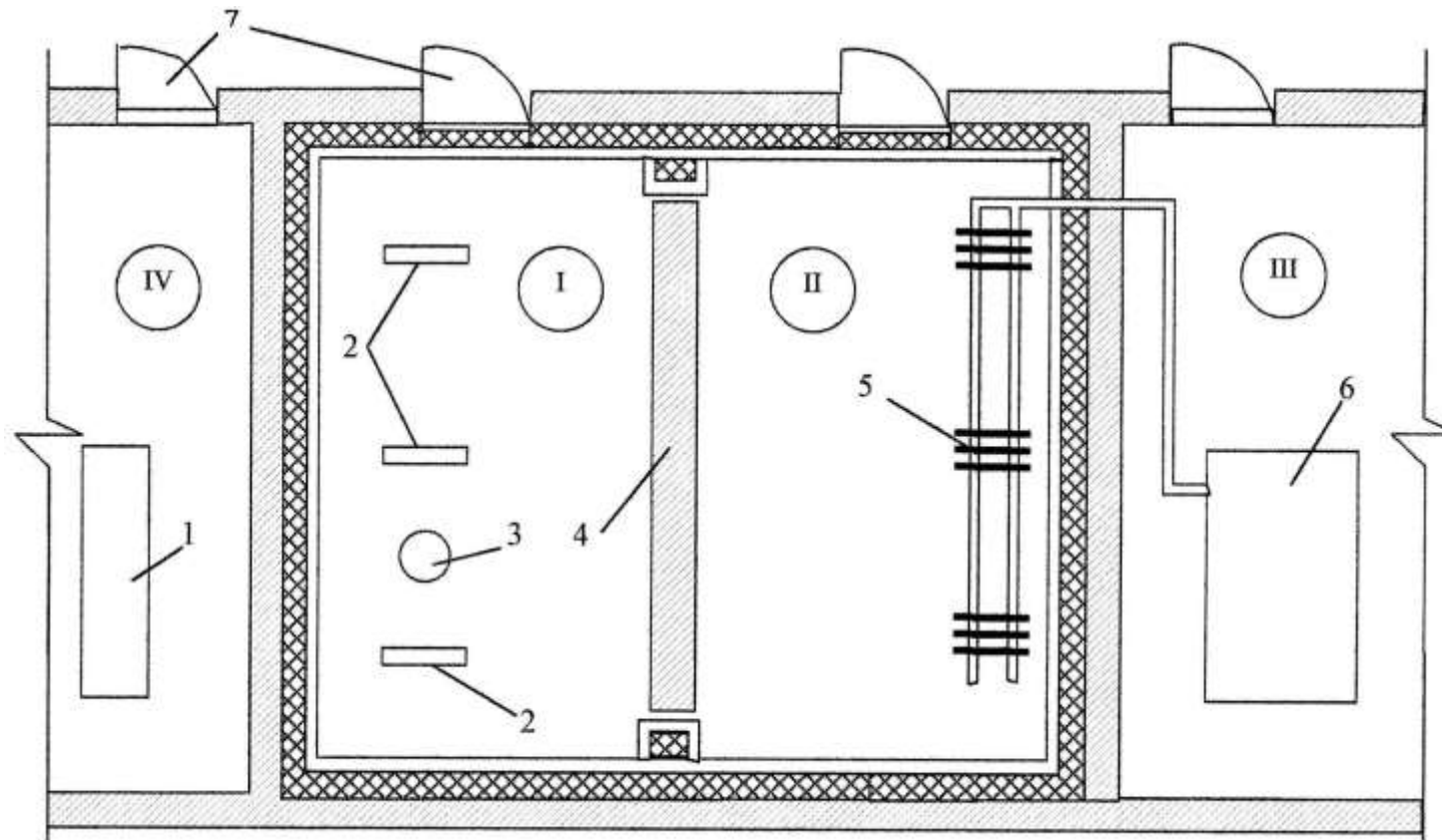


Рис. 3.8. Схема климатической камеры

I – тёплое помещение камеры; II – холодное помещение камеры; III – машинный зал; IV – помещение с измерительной аппаратурой; 1 – система автоматического сбора данных; 2 – нагревательные приборы; 3 – увлажняющее оборудование; 4 – испытываемый фрагмент сэндвич-панели; 5 – испаритель; 6 – холодильная установка; 7 – утеплённые герметичные двери.

В результате сопротивление теплопередаче рассматриваемой конструкции составило $1,28 \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}}$.

Необходимо отметить, что на теплопроводность воздушной прослойки существенно влияет направление теплового потока через конструкцию.

С этой целью были проведены экспериментальные исследования по определению теплопроводности воздушной прослойки в зависимости от направления теплового потока.

Схема рассматриваемой конструкции представлена на рис. 3.9.

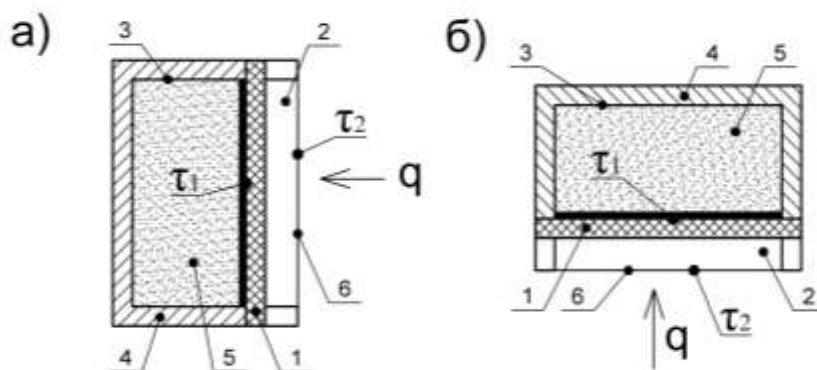


Рис. 3.9. Схема рассматриваемой конструкции: а – с вертикальной воздушной прослойкой; б – с горизонтальной воздушной прослойкой (тепловой поток направлен снизу-вверх)

В данном эксперименте использовался металлический короб 3. Одна из лицевых граней короба утеплялась экранной теплоизоляцией 1. Остальная поверхность короба для снижения тепловых потерь в окружающую среду была защищена слоем тепловой изоляции. На наружных поверхностях металлического короба и оцинкованного листа 6 устанавливались хромель-копелевые термопары. Для создания разницы температур на этих поверхностях пространство короба заполнялось снегом 5.

Измерение теплового потока производилось тепломером ИПП-2.

Толщины воздушных прослоек при проведении эксперимента принимались равными 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 мм. В экспериментальных исследованиях использовалась экранная теплоизоляция, указанная в п 3. 3.

Суммарное термическое сопротивление теплопередаче конструкции определялось по формуле:

$$R_{0np} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{q}, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Вт} \quad (3.21)$$

где τ_1, τ_2 – средние за период измерений температуры наружных поверхностей короба и оцинкованного листа фрагмента, соответственно, $^\circ C$;

q – средняя за период измерений плотность теплового потока, проходящего через фрагмент конструкции, $Вт/м^2$.

Результаты теплотехнических испытаний фрагмента конструкции при направлении теплового потока согласно рис. 3.9а сведены в таблицу 3.8. Также представлена обработка данных в виде графических зависимостей (рис. 3.10-3.11).

Таблица 3.8

Результаты теплотехнических исследований вертикальных воздушных прослоек

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки $R_v, (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$, в сочетании с материалом			Среднее значение термического сопротивления воздушной прослойки R_{cp} , $(m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$	Среднее значение теплопроводности воздушной прослойки λ_{cp} , $Вт/(m \cdot ^\circ C)$
	Aluthermo QUATRO	Фольгоизол	Пенофол		
10	0,320	0,320	0,310	0,317	0,032
15	0,367	0,380	0,381	0,376	0,040
20	0,389	0,392	0,410	0,397	0,050
25	0,415	0,424	0,425	0,421	0,059
30	0,420	0,435	0,429	0,428	0,070
35	0,438	0,445	0,442	0,442	0,079
40	0,440	0,450	0,451	0,447	0,089

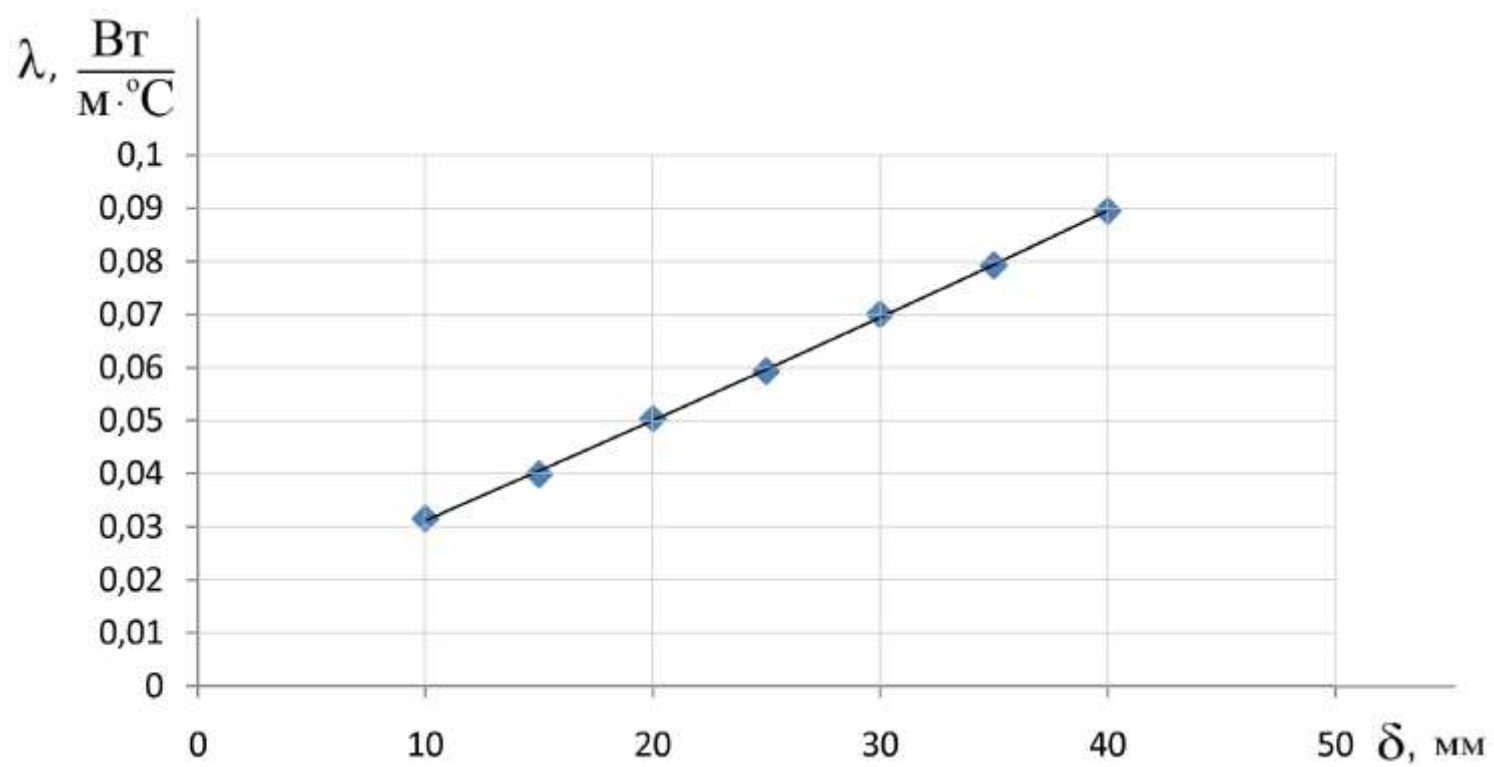


Рис. 3.10. Зависимость теплопроводности вертикальной воздушной прослойки от её толщины

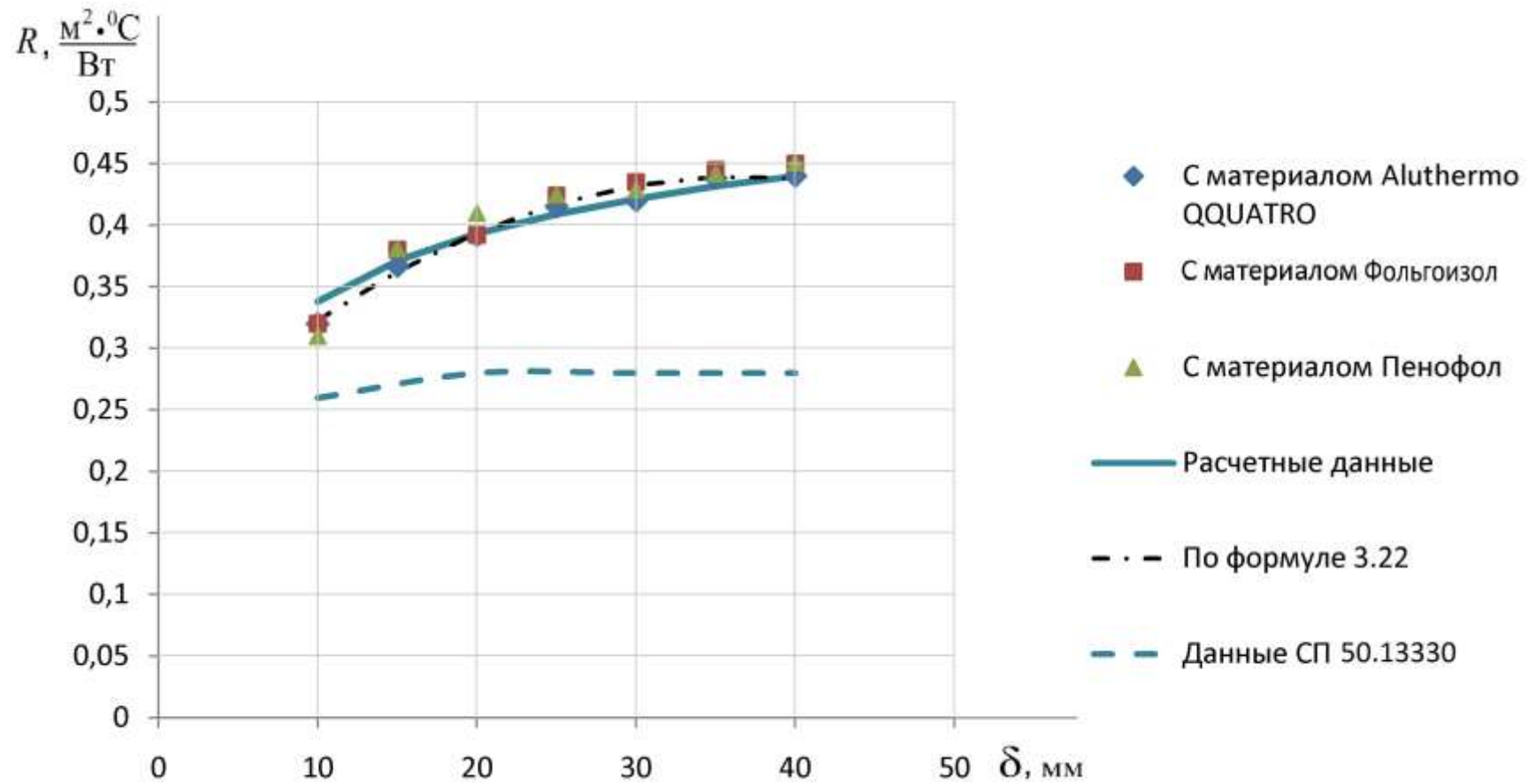


Рис. 3.11. Зависимость термического сопротивления вертикальной воздушной прослойки от её толщины

Анализируя полученные данные, можно выразить зависимость, по которой будет определяться термическое сопротивление вертикальных экранированных воздушных прослоек. Эта зависимость будет иметь вид:

$$R_{\delta} = 1,667 \cdot 10^{-5} \delta^3 - 0,0015 \delta^2 + 0,043 \delta, \quad (3.22)$$

где R_{δ} , δ – то же, что и в формуле (3.11).

Результаты экспериментальных исследований фрагмента конструкции при направлении теплового потока снизу-вверх, как это показано на рис. 3.9б, сведены в таблицу 3.9. Графическая обработка полученных данных представлена на рис. 3.12-3.13.

Таблица 3.9

Результаты теплотехнических исследований горизонтальных воздушных прослоек при направлении теплового потока снизу-вверх

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки R_v , ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, в сочетании с материалом			Среднее значение термического сопротивления воздушной прослойки $R_{\text{ср}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Среднее значение теплопроводности воздушной прослойки $\lambda_{\text{ср}}$, Вт/($\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$)
	Aluthermo QUATRO	Фольгоизол	Пенофол		
10	0,343	0,344	0,335	0,341	0,029
15	0,390	0,408	0,409	0,402	0,037
20	0,418	0,423	0,440	0,427	0,047
25	0,445	0,451	0,456	0,451	0,055
30	0,449	0,467	0,460	0,459	0,065
35	0,469	0,475	0,472	0,472	0,074
40	0,471	0,482	0,481	0,478	0,084

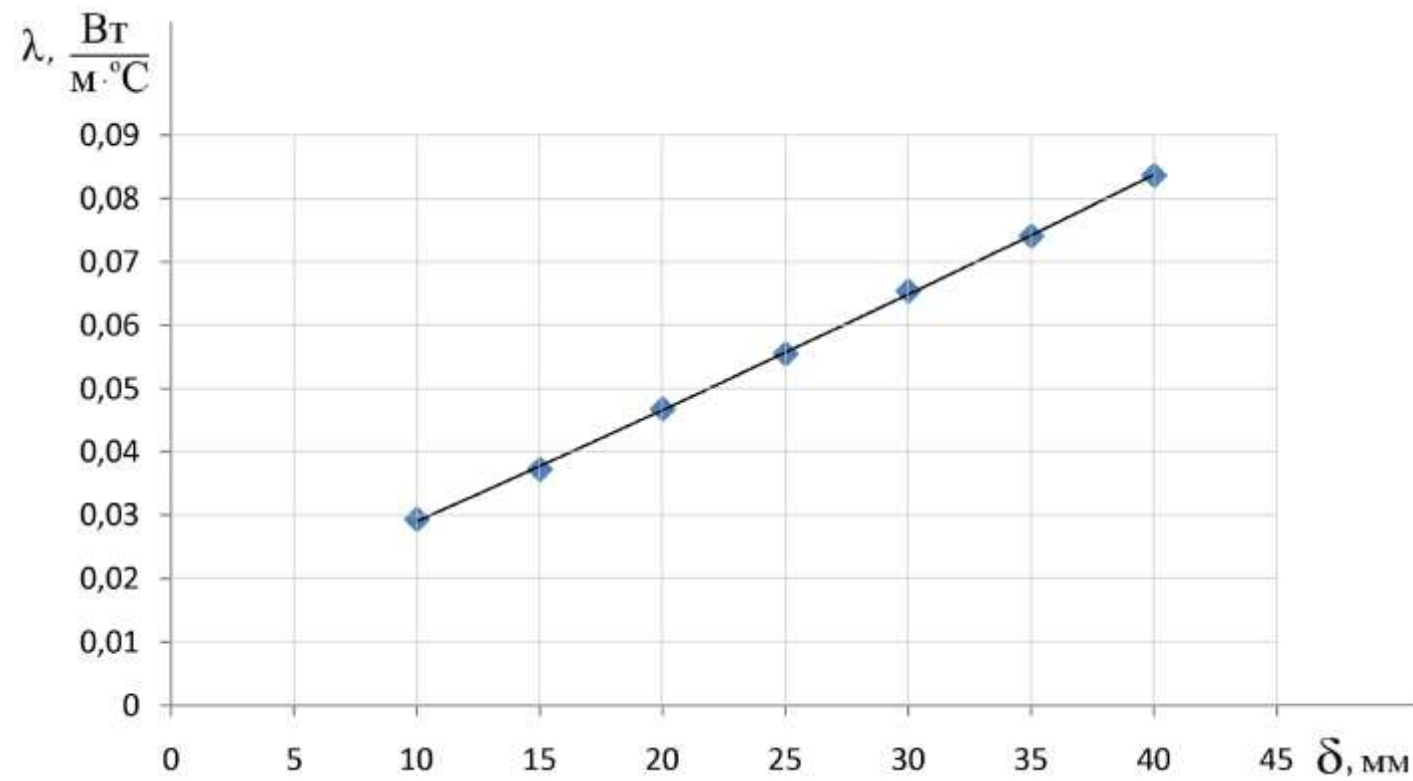


Рис. 3.12. Зависимость теплопроводности вертикальной воздушной прослойки от её толщины при использовании материалов экранной теплоизоляции

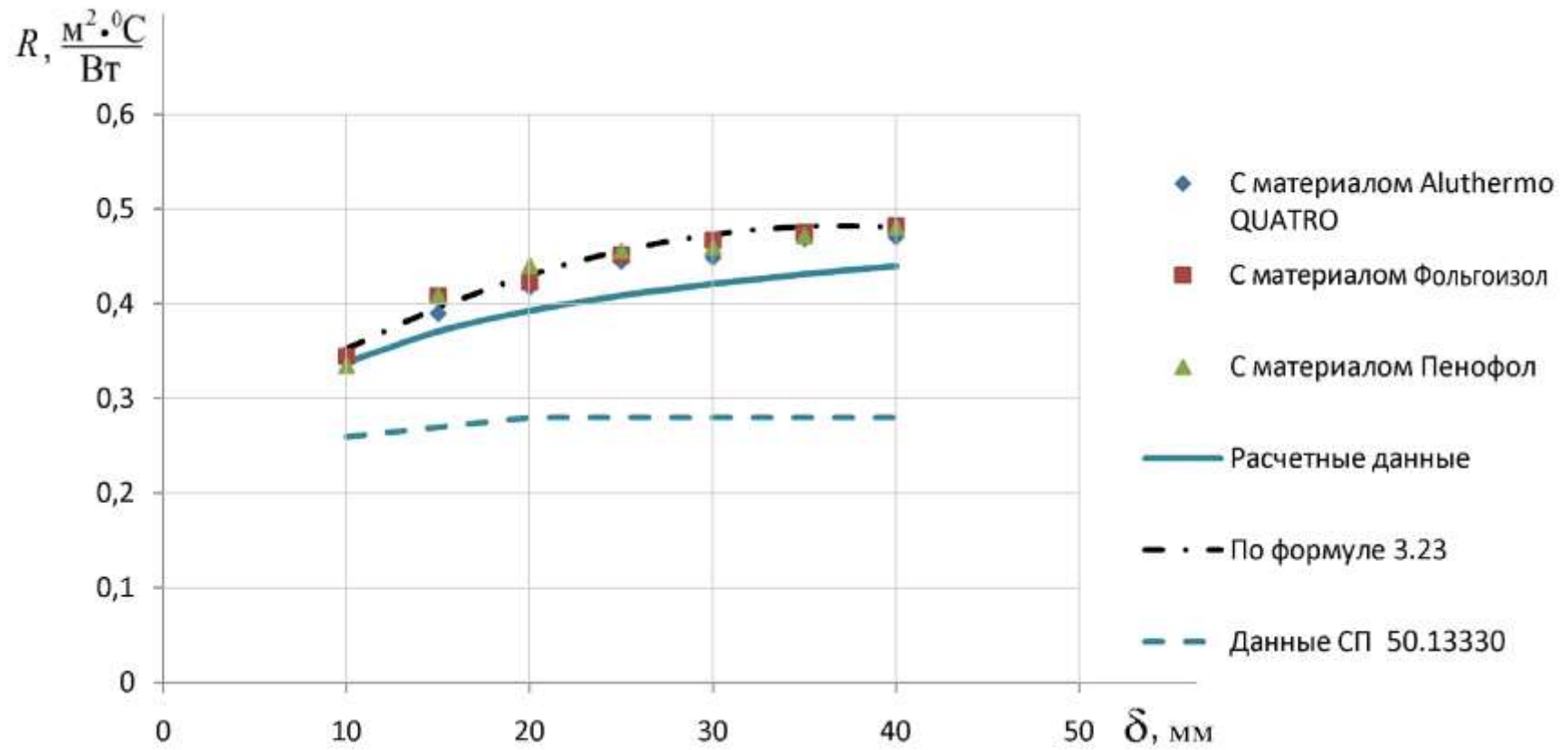


Рис. 3.13. Зависимость термического сопротивления горизонтальной воздушной прослойки от её толщины при направлении теплового потока снизу-вверх

Зависимость, по которой будет определяться термическое сопротивление горизонтальных экранированных воздушных прослоек при прохождении через них теплового потока в направлении снизу-вверх, будет иметь вид:

$$R_g = 1,844 \cdot 10^{-5} \delta^3 - 0,0016 \delta^2 + 0,046 \delta, \quad (3.23)$$

где R_g , δ – то же, что и в формуле (3.11).

Сравнивая данные (рис. 3.4, 3.11, 3.13), полученные экспериментальным путем, с данными [104], очевидно, что при толщине воздушной прослойки 10 мм значения термических сопротивлений во всех случаях практически совпадают. При дальнейшем увеличении толщины воздушной прослойки, как это видно на графике, наблюдается расхождение в 1,3-2,9 раза между экспериментальными данными и данными [103, 104].

3.6. Выводы по главе 3

1. Разработана методика экспериментального исследования по определению теплопроводности материалов, применяемых в качестве экранной изоляции, а также методика исследования в лабораторных условиях теплозащитных свойств ограждающих конструкций с применением подобных материалов.

2. Получены новые экспериментальные данные по теплопроводности материалов, применяемых в качестве экранной теплоизоляции, а также значения термических сопротивлений воздушных неветилируемых прослоек с применением подобных материалов.

Экспериментальные значения термических сопротивлений горизонтальных воздушных прослоек при направлении теплового потока сверху-вниз существенно отличаются от значений, полученных с помощью инженерной методики, изложенной в главе 2. Поэтому в целях корректировки расчетных значений рекомендуется использовать поправочный коэффициент μ (таблица 3.3).

3. Разработана методика экспериментального исследования теплопроводности теплоизоляционных керамических покрытий.

4. Получены экспериментальные данные по теплопроводности теплоизоляционных керамических покрытий. Анализ проведенных исследований показывает, что большую часть величины сопротивления теплопередачи рассматриваемой конструкции с применением керамических покрытий составляет термическое сопротивление воздушной прослойки, а термическое сопротивление самого покрытия весьма незначительно. Таким образом, керамические покрытия не способны заменить традиционные теплоизоляционные материалы. В области строительства подобные покрытия могут быть рекомендованы для использования в качестве защиты полимерных материалов, таких как пенополиуретан.

ГЛАВА 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭКРАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В данной главе приводится технико-экономическое обоснование применения экранной тепловой изоляции в конструкции наружной стены. Применение экранной изоляции рассмотрено при строительстве жилого многоэтажного дома, состоящего из трех секций и расположенного в г. Самаре. При сравнении рассматриваются конструкции наружных стен с утеплителем из напыляемого пенополиуретана.

На основании математического моделирования процесса теплопередачи через ограждающие конструкции, утепленные с помощью экранной тепловой изоляции, и экспериментальных исследований, изложенных в главе 3, рассмотрена область практического применения подобных материалов в ограждающих конструкциях зданий и сооружений.

4.1. Практическое применение экранной тепловой изоляции в ограждающих конструкциях

В силу своих физико-механических свойств теплоизоляция на основе вспененного полиэтилена является весьма эффективной, надёжной и простой в монтаже. По своим теплотехническим характеристикам полиэтилен превосходит многие традиционные теплоизоляционные материалы. Кроме того, к достоинствам вспененного полиэтилена можно отнести то, что этот материал гигиеничен, трудно горюч, не впитывает влагу, лёгок, применим для эксплуатации в различных климатических условиях.

В область применения такого материала в сфере гражданского и промышленного строительства входит его использование в качестве основного или вспомогательного утеплителя. В частности, целесообразно использование такой теплоизоляции при утеплении перекрытий над неотапливаемыми

подвалами и над проездами, полов на лагах, а также чердачных покрытий, подкровельного пространства тёплых чердаков.

Известными производителями теплоизоляционных материалов, компаниями URSA и ISOVER, представлены рулонные утеплители из минеральной ваты, кашированные алюминиевой фольгой. Материалы на основе минеральной ваты легки, относятся к классу негорючих, гигиеничны, обладают хорошими теплотехническими свойствами. Данный утеплитель широко используется в горизонтальных строительных конструкциях для утепления полов над холодными подвалами и проездами, а также чердачных перекрытий.

Важно отметить, что направление теплового потока через воздушную прослойку существенно влияет на значение эквивалентного коэффициента теплопроводности. Поэтому рассмотрим возможные варианты строительных конструкций с воздушными прослойками и утеплённых экранной изоляцией.

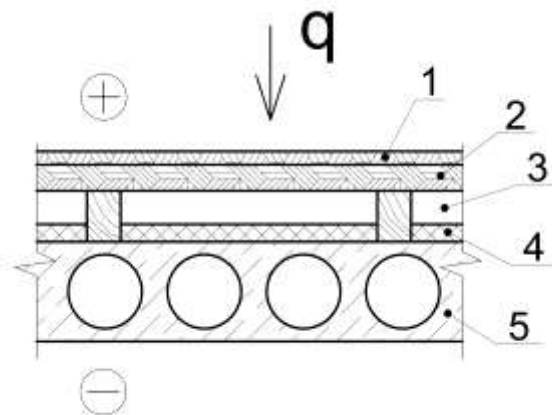


Рис. 4.1. Схема конструкции полов на лагах

1 – покрытие пола; 2 – древесноволокнистая плита; 3 – воздушная прослойка; 4 – экранная изоляция; 5 – железобетонная плита.

При направлении теплового потока сверху-вниз через конструкцию, представленную на рис. 4.1, в замкнутой прослойке течение воздуха может отсутствовать и тогда конвективная составляющая в процессе теплопереноса учитываться не будет. Такие конструкции в строительстве могут

использоваться для устройства полов на лагах, перекрытий над неотапливаемыми подвалами и проездами.

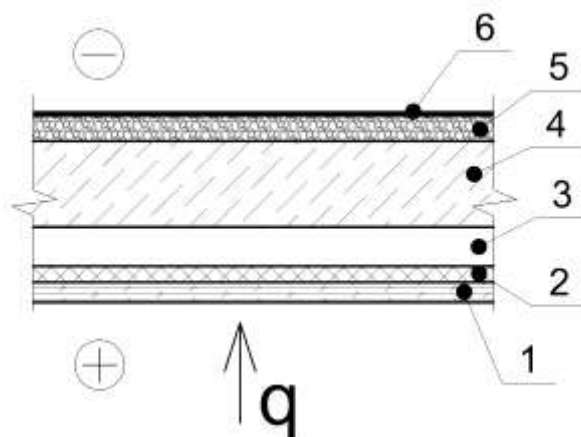


Рис. 4.2. Схема конструкции чердачного перекрытия

1 — цементно-магнелиевая плита; 2 — экранная изоляция; 3 — воздушная прослойка; 4 — железобетонная плита; 5 — слой керамзитобетона; 6 — гидроизоляционный слой.

В горизонтальной воздушной прослойке, когда тепловой поток направлен снизу-вверх, как это представлено на рис.4.2, нагретые частицы воздуха стремятся вверх, в результате чего возникают конвективные токи. В строительной практике использование подобных конструкций может быть рекомендовано при утеплении перекрытий над тёплым чердаком. Применение указанной выше конструкции позволяет существенно уменьшить толщину слоя керамзитобетона и, как следствие, снизить силовую нагрузку на фундамент.

В случае, представленном на рис. 4.3, аналогично предыдущему также следует учитывать конвективную составляющую. Ввиду того, что толщина воздушной прослойки в строительных конструкциях, как правило, невелика, то в последних двух случаях вследствие взаимного влияния пограничных тепловых и гидродинамических слоёв возникают внутренние циркуляционные контуры.

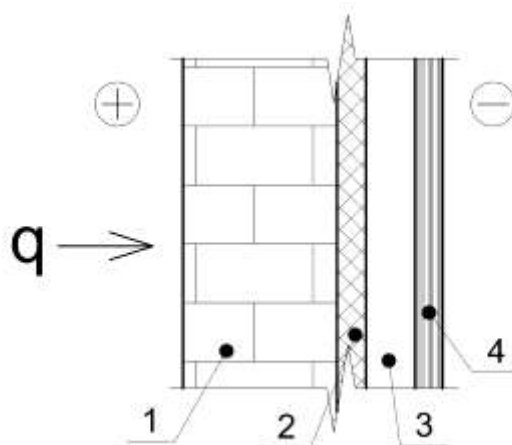


Рис. 4.3. Схема конструкции наружной стены

1 – кладка из стеновых камней; 2 – экранная изоляция; 3 – воздушная прослойка; 4 – облицовочный слой.

В современном строительстве широко используются стеновые камни из керамзитобетона плотностью $700-800 \text{ кг/м}^3$. Ограждающие конструкции из таких керамзитовых камней имеют достаточно высокую прочность. Однако подобные конструкции, как правило, не обеспечивают необходимое значение сопротивления теплопередаче.

Увеличение сопротивления теплопередаче за счёт изменения формы керамзитовых камней требует внесения значительных изменений в существующие технологические линии заводов по их изготовлению. Кроме того, часто возникает необходимость повышать сопротивление теплопередаче уже существующих подобных ограждающих конструкций.

Одним из способов повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций является применение экранной тепловой изоляции.

Приведём теплотехнический расчёт наружной стены жилого здания, выполненной с применением наиболее распространенных в современном строительстве стеновых камней из керамзитобетона плотностью $700-800 \text{ кг/м}^3$, представленных на рис. 4.4. Расчёт выполним для г. Самары.

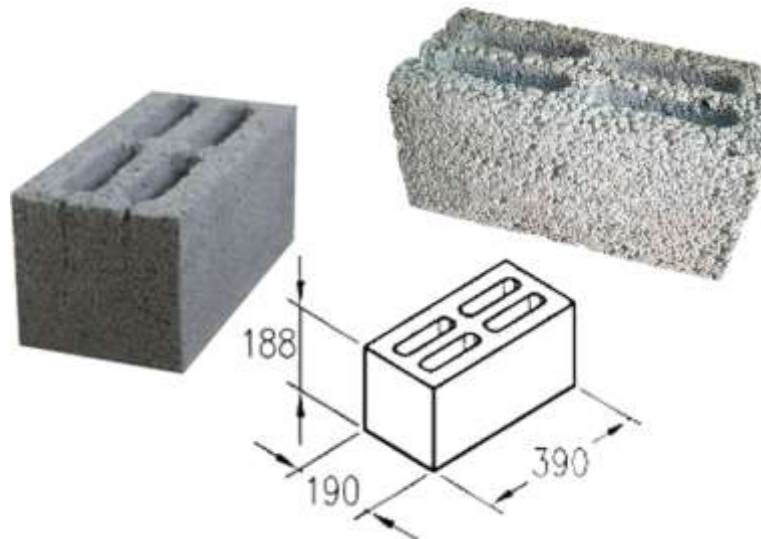


Рис. 4.4. Рассматриваемые стеновые камни из керамзитобетона

Фрагмент рассматриваемой ограждающей конструкции представлен на рис. 4.5.

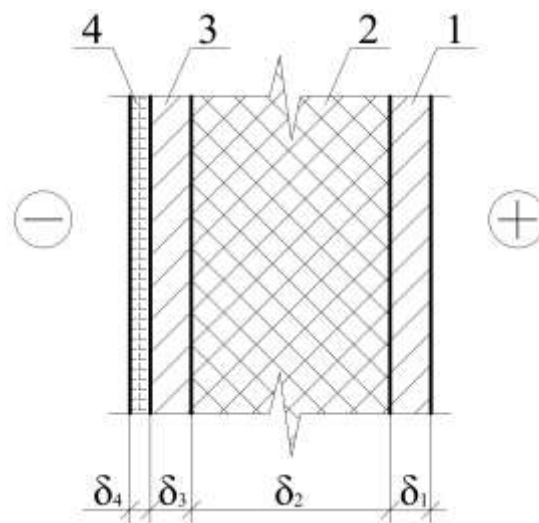


Рис. 4.5. Фрагмент наружной стены

1 – цементно-песчаный раствор

$$\delta_1 = 0,010 \text{ м}; \gamma_1 = 1800 \text{ кг/м}^3; \lambda_1 = 0,76 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)};$$

2 – кладка из керамзитовых камней на цементно-песчаном растворе

$$\delta_2 = 0,39 \text{ м}; \gamma_2 = 790 \text{ кг/м}^3; \lambda_2 = 0,249 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)};$$

3 – цементно-песчаный раствор

$$\delta_3 = 0,010 \text{ м}; \gamma_3 = 1800 \text{ кг/м}^3; \lambda_3 = 0,76 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)};$$

4 – фактурное покрытие фасадной системы

$$\delta_4 = 0,005 \text{ м}; \gamma_4 = 1800 \text{ кг/м}^3; \lambda_4 = 0,7 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}.$$

В расчёте использованы следующие обозначения:

δ – толщина слоя, м; γ – плотность материала в сухом состоянии, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности материала в условиях эксплуатации
А, Вт/(м[°]С);

$R_0^{\text{пр}}$ – приведенное сопротивление теплопередаче, (м²°С)/Вт;

$R_0^{\text{усл}}$ – сопротивление теплопередаче гладкой стены, (м²°С)/Вт;

r – коэффициент теплотехнической однородности, принимаемый
согласно [103];

$\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ – значения коэффициентов теплоотдачи со стороны внутренней и
наружной поверхности соответственно, Вт/(м²°С);

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \text{ термическое сопротивление слоя, (м}^2\text{°С)/Вт.}$$

1. Определяем требуемое сопротивление теплопередаче, исходя из
санитарно-гигиенических и комфортных условий согласно [104]:

$$R_{01}^{\text{норм}} = \frac{n(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\Delta t^{\text{н}} \cdot \alpha_{\text{в}}} = \frac{1(20 + 30)}{4 \cdot 8,7} = 1,44 \text{ (м}^2\text{°С)/Вт},$$

где $\Delta t^{\text{н}}$ – нормируемый температурный перепад между температурой
внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$ и температурой внутренней поверхности ограждающей
конструкции $t_{\text{в}}$, °С, принимается по [104].

2. Вычисляем нормируемое значение приведенного сопротивления
теплопередаче наружной стены согласно [104] по формуле:

$$R_{02}^{\text{норм}} = R_0^{\text{тр}} m_p,$$

где $R_0^{\text{тр}}$ – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче
ограждающей конструкции, (м²·°С)/Вт, принимаемое в зависимости от градусо-

суток отопительного периода (ГСОП), °С·сут/год, региона строительства и определяемое по таблице 3 [104];

m_p - коэффициент, учитывающий особенности строительства региона, для Самарской области для наружных стен $m_p = 0,63$.

$$\text{ГСОП} = (t_b - t_{\text{оп}}) \cdot Z_{\text{оп}} = (20 + 5,2) \cdot 203 = 5117 \text{ °С} \cdot \text{сут},$$

где $t_{\text{оп}}$ – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С, принимается по [102];

$Z_{\text{оп}}$ – продолжительность отопительного периода, сут, принимается по [105].

По таблице 3 [104] для наружных стен жилых зданий определяем значение величины $R_0^{\text{тр}}$:

$$R_0^{\text{тр}} = 3,19 \text{ (м}^2\text{°С)/Вт}.$$

Тогда

$$R_{02}^{\text{норм}} = 3,19 \cdot 0,63 = 2,0 \text{ (м}^2\text{°С)/Вт}.$$

3. Определяем сопротивление теплопередаче глади наружной стены:

$$R_0^{\text{усл}} = \frac{1}{\alpha_b} + \sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,01}{0,76} + \frac{0,39}{0,249} + \frac{0,01}{0,76} + \frac{0,005}{0,7} + \frac{1}{23} = 1,75 \text{ (м}^2\text{°С)/Вт}.$$

4. Находим значение приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены при $r = 0,9$:

$$R_0^{\text{пр}} = r R_0^{\text{усл}} = 0,9 \cdot 1,75 = 1,58 \text{ (м}^2\text{°С)/Вт}.$$

Анализируя результаты расчёта, можно сделать вывод о том, что приведенное сопротивление теплопередаче рассматриваемой конструкции наружной стены ниже сопротивления теплопередаче, соответствующего

условиям энергосбережения. Поэтому для выполнения нормативных требований необходимо повышение теплозащитных свойств рассматриваемой конструкции за счёт применения экранной изоляции.

Фрагмент наружной стены, утеплённой с помощью экранной изоляции, представлен на рис. 4.6.

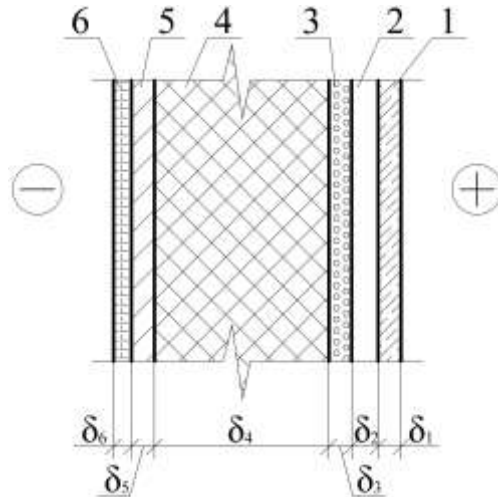


Рис. 4.6. Фрагмент утеплённой наружной стены

1 – гипсокартонные листы

$\delta_1 = 0,010 \text{ м}; \gamma_1 = 1050 \text{ кг/м}^3; \lambda_1 = 0,34 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$;

2 – воздушная прослойка

$\delta_2 = 0,015 \text{ м}$

3 – пенофол

$\delta_3 = 0,010 \text{ м}; \gamma_3 = 54 \text{ кг/м}^3; \lambda_3 = 0,047 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$;

4 – кладка из керамзитовых камней на цементно-песчаном растворе

$\delta_4 = 0,39 \text{ м}; \gamma_4 = 790 \text{ кг/м}^3; \lambda_4 = 0,249 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$;

5 – цементно-песчаный раствор

$\delta_5 = 0,010 \text{ м}; \gamma_5 = 1800 \text{ кг/м}^3; \lambda_5 = 0,76 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$;

6 – фактурное покрытие фасадной системы

$\delta_6 = 0,005 \text{ м}; \gamma_6 = 1800 \text{ кг/м}^3; \lambda_6 = 0,7 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$

Зная сопротивление теплопередаче гладки неутеплённой наружной стены и нормируемое значение сопротивления теплопередаче при $r=0,9$ по

номограмме, представленной на рис. 2.4, определим необходимую толщину воздушной прослойки. Для выполнения требований теплозащиты достаточно применение воздушной прослойки толщиной 10 мм, однако из конструктивных соображений примем в расчёт воздушную прослойку толщиной 15 мм. Значение эквивалентного коэффициента теплопроводности по результатам расчёта составило 0,038 Вт/(м°С).

Определим сопротивление теплопередаче глади утеплённой стены:

$$R_0^{\text{усл}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,01}{0,34} + \frac{0,015}{0,038} + \frac{0,01}{0,047} + \frac{0,39}{0,249} + \frac{0,01}{0,76} + \frac{0,005}{0,7} + \frac{1}{23} = 2,41 (\text{м}^2\text{°С})/\text{Вт}.$$

Согласно [30, 104] расчёт приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций рекомендуется производить с использованием построения двумерных температурных полей. Для этого используем специально разработанную методику, базирующуюся на применение метода конечных элементов [45], реализованного с помощью специализированной программы THERM 6.3, предназначенной для решения двумерных задач теплопроводности и диффузии водяного пара в строительных ограждающих конструкциях здания.

На рис. 4.7 представлен фрагмент расчётной схемы утеплённой стены.

В результате расчёта получаем температурное поле в условиях эксплуатации А, представленное на рис. 4.8.

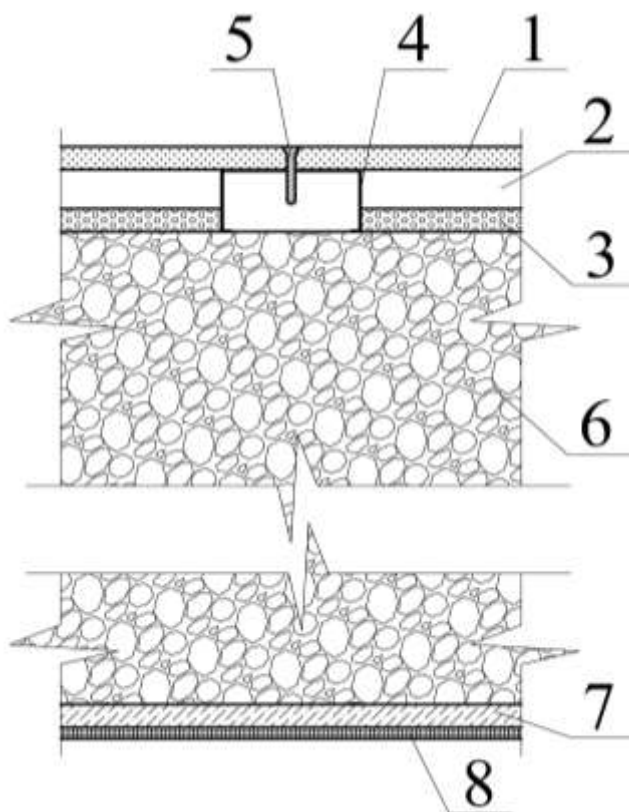


Рис. 4.7. Фрагмент расчётной схемы утеплённой наружной стены

1 – гипсокартонные листы; 2 – воздушная прослойка; 3 – пенофол; 4 –
металлический профиль; 5 – саморез; 6 – кладка из керамзитовых камней на
цементно-песчаном растворе; 7 – цементно-песчаный раствор; 8 - фактурное
покрытие фасадной системы

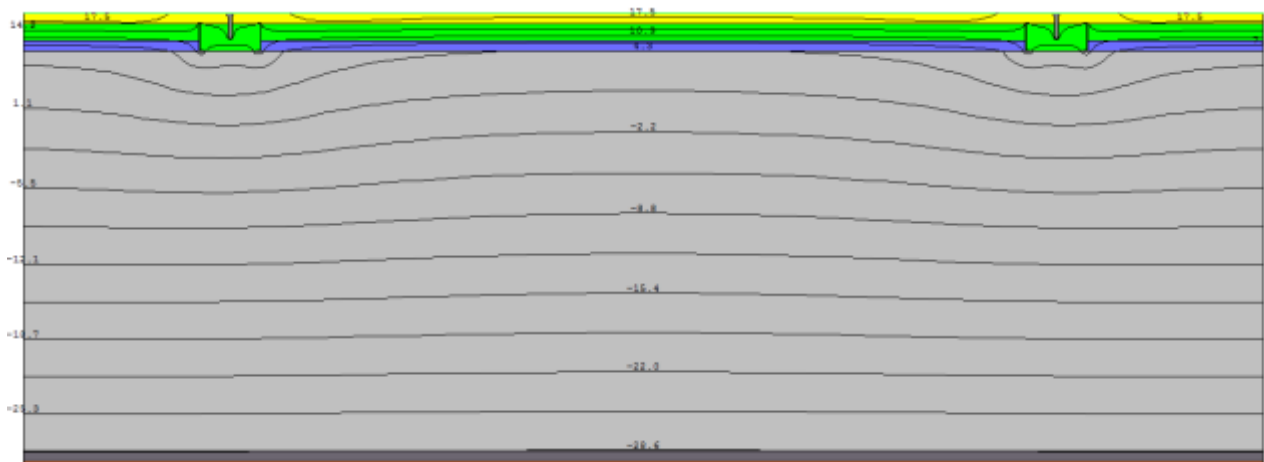


Рис. 4.8. Температурное поле во фрагменте утеплённой наружной стены

Приведенное сопротивление теплопередаче определяем по формуле:

$$R_{\text{пр}} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{\alpha_{\text{в}}(t_{\text{в}} - \tau_{\text{в.ср}})}, (\text{м}^2\text{°C})/\text{Вт},$$

где $\tau_{\text{в.ср.}}$ – средняя температура, °C, внутренней поверхности ограждающей конструкции, рассчитывается на основе полученных температурных полей, $\tau_{\text{в.ср.}}=17,4$ °C.

Тогда

$$R_{\text{пр}} = \frac{20 - (-30)}{8,7(20 - 17,4)} = 2,21 (\text{м}^2\text{°C})/\text{Вт}.$$

Как показали результаты расчёта, приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента наружной стены, утеплённой с помощью экранной изоляции, выше нормативного значения. Предлагаемая наружная стена удовлетворяет современным санитарно-гигиеническим, комфортным условиям и требованиям энергосбережения.

Принятие федерального закона [81] в сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства направлено на существенное повышение уровня тепловой защиты зданий и сооружений. Однако требование данного закона не распространяется на здания и сооружения культурного и исторического наследия, которые в свою очередь наряду со всеми остальными зданиями являются потребителями тепловой энергии.

В СП [104] указано, что уровень тепловой защиты для упомянутых выше зданий может устанавливаться в соответствии с действующими нормативами в каждом конкретном случае с учетом их исторической ценности при согласовании с соответствующими органами государственного контроля. При этом обязательным является соблюдение норм, определяемых исходя из санитарно-гигиенических и комфортных условий, что позволяет избежать

выпадения конденсата на внутренних поверхностях наружных стен и обеспечить благоприятный влажностный режим ограждающих конструкций.

При реконструкции или капитальном ремонте зданий, представляющих архитектурную или историческую ценность, утепление стен снаружи не представляется возможным. Поэтому с целью сохранения внешнего исторического вида здания целесообразно использовать систему внутреннего утепления, при которой теплоизоляция расположена с внутренней стороны ограждающей конструкции. Применение подобной системы утепления позволяет сохранить первоначальную наружную отделку здания. Однако при этом следует учитывать ряд ограничений, связанных с потерей полезной площади помещений и необходимости создания пароизоляционного слоя на внутренней поверхности утеплителя.

В связи с тем, что в г.Самаре насчитывается 1800 памятников архитектуры, проблемы реконструкции и капитального ремонта подобных объектов являются весьма актуальными. Одним из объектов культурного наследия является Самарский государственный академический театр драмы (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Общий вид Самарского государственного академического театра драмы

Наружные стены 1-го этажа части здания 1888 г. постройки выполнены в виде кладки из керамического кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной 850 и 1760 мм, оштукатуренные изнутри известково-песчаным раствором толщиной 20 мм.

Стены бельэтажа исторической части здания выполнены в виде кладки из керамического кирпича толщиной 810 мм, оштукатуренной изнутри известково-песчаным раствором толщиной 20 мм.

Наружные стены 1-го, 2-го этажей и части здания 1967 года постройки выполнены в виде кладки из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной 640 мм, бельэтажа – в виде кладки из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной 510 мм. Изнутри они оштукатурены известково-песчаным раствором толщиной 20 мм.

Перед реконструкцией Самарского государственного академического театра драмы сотрудниками центра «Энергосбережения в строительстве» СГАСУ с целью определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций было проведено тепловизионное обследование данного объекта.

При проведении тепловизионного обследования руководствовались методикой определения теплотехнических показателей наружных ограждающих конструкций, приведенной в [29].

На рис. 4.10-4.12 представлены фотоснимки и термограммы фрагментов обследованных фасадов здания 1888 и 1967 годов постройки.

Результаты тепловизионного обследования представлены в таблице 4.1. Наряду с фактическими значениями сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций в таблице 4.1 приведены нормативные значения, исходя из санитарно-гигиенических условий для общественных зданий.

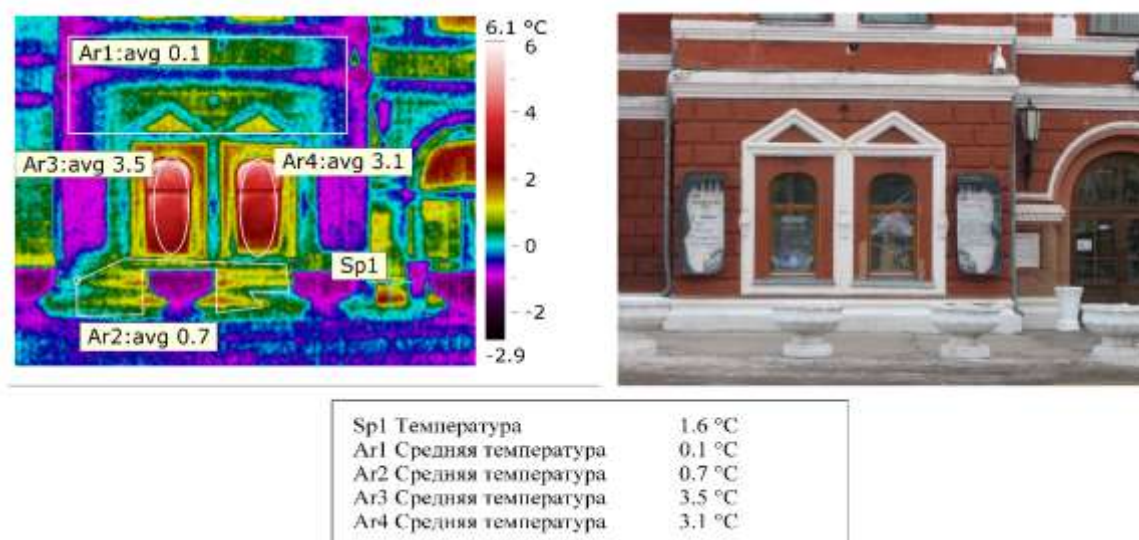


Рис. 4.10. Фрагмент ограждения в инфракрасном и видимом спектрах. Вид на фасад в осях1, Н-Т, 1 этаж (часть здания 1888 г. постройки)

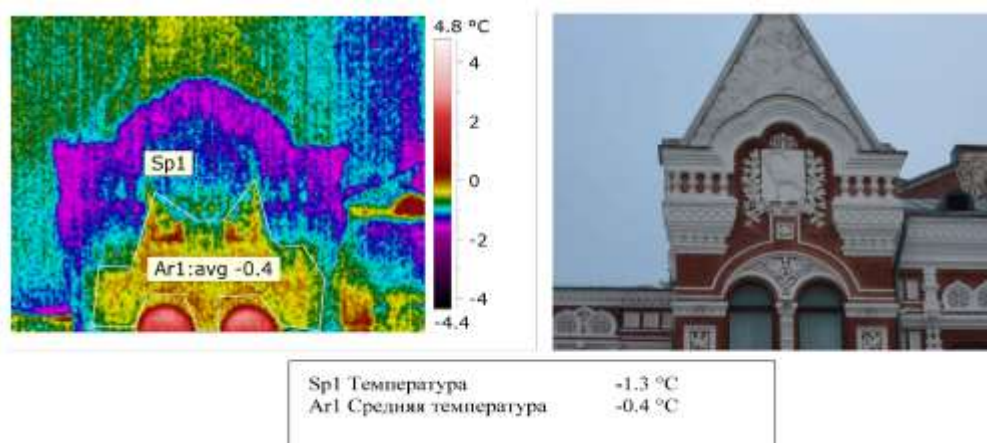


Рис. 4.11. Фрагмент ограждения в инфракрасном и видимом спектрах. Вид на фасад в осях1, Н-Т, верхняя часть (часть здания 1888 г. постройки)

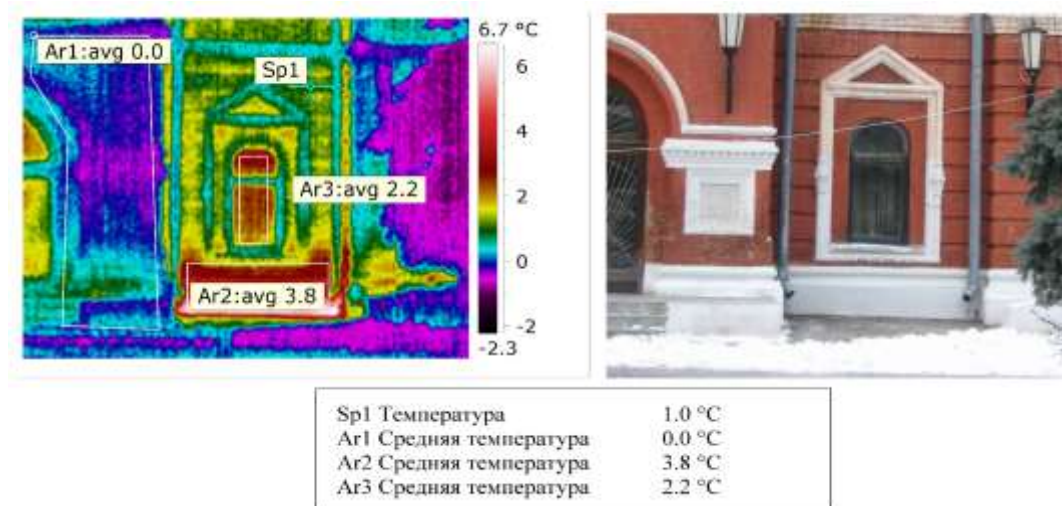


Рис. 4.12. Фрагмент ограждения в инфракрасном и видимом спектрах. Вид на фасад в осях Б, 11-13, 2 этаж (часть здания 1967 г. постройки)

Таблица 4.1

Результаты тепловизионного обследования

№ п/п	Вид ограждающей конструкции	Сопротивление теплопередаче, (м ² ·°C)/Вт	
		фактическое значение	нормативное значение
1	Наружная стена первого этажа в осях 1, И – П 1888 г. постройки толщиной 1780 мм	2,50	1,23
2	Наружная стена первого этажа части здания 1888 г. постройки толщиной 870 мм	1,35	1,23
3	Наружная стена бельэтажа части здания 1888 г. постройки толщиной 830 мм	1,30	1,23
4	Наружная стена первого, второго этажей части здания 1967 г. постройки толщиной 660 мм	0,95	1,23
5	Наружная стена бельэтажа части здания 1967 г. постройки толщиной 530 мм	0,82	1,23

На основе проведенного тепловизионного обследования строительных ограждающих конструкций здания Самарского государственного академического театра драмы было установлено, что наружные стены 1888 года постройки по теплозащитным характеристикам соответствуют современным

санитарно-гигиеническим и комфортным условиям, предъявляемым к общественным зданиям. Остальные ограждающие конструкции не соответствуют нормативным требованиям и нуждаются в дополнительном утеплении.

Из таблицы 4.1 видно, что наружная стена бельэтажа части здания 1967 г. Постройки толщиной 530 мм имеет наименьшее фактическое значение теплопередаче из всех наружных стен, для которых требуется дополнительное утепление. Поэтому рассмотрим возможный вариант утепления указанной наружной стены.

Фрагмент ограждающей конструкции с применением отражающей изоляции представлен на рис. 4.12.

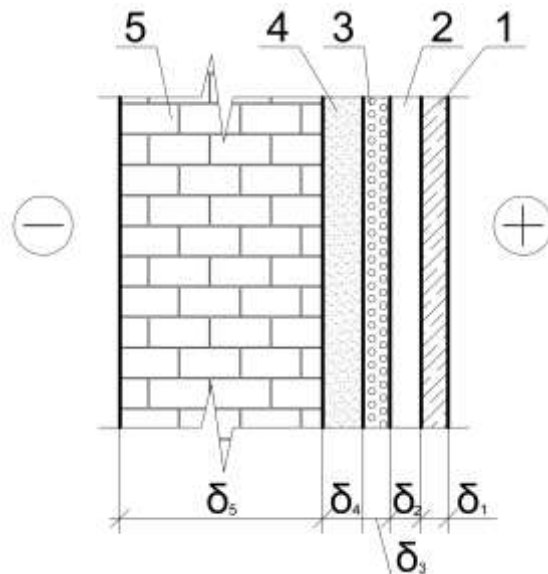


Рис. 4.13. Фрагмент утепленной наружной стены

1 – гипсокартонные листы ГКЛО

$\delta_1 = 0,020 \text{ м}$; $\gamma_1 = 800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_1 = 0,19 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$;

2 – воздушная прослойка

$\delta_2 = 0,010 \text{ м}$

3 – пенофол

$\delta_3 = 0,010 \text{ м}$; $\gamma_3 = 44 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_3 = 0,037 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$;

4 – известково-песчаный раствор

$$\delta_5 = 0,020 \text{ м}; \gamma_5 = 1600 \text{ кг/м}^3; \lambda_5 = 0,70 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)};$$

5 – кладка из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе

$$\delta_4 = 0,51 \text{ м}; \gamma_4 = 1800 \text{ кг/м}^3; \lambda_4 = 0,76 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}.$$

При известном значении фактического сопротивления теплопередаче неутепленной стены и нормативном значении сопротивления теплопередаче по номограмме, приведенной в работе [26], была определена требуемая толщина воздушной прослойки. Для достижения нормативного значения сопротивления теплопередаче достаточно применение воздушной прослойки толщиной 15 мм.

В ходе теплотехнического расчета по методике, изложенной в главе 2, теплопроводность воздушной прослойки составила 0,041 Вт/(м·°С), а сопротивление теплопередаче рассматриваемой конструкции – 1,71 (м²·°С)/Вт.

Результаты расчета показывают, что значение сопротивления теплопередаче фрагмента рассматриваемой ограждающей конструкции выше требуемого нормативного значения, равного 1,23 (м²·°С)/Вт.

Анализируя расчетные данные и данные экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что предлагаемая конструкция удовлетворяет санитарно-гигиеническим и комфортным условиям, а применение экранной тепловой изоляции в совокупности с невентилируемыми воздушными прослойками позволяет повысить теплозащитные характеристики наружных стен при реконструкции здания Самарского государственного академического театра драмы.

Предлагаемый авторами способ утепления конструкции наружной стены может быть рекомендован для широкого применения при реконструкции зданий культурного и исторического наследия.

В связи с тем, что алюминиевая фольга является практически паронепроницаемой, процесс диффузии водяного пара через конструкцию, представленную на рис. 4.13, должен отсутствовать при качественном выполнении теплоизоляционных работ.

Однако не следует исключить возможность разрушения в отдельных

местах алюминиевой фольги, являющейся эффективным пароизоляционным материалом, в процессе выполнения монтажных работ.

Поэтому необходимо произвести оценку возможности влагонакопления при повреждении или отсутствии алюминиевой фольги. Проверка на возможность конденсации влаги проводилась по расчетной методике, разработанной В. Г. Гагариным и В. В. Козловым и представленной в [104]. Подробный расчет представлен в приложении В.

Определение коэффициента паропроницаемости пенофола без алюминиевой фольги производилось в лаборатории теплотехнических испытаний СГАСУ согласно ГОСТ 25898-2012 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию». По результатам измерений, которые приведены в приложении Г, значение коэффициента паропроницаемости составило $\mu=0,0022$ мг/(м·ч·Па).

Расчет на влагонакопление в плоскости возможной конденсации установил, что накопление влаги за годовой период эксплуатации здания отсутствует и находится в пределах сорбционного увлажнения в период с отрицательными температурами.

4.2. Технико-экономическая оценка применения экранной изоляции в ограждающих конструкциях

Учитывая, что энергоёмкость российской экономики в 3-4 раза превышает удельную энергоёмкость экономики развитых стран Запада, осуществление мер по энерго- и ресурсосбережению является приоритетным направлением.

В связи с тем, что, начиная с 1996 г., были пересмотрены нормативные требования к уровню теплозащиты зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения, приведенное сопротивление ограждающих конструкций вновь строящихся и реконструируемых объектов в соответствии с

новыми нормативами [101, 104] существенно возросло. Стоит отметить, что принятие федерального закона №261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» относительно сферы строительства также направлено на существенное повышение уровня тепловой защиты зданий и сооружений.

Повышение энергоэффективности зданий за счет увеличения теплозащитных характеристик наружных ограждений подразумевает применение многослойных конструкций с слоем эффективного утеплителя. Увеличение толщины теплоизоляционного слоя позволяет улучшить теплотехнические свойства наружной стеновой панели, но вместе с тем возрастает ее цена.

Выбор теплоизоляционного материала следует рассматривать не только исходя из материальных затрат на его производство, но и с точки зрения охраны окружающей среды и рационального использования невозобновляемых энергоресурсов. Поэтому большой интерес представляет экономическая эффективность принятых энергосберегающих решений.

Вопросы, связанные с экономической эффективностью мер по повышению уровня теплозащиты ограждающих конструкций, являются актуальными в настоящее время. Это объясняется тем, что в результате правильного выбора теплоизоляции ограждений могут быть более успешно решены такие задачи, как снижение затрат на эксплуатацию зданий различного назначения, уменьшения расхода топлива, повышение производительности труда [13].

Согласно [42] экономическое обоснование целесообразности использования новых теплоизоляционных материалов в ограждениях осуществляется с помощью сравнительного анализа приведенных затрат на монтаж конструкции, утепленной традиционной изоляцией, с альтернативным вариантом [59].

Произведем экономическое сравнение двух теплоизоляционных систем для многоэтажных зданий жилого комплекса «Звезда», находящегося в г.Самаре.

При строительстве зданий утеплялись только те наружные стены, которые не удовлетворяли требованиям [101]. Варианты конструкций утепленных наружных стен представлены на рис. 4.14-4.15. Общая площадь утепляемых стен составила 7580,5 м².

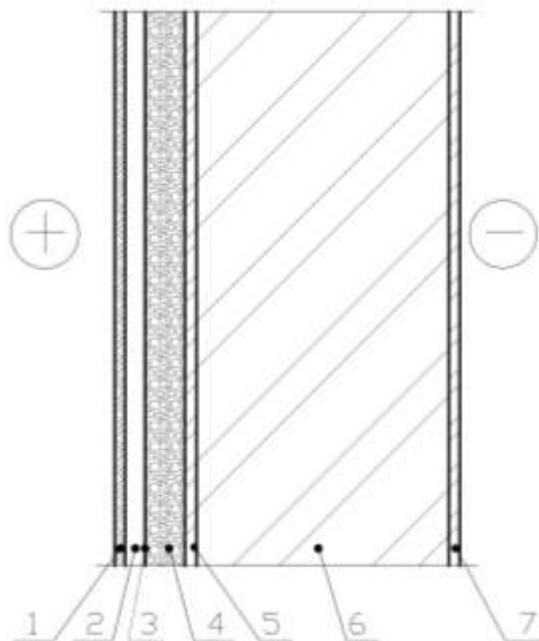


Рис. 4.14. Конструкция наружной стены с экранированной воздушной прослойкой (вариант I): 1 – лист ГКЛ; 2 – воздушная прослойка; 3 – алюминиевая фольга; 4 – плита ППУ; 5 – известково-песчаный раствор; 6 – кладка из силикатного кирпича; 7 – цементно-песчаный раствор

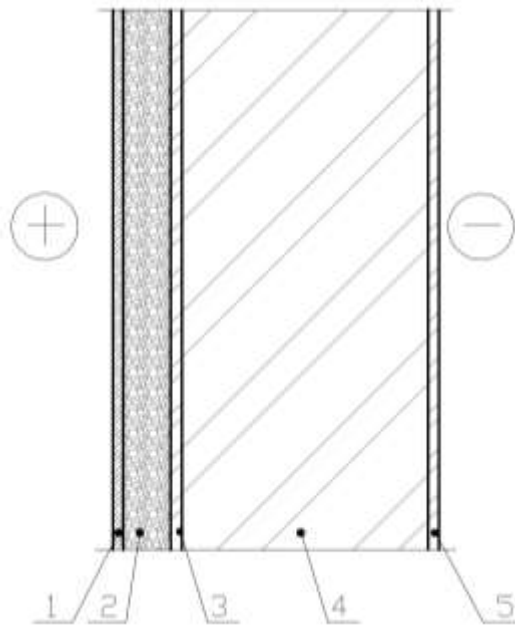


Рис. 4.15. Конструкция наружной стены с утеплителем без воздушной прослойки (вариант II): 1 – лист ГКЛ; 2 – плита ППУ; 3 – известково-песчаный раствор; 4 – кладка из силикатного кирпича; 5 – цементно-песчаный раствор

Количество топлива (газа), $\text{м}^3/\text{год}$, необходимого для поддержания работы системы отопления в течение отопительного периода, определяется по формуле

$$G_i = \frac{Q_h^y \cdot 10^3}{Q_n^p}, \quad (4.1)$$

где Q_h^y – расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период, МДж, определяется согласно [101];

Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания газа, $\text{кДж}/\text{м}^3$, $Q_n^p = 35914 \text{ кДж}/\text{м}^3$.

Стоимость топлива (газа) C_i , руб., затраченного в течение всего отопительного периода, определяется по формуле

$$C_i = G_i \cdot C_{\text{газ}}, \quad (4.2)$$

где $C_{\text{газ}}$ – стоимость газа, используемого в быту, $\text{руб}/\text{м}^3$, в ценах 2014 г. для г.Самары составляет $4,14 \text{ руб}/\text{м}^3$.

Общая стоимость материалов K_i , необходимых для утепления, руб., определяется по следующей формуле

$$K_i = C_{i_{\text{утепл}}} \cdot A_{\text{утепл}}, \quad (4.3)$$

где $C_{i_{\text{утепл}}}$ – стоимость утепления 1 м^2 поверхности наружной стены, руб;

$A_{\text{утепл}}$ – общая площадь утепляемых наружных стен, м^2 .

Стоимость утепления 1 м^2 поверхности наружной стены для каждого варианта складывается из стоимостей материалов, входящих в состав теплоизоляционной системы. Ориентировочная стоимость и состав материалов сравниваемых теплоизоляционных систем приведены в таблице 4.2.

Приведенные затраты по каждому варианту конструкции определяются по формуле

$$П_i = C_i + E_n K_i. \quad (4.4)$$

где E_n – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности, равный 0,15 для систем ТГВ.

Расчет основных показателей по формулам (4.1) – (4.4) сведен в таблицу 4.3.

Таблица 4.2

Ориентировочная стоимость и состав материалов сравниваемых
теплоизоляционных систем

Вариант I		Вариант II	
Наименование	Ориентировочная стоимость, руб/ м^2	Наименование	Ориентировочная стоимость, руб/ м^2
Листы ГКЛ	84	Листы ГКЛ	84
Металлический профиль	100	Металлический профиль	100
Напыляемый ППУ толщиной 30 мм	390	Плита ППУ толщиной 40 мм	520
Алюминиевая фольга	20	Средства крепления	5
Средства крепления	5	-	-

Таблица 4.3

**Результаты расчета основных показателей технико-экономического
сравнения**

Показатель	Значение	
	Вариант I	Вариант II
Общие теплопотери здания за отопительный период Q_h^y , МДж	8953710	8998703
Количество газа G_i , м ³ /год, необходимого для поддержания работы системы отопления в течение отопительного периода	249310	250563
Стоимость затраченного газа C_i , руб/год	1032143	1037331
Стоимость утепления 1м ² поверхности наружной стены, руб/м ²	599	709
Общая площадь утепляемых наружных стен, м ²	7580,5	7580,5
Общая стоимость материалов K_i , руб.	4540720	5374575
Приведенные затраты, руб/год.	1713251	1843517

Поскольку капитальные вложения и эксплуатационные издержки при реализации первого варианта утепления наружной стены ниже по сравнению с реализацией второго варианта утепления, экономический эффект от применения конструкции, утепленной с помощью экранной теплоизоляции, является очевидным. Согласно [42] расчетный экономический эффект в этом случае составит

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_\phi &= (C_2 - C_1)T_n + (K_2 - K_1) = \\ &= (1037331 - 1032143)6,7 + (5374575 - 4540720) = 868614,6 \text{ руб/год} \end{aligned}$$

Эффективность капитальных вложений без приведения результатов к году оценки по сроку окупаемости обеспечена. Таким образом, условие выполняется.

4.3 Выводы по главе 4

1. Результаты технико-экономического сравнения теплоизоляционных систем с применением в качестве утеплителя экранной теплоизоляции (вариант I) и минеральной ваты (вариант II) показали целесообразность использования отражающей изоляции в строительных ограждающих конструкциях.

2. На основе теплофизических исследований теплозащитных свойств экранной теплоизоляции предложены конструкционные решения по применению подобных материалов в ограждающих конструкциях зданий и сооружений. Результаты проведенных расчетов и экспериментальных исследований показали, что применение экранной тепловой изоляции позволяет существенно повысить энергоэффективность зданий и сооружений.

3. При выполнении расчет приведенного сопротивления наружной стены, утепленной с помощью экранной изоляции, учитывалась теплотехническая неоднородность ограждающей конструкции. Расчет выполнялся с использованием программного комплекса THERM 6.3. В результате расчета коэффициент теплотехнической неоднородности r составил 0,92.

4. На основе теплотехнического расчета строительных ограждающих конструкций показана целесообразность применения системы внутреннего утепления с экранной теплоизоляцией при капитальном ремонте зданий исторического и культурного значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель стационарного процесса теплопередачи через строительные ограждающие конструкции, утепленные с применением экранной тепловой изоляции, с учетом зависимости коэффициентов теплопроводности утеплителя, несущего слоя и воздушной прослойки от температуры.

2. Разработана математическая модель стационарного процесса теплопередачи в изолированном воздуховоде с применением экранной теплоизоляции с учетом переменности коэффициента теплоотдачи со стороны транспортируемого воздуха.

3. На основе теоретического и экспериментального исследований предложен инженерный метод теплотехнического расчета строительных ограждающих конструкций, утепленных с применением экранной тепловой изоляции, состоящей из теплоизоляционного материала, защищенного алюминиевой фольгой, и замкнутой воздушной прослойки. Данный метод включен в состав стандарта СТО НППП ГК «Промстройпроект» 05.01-2014 «Методика теплотехнического расчета строительных ограждающих конструкций с применением экранной тепловой изоляции».

4. Предложена новая инженерная методика расчета теплопотерь изолированными воздуховодами систем вентиляции и кондиционирования воздуха с применением экранной тепловой изоляции, которая используется проектными организациями г.Самары при расчете изолированных воздухопроводов и оборудования.

5. Разработаны новые экспериментальные методы исследования термического сопротивления замкнутых экранированных воздушных прослоек и тонкостенных защитных покрытий, представляющих собой жидкую композицию, состоящую из синтетического каучука, акриловых полимеров, диспергированных в этой композиции керамических или силиконовых микросфер.

6. В результате проведенных экспериментальных исследований получены значения теплопроводности вспененных полиэтиленов, защищенных алюминиевой фольгой, и теплоизоляционных керамических покрытий.

7. На основе экспериментальных исследований впервые получены численные значения термических сопротивлений замкнутых экранированных воздушных прослоек при различных направлениях вектора теплового потока. Полученные данные рекомендуется использовать при выполнении теплотехнического расчета строительных ограждающих конструкций, утепленных с применением экранной тепловой изоляции.

8. На основе теплотехнических исследований разработаны новые конструктивные решения по утеплению ограждающих конструкций жилых и общественных зданий (наружных стен, перекрытий над неотапливаемыми подвалами, чердачных покрытий) и воздуховодов систем вентиляции с применением экранной тепловой изоляции.

9. Разработанная теплозащитная система внутреннего утепления с использованием напыляемого пенополиуретана, защищенного алюминиевой фольгой, реализована при строительстве жилого комплекса «Звезда» в г.Самаре. Расчетный экономический эффект от внедрения составит 868614,6руб/год.

10. Полученный в результате исследования инженерный метод теплотехнического расчета рекомендуется использовать при проектировании строительных ограждающих конструкций, утепленных с применением экранной теплоизоляции. Новую инженерную методику расчета теплопотерь изолированными воздуховодами систем вентиляции и кондиционирования воздуха с применением экранной теплоизоляции рекомендуется использовать проектными организациями при расчете изолированных воздуховодов и оборудования. Разработанные конструктивные решения по утеплению ограждающих конструкций с применением экранной теплоизоляции могут быть использованы при проектировании жилых и общественных зданий, а также при реконструкции зданий культурного и исторического наследия.

Библиографический список

1. Аметистов, Е. В. Основы теории теплообмена / Е. В. Аметистов. – М.: изд-во МЭИ, 2000. – 242 с.
2. Ананьев, В. А. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика: учеб. пос. / В. А. Ананьев, Л. Н. Балужева, А. Д. Гальперин и др. – 2-е изд. – М.: Евроклимат, 2000. – 415 с.
3. Аркадьев, Л. В. Поволоцкий В. А. Исследование многоэкранный изоляции [Текст]/ Л. В. Аркадьев, В. А. Поволоцкий // Теплоэнергетика. – 1964. - № 1. - С. 36-40.
4. Баженов, Ю. М. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности (основы теории, методы расчеты и технологическое проектирование): научное издание / Ю. М. Баженов, Е. А. Король, В. Т. Ерофеев, Е. А. Митина. – М.: изд-во АСВ, 2008. – 320 с.
5. Белова, Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях / Е. М. Белова. – М.: Евроклимат, 2006. – 640 с.
6. Беляев, Н. М. Методы теории теплопроводности / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – 1 и 2-я ч. – М.: Высшая школа, 1982. – 671 с.
7. Береговой, А. М. Ограждающие конструкции с повышенными теплозащитными качествами / А. М. Береговой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: АСВ, 1999. – 312 с.
8. Береговой, А. М. Энергоэкономичные и энергоактивные здания. / А. М. Береговой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: АСВ, 1999. – 160 с.
9. Блох, А. Г. Основы теплообмена излучением / А. Г. Блох. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 332 с.
10. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. / В. Н. Богословский. – 3-е изд. – М.: АВОК Северо-Запад, 2006. – 400 с.
11. Богуславский, Л. Д. Экономика теплогазоснабжения и вентиляции / Л. Д. Богуславский и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 279 с.

12. Богуславский, Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции / Л. Д. Богуславский. – М.: Стройиздат, 1985. – 336 с.
13. Богуславский, Л. Д. Экономическая эффективность оптимизации уровня теплозащиты зданий / Л. Д. Богуславский. – М.: Стройиздат, 1981. – 104 с.
14. Бойков, Г. П. Определение теплофизических свойств строительных материалов: монография / Г. П. Бойков, Ю. В. Видин, В. М. Фокин. – Красноярск: Красноярский университета, 1992. – 172 с.
15. Бояринцев, Д. И. Теплопередача через газовые и жидкостные прослойки [Текст]/ Д. И. Бояринцев // ЖТФ. –1950. – т. XX.– вып. 9. – С. 1084-1097
16. Булгаков, С.К. Технологии по утеплению существующего жилого фонда России [Текст]/ С.К. Булгаков // Строительство и архитектура. Проблемные доклады. – М.: ВНИИНТПИ, №1, 1998. – 106-108 с.
17. Васильев, Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий / Б. Ф. Васильев. – М.: Госстройиздат, 1957. – 210 с.
18. Васильев, Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий в жарком климате [Текст]/ Васильев Б.Ф. – М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1968. – 85 с.
19. Васильев, Б. Ф. Теплотехнические испытания облегченных кирпичных стен [Текст]/ Б. Ф. Васильев // Материалы и конструкции в современной архитектуре. – М., 1947. – С. 17-20.
20. Введение в математическое моделирование: учебное пособие / В.Н. Ашихмин, М.Г. Бояршинов, М.Б. Гитман, И.Э. Келлер [и др.]. – М.: «Интернет Инжиниринг», 2000. – 336 с.
21. Видин, Ю. В. Инженерные методы расчетов процессов теплопереноса / Ю. В. Видин. – Красноярск, 1974. – 144 с.
22. Волков, Е.А. Численные методы: учебное пособие для вузов / Е.А. Волков. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
23. Вульман, Ф. А. Тепловые расчеты на ЭВМ теплоэнергетических установок/ Ф. А. Вульман, Н. С. Хорьков. – М.: Энергия, 1975. – 200 с.

24. Вытчиков, А. Ю. Первый опыт применения монолитного пенобетона в строительстве [Текст]/ А. Ю. Вытчиков, М. А. Тихонов, А. П. Шварц // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. №2. Москва, 2006. – С. 58-59.

25. Вытчиков, Ю. С. Исследование сопряженного теплообмена в рекуператорах методом характеристик [Текст]/ Ю. С. Вытчиков, В. М. Хорольский, Ю. С. Эткина // Теплофизика технологических процессов: сборник трудов. – Куйбышев: КПТИ, 1978. – С. 116-122.

26. Вытчиков, Ю. С. Повышение теплозащитных характеристик керамзитобетонных ограждающих конструкций с помощью экранной тепловой изоляции [Текст] / Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарёв // Строительные материалы. №11. Москва, 2013 г. – С. 12-15.

27. Вытчиков, Ю. С. Повышение теплозащитных характеристик строительных ограждающих конструкций зданий и сооружений культурного и исторического наследия [Текст] / Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарёв // Промышленное и гражданское строительство. № 3. Москва, 2014 г. – С. 52-55.

28. Вытчиков, Ю. С. Эффективность применения экранной теплоизоляции при утеплении воздуховодов [Текст]/ Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарёв // Научное обозрение. № 2. Москва, 2014 г. – С. 104-109.

29. Вытчиков, Ю.С. Повышение энергоэффективности реконструируемых жилых зданий [Текст]/ Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, Е.А. Белякова, С.Д. Славов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. №1. Москва, 2008. – С. 62-63.

30. Гагарин, В. Г. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах [Текст]/ В. Г. Гагарин , К. А. Дмитриев // Строительные материалы. №3. Москва, 2013 г. – С. 14-16.

31. Гагарин, В.Г. О нормировании теплопотерь через оболочку здания [Текст]/ В.Г.Гагарин, Козлов В. В. // Academia. Архитектура и строительство. - 2010. - № 3. - С. 279–286.

32. Галицейский, Б. М. Теплообмен в энергетических установках космических аппаратов / Б. М. Галицейский, Ю. И. Данилов и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
33. Горин, В. М. Применение стеновых камней из беспесчаного керамзитобетона в жилищном строительстве [Текст]/ В. М. Горин, С. А. Токарева, Ю. С. Вытчиков, И. Г. Беляков, Л. П. Шиянов // Строительные материалы. №2. Москва, 2010. – С. 15-18.
34. Горин, В. М. Современные ограждающие конструкции из керамзитобетона для энергоэффективных зданий [Текст]/ В. М. Горин, С. А. Токарева, Ю. С. Вытчиков // Строительные материалы. №3. Москва, 2011. – С. 42-43.
35. Горшков, А. С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий [Текст]/ А. С. Горшков // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – №1. – С.9-13.
36. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций (118)
37. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – М.: 2000.
38. Граник, Ю. Г. Теплоэффективные стены зданий [Текст]/ Ю. Г. Граник // Энергосбережение. №2. Москва, 2001. – С.14-16.
39. Данилов, Ю. И. К вопросу расчета теплообменников с внутренними источниками тепла [Текст]/ Ю. И. Данилов, Галицейский Б. М. // Исследование теплообмена в потоках жидкости и газа. – М.: 1965. – С. 100-125.
40. Дмитриевич, А. Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов / А. Д. Дмитриевич. – М.–Л.: Госстройиздат, 1963. – 204 с.
41. Дрейцер, Г.А. Теплообмен при свободной конвекции: учеб. пособие / Г.А. Дрейцер. – М.: изд-во МАИ, 2002. – 97 с.

42. Ерёмкин, А. И. Экономика энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учебное пособие / А. И. Ерёмкин, Т. И. Королёва, Г. В. Данилик, В. В. Бызеев, А. Г. Аверкин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 184 с.

43. Еремкин, А.И. Тепловой режим зданий: учебное пособие для вузов / А.И. Еремкин, Т.И. Королева. – М. : Изд-во Ассоциации стр-х вузов, 2001. – 368 с.

44. Ершов, А. В. Натурные исследования теплоустойчивости экранированных стен с вентилируемой воздушной прослойкой [Текст]/ А. В. Ершов, Е. А. Солдатов, Е. И. Угрюмов // Строительство и архитектура Узбекистана. – Узбекистан, 1968. – № 2. – с. 38-41.

45. Зенкевич, О. Метод конечных элементов / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

46. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4 «250». Руководство по эксплуатации. – Челябинск: ООО «СКБ Стройприбор», 2008. – 29 с.

47. Ильинский, В. М. Строительная теплофизика: уч. пособие для инж.-строит. вузов / В. М. Ильинский. – М.: Высш. школа, 1974. – 320 с.

48. Исаченко, В.П. Теплопередача: учеб. для втузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

49. Каганер, М. Г. Тепловая изоляция в технике низких температур / М. Г. Каганер. – М.: Машиностроение, 1966. – 275 с.

50. Каганер, М. Г. Теплоизоляция с использованием вакуума / М. Г. Каганер. – М.: ЦИНТИ, 1963. – 45 с.

51. Каммерер, И. С. Теплоизоляция в промышленности и строительстве / – И. С. Каммерер. – М.: Стройиздат, 1965. – 379 с.

52. Карпис, Е. Е. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха / Е. Е. Карпис. – М.: Стройиздат, 1986. – 268 с.

53. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

54. Кассандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 109 с.
55. Кейс, В. М. Компактные теплообменники / В. М. Кейс, А. П. Лондон. – М.: Энергия, 1967. – 223 с.
56. Ковалевский, В.И. Методы теплового расчета экранной изоляции / В.И. Ковалевский, Г.П. Бойков. – М. : Энергия, 1974. – 199 с.
57. Кокорин, О. Я. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение / О. Я. Кокорин, В. Н. Богословский, Л. В. Петров. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с.
58. Королева, Т. И. Экономические обоснования оптимизации теплового режима здания: учебное пособие / Т.И. Королева. – М.: изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. – 96 с.
59. Королёва, Т. И. Экономическое обоснование оптимизации теплового режима зданий: учебное пособие / Т. И. Королёва. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2001. – 144 с.
60. Коршаков, А. И. Богданов Ф. Ф. Исследование теплопроводности экранной металлической изоляции из мятой стальной и алюминиевой фольги в среде воздуха [Текст]/ А. И. Коршаков, Ф. Ф. Богданов // ТВТ. – 1969. – №1.
61. Коршаков, А. И. Богданов Ф. Ф. Экспериментальное исследование экранной металлической изоляции в среде воздуха и гелия [Текст]/ А. И. Коршаков, Ф. Ф. Богданов // ТВТ. – 1967. – вып. 5. – т. 5.
62. Кудинов, А. А. Тепломассообмен / А. А. Кудинов. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 375 с.
63. Кулиниченко, В.Р. Справочник по теплообменным расчетам / В.Р. Кулиниченко. – Киев: Тэхника, 1990. – 168 с.
64. Лепилов, В. И. Исследование теплофизических свойств и характеристик систем массивных экранов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Лепилов Владимир Ильич. – Волгоград, 2007. – 147 с.
65. Лепилов, В.И. Исследование коэффициента температуропроводности системы экранов для ограждающих конструкций [Текст]/ В.И. Лепилов, В. М.

Фокин // Материалы V Международной научной конф. «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». – Волгоград, 2007. – С. 232-235.

66. Лепилов, В.И. Расчет температуропроводности систем экранирования в условиях вакуума [Текст]/ В. И. Лепилов, В. М. Фокин, Г. П. Бойков // Вестник ВолгГАСУ: серия: Технические науки. Вып. 6. –ВолгГАСУ, Волгоград, 2006. – С. 190-193.

67. Лыков А. В. Теоретические основы строительной теплофизики/ А. В. Лыков. – Минск: Наука и техника, 1961. – 519 с.

68. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

69. Лыков, А. В. Тепломассообмен. Справочник / А. В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

70. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

71. Ляликов, А. С. Теплопередача со сложным теплообменом: учеб. пособие / А. С. Ляликов. – Томск: ТПИ, 1982. – 96 с.

72. Мак Адамс, В. Х. Теплопередача / В. Х. Мак Адамс. – М.: Металлургия, 1961. – 686 с.

73. Матвеев, Н. М. Сборник задач и упражнений по обыкновенным дифференциальным уравнениям: для вузов / Н. М. Матвеев. – 6-е изд., испр. и доп. – Мн.: Выш. шк., 1987. – 319 с.

74. Матросов, Ю. А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения / Ю. А. Матросов. – М.: НИИСФ, 2008. – 496 с.

75. Михальченко, Р. С. Зависимости эффективного коэффициента теплопроводности слоисто-вакуумной изоляции от ее толщины [Текст]/ Р. С. Михальченко, А. Г. Гержин, В. Т. Архипов, Н. П. Першин, Л. В. Клипач. // ИФЖ. – 1968. – № 3. – т. XV. – С. 526-528.

76. Михальченко, Р. С. К вопросу о влиянии толщины слоисто-вакуумной изоляции на ее эффективную теплопроводность [Текст]/ Р. С. Михальченко, А. Г. Гержин, В. Т. Архипов // ИФЖ. – 1969. – № 3. – т. XVI. – С. 456-463.

77. Михальченко, Р. С. Теплоперенос остаточными газами в слоисто-вакуумных изоляциях [Текст]/ Р. С. Михальченко, А. Г. Гержин, В. Т. Архипов, Н. П. Першин, Л. В. Клипач. // ИФЖ. – 1969. – № 1. – т. XIV. – С. 148-155.

78. Михеев, М. А. Основы теплопередачи: учеб. для вузов / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

79. Могилат, А. Н. Теплоустойчивость полносборных наружных стен при воздействии солнечной радиации / А. Н. Могилат. – Харьков: изд-во ХГУ, 1967. – 136 с.

80. Наринский, Д. А. Эффективная теплопроводность стальной изоляции [Текст]/ Д. А. Наринский, Б. И. Шейнин // ТВТ. – 1969. – № 3. – т. 7.

81. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон Рос. Федерации от 23 ноября 2009 г. №263-ФЗ: принят Государственной Думой 11 ноября 2009 г.: одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 г. // Рос. газ. – 2009. – 27 ноября.

82. Олейников П. П. Исследование теплозащитных свойств экранируемых наружных стен зданий промышленных холодильников в условиях юга России. [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Олейников Петр Петрович. – Волгоград, 2006. – 184с.

83. Осипова, В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена/ В. А. Осипова. – М.: Энергия, 1979. – 319 с.

84. Преображенский, В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

85. Рабинович, Г. Д. Теория теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов / Г. Д. Рабинович. – Минск: Изд-во АН БССР, 1963. – 216 с.

86. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений / С. Г. Рабинович. – М.: Энергия, 1978. – 262 с.

87. Самарский, А.А. Введение в численные методы: учебник для вузов / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1987. – 288 с.

88. Сапарёв, М. Е. Исследование теплозащитных характеристик замкнутых воздушных прослоек в строительных ограждающих конструкциях с применением экранной теплоизоляции [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. №1 (14). СГАСУ, Пенза, 2014 г. – С. 98-102.

89. Сапарёв, М. Е. Исследование теплозащитных характеристик сэндвич-панелей с применением экранной изоляции [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Межвузовский сборник научных трудов «Повышение энергоэффективности в строительстве». Выпуск 7. СГАСУ, Самара, 2012 г. – С. 10-16.

90. Сапарёв, М. Е. Исследование теплофизических характеристик современных материалов, применяемых в качестве экранной теплоизоляции ограждающих конструкций зданий [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Сборник докладов V Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» - МГСУ, Москва, 2013 г. – С. 21-25.

91. Сапарёв, М. Е. Исследование термического сопротивления экранной тепловой изоляции [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Материалы 69-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2011 г. - СГАСУ, Самара, 2012 г. – С. 298-300.

92. Сапарёв, М. Е. Метод экспериментального исследования степени черноты строительных материалов [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Материалы 71-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2013 г. - СГАСУ, Самара, 2014 г. – С. 199-202.

93. Сапарёв, М. Е. Методика теплотехнического расчёта ограждающих конструкций, утепленных с помощью экранной изоляции [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Межвузовский сборник научных статей «Научный потенциал регионов на службу модернизации». №3 (6). АИСИ, Астрахань, 2013 г. – С. 35-37.

94. Сапарёв, М. Е. Определение теплозащитных характеристик керамических теплоизоляционных покрытий [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С.

Вытчиков // Материалы 70-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2012 г. - СГАСУ, Самара, 2013 г. – С. 277-280.

95. Сапарёв, М. Е. Применение теплозащитных керамических покрытий в строительных конструкциях с воздушными прослойками [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Межвузовский сборник научных трудов «Повышение энергоэффективности в строительстве». Выпуск 7. СГАСУ, Самара, 2012 г. – С. 17-19.

96. Сапарёв, М. Е. Тепловой режим ограждающих конструкций с применением экранной изоляции [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции «Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальных комплексах». – Пенза, 2012, С.43-46.

97. Сапарёв, М. Е. Экспериментальное исследование теплозащитных характеристик ограждающих конструкций с применением экранной изоляции [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции «Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальных комплексах». – Пенза, 2013, С.50-53.

98. Сапарёв, М. Е. Экспериментальное определение теплопроводности лакокрасочных покрытий [Текст] / М.Е. Сапарёв, Ю.С. Вытчиков, А.С. Прилепский // Материалы 71-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2013 г. - СГАСУ, Самара, 2014 г. – С. 202-205.

99. Семенов, Б. А. Нестационарная теплопередача и эффективность теплозащиты ограждающих конструкций зданий / Б. А. Семенов. – Саратов: СГТУ, 1996. – 172 с.

100. Серов, Е. П. Динамика процессов в тепломассообменных аппаратах / Е. П. Серов, Б. П. Корольков. – М.: Энергия, 1967. – 167 с.

101. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М.: Госстрой, 2004.

102. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. – М.: Минрегион России, 2012.

103. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – Взамен СП 23-101-2000; введ. 26.03.2004 - М.: Госстрой России, 2004. - 86с.(89)
104. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. – М.: Минрегион России, 2012. – 95 с.
105. Сперроу, Э. М. Теплообмен излучением / Э. М.Сперроу. – М.: Энергия, 1971. – 294 с.
106. Стефанов, Е. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Е. В. Стефанов. – Санкт-Петербург: изд-во «АВОК Северо-Запад», 2005. – 402 с.
107. Сукомел, А. С. Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах / А. С. Сукомел, З. И. Величко, Ю. Г. Абросимов. – М.: Энергия. 1979. – 216 с.
108. Табунщиков, Ю. А. Научные основы проектирования энергоэффективных зданий [Текст]/ Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач // АВОК. № 1. Москва, 1998. – С. 5–10.
109. Табунщиков, Ю. А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений / Ю. А. Табунщиков, Д. Ю. Хромец, Ю. А. Матросов. – М.: Стройиздат, 1986. – 373 с.
110. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003.
111. Теория тепломассообмена / под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высшая школа, 1979. – 567 с.
112. Тепловая изоляция. Справочник строителя / Под ред. Г.Ф. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1985. – 421 с.
113. Умняков, П. Н. Применение отражательной теплоизоляции в ограждающих конструкциях [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1958.
114. Фокин, В. М. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов: монография / В. М. Фокин, В. Н. Чернышов. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 212 с.
115. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.

116. Харьянов, В. В. Панели наружных стен с экранами [Текст]/ В. В. Харьянов, И. Я. Абрамов // Жилищное строительство. № 10. Москва, 1975. – С. 14-16.
117. Хижняков, С. В. Практические расчеты тепловой изоляции промышленного оборудования и трубопроводов / С. В. Хижняков. – М.: Энергия, 1976. – 200 с.
118. Чистяков, С. Ф. Теплотехнические измерения и приборы / С. Ф. Чистяков, Д. Б. Радун. – М.: Высшая школа, 1972. – 392 с.
119. Шатунов, Е. С. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Шатунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин и др. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
120. Шкловер, А.М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий / А.М. Шкловер, Б. Ф. Васильев, Ф. В. Ушков. – М.: Госстройиздат, 1956. – 350 с.
121. Шорин, С. Н. Теплопередача: учеб. пособие для вузов / С. Н. Шорин – М.: Высшая школа, 1964. – 489 с.
122. Эккерт, Э. Р. Теория тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.
123. Cooper D., Sc. B. Development of multi-layer insulation // Insulat. J., 1965, v. 9, № 5, 6.
124. Bartas I. G., Mayer E. Estimation of temperature patterns in multiply-shielded systems // Trans. ASME, 1957, v. 19, № 8.
125. McPherson R. E., Stuart H. D. // Nuclear Sci. and Eng., 1962, № 12.
126. Vortmeyer D., Kasperek G. Radiative heat transfer in packed beds // Papers ISiME Semi-Intern. Symp., Tokyo, 1967.
127. Hering R. G. Radiative heat exchange between conducting plates with specular reflection // Paper Amer. Soc. Mech. Engrs., 1966, № HT-28.
128. Colas F. L'utilisation de l'aluminium en calorifugeage // Rev. l'aluminium, 1963, № 30.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Результаты теплотехнических испытаний ограждающих конструкций с
применением экранной изоляции

Таблица А.1

Термическое сопротивление горизонтальных воздушных прослоек с
применением экранной изоляции Aluthermo QUATRO при направлении
теплового потока сверху-вниз

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки R_B , ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Термическое сопротивление теплоизоляции R_M , ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Теплопроводность воздушной прослойки λ_B , Вт/($\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$)	Суммарное термическое сопротивление $R_\Sigma = R_B + R_M$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт
10	0,285	0,256	0,035	0,541
15	0,439	0,256	0,034	0,695
20	0,601	0,256	0,033	0,857
25	0,668	0,256	0,037	0,924
30	0,719	0,256	0,042	0,975
35	0,780	0,256	0,045	1,036
40	0,829	0,256	0,048	1,085

Результаты обработаны в виде графической зависимости

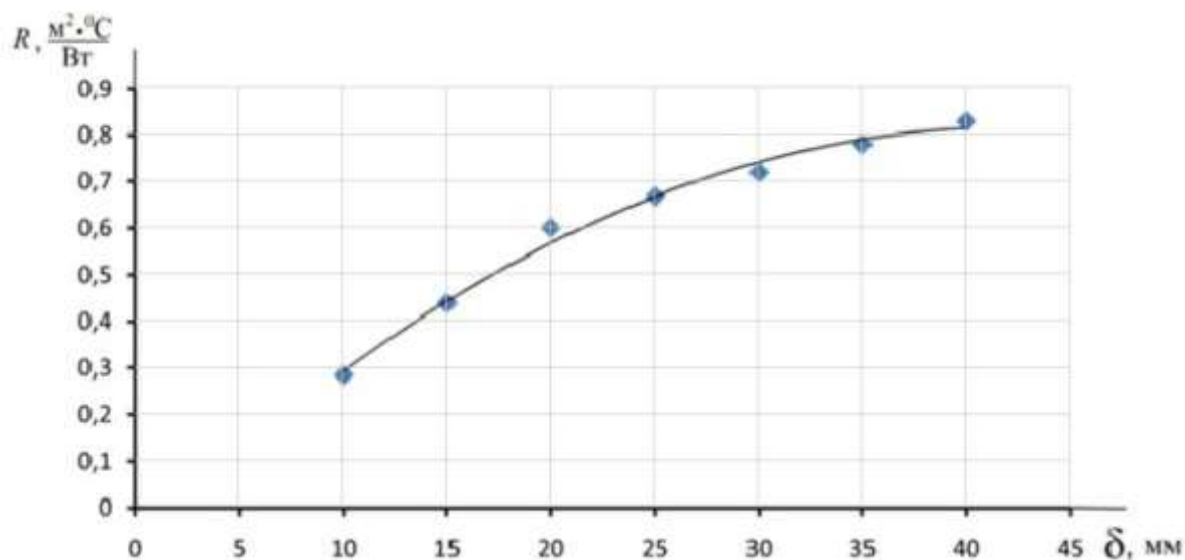


Рис. А.1. Зависимость термического сопротивления горизонтальной
воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции
Aluthermo QUATRO и направлении теплового потока сверху-вниз

Таблица А.2

Термическое сопротивление горизонтальных воздушных прослоек с применением экранной изоляции Фольгоизол при направлении теплового потока сверху-вниз

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки R_{δ} , $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$	Термическое сопротивление теплоизоляции R_m , $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$	Теплопроводность воздушной прослойки $\lambda_{\text{в}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Суммарное термическое сопротивление $R_{\Sigma} = R_{\delta} + R_m$, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$
10	0,256	0,197	0,039	0,453
15	0,400	0,197	0,038	0,597
20	0,507	0,197	0,039	0,704
25	0,610	0,197	0,041	0,807
30	0,687	0,197	0,044	0,884
35	0,738	0,197	0,047	0,935
40	0,821	0,197	0,049	1,018

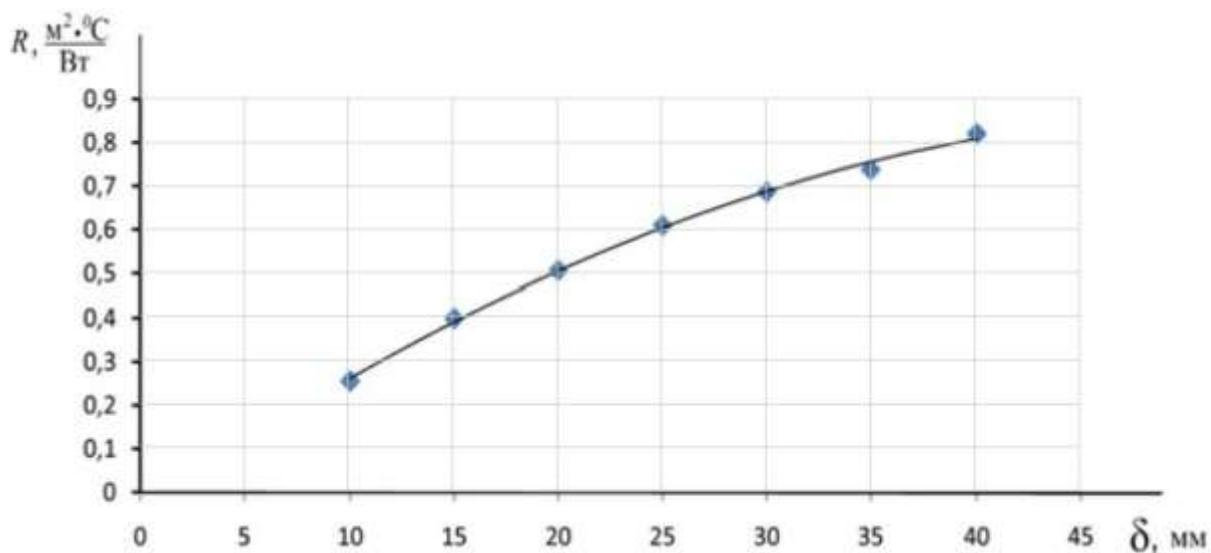


Рис. А.2. Зависимость термического сопротивления горизонтальной воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции Фольгоизол и направлении теплового потока сверху-вниз

Таблица А.3

Термическое сопротивление горизонтальных воздушных прослоек с применением экранной изоляции Пенофол при направлении теплового потока сверху-вниз

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки $R_{\text{в}}$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Термическое сопротивление теплоизоляции $R_{\text{м}}$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Теплопроводность воздушной прослойки $\lambda_{\text{в}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Суммарное термическое сопротивление $R_{\Sigma} = R_{\text{в}} + R_{\text{м}}$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$
10	0,312	0,121	0,032	0,433
15	0,441	0,121	0,034	0,562
20	0,584	0,121	0,034	0,705
25	0,642	0,121	0,039	0,763
30	0,689	0,121	0,044	0,810
35	0,745	0,121	0,047	0,866
40	0,800	0,121	0,050	0,921

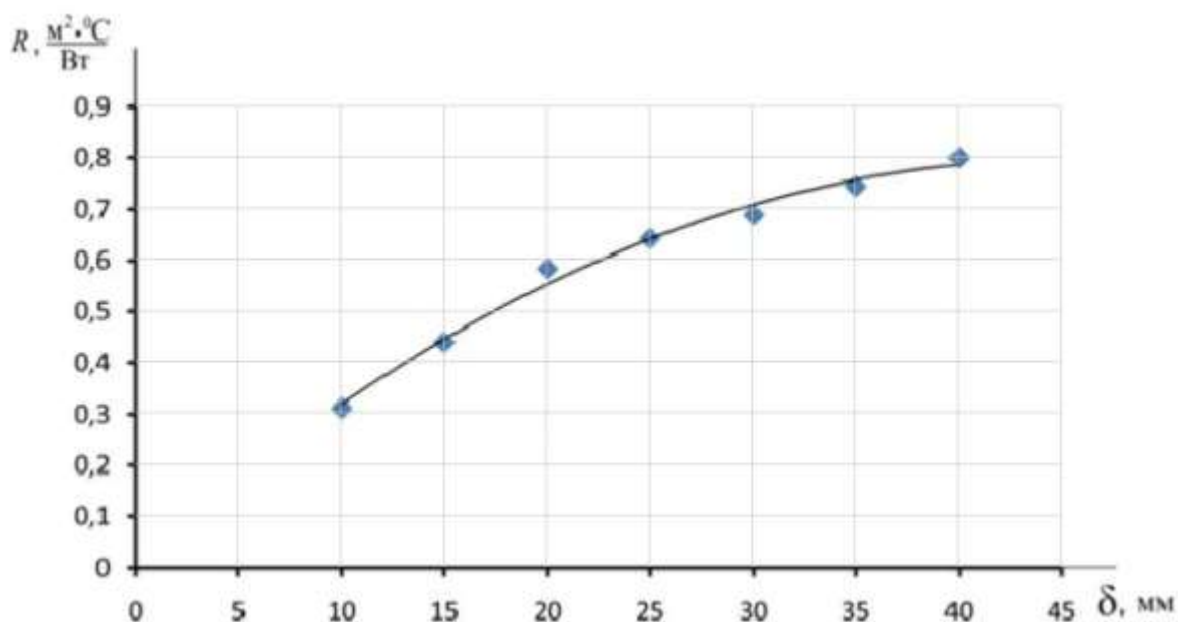


Рис. А.3. Зависимость термического сопротивления горизонтальной воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции Пенофол и направлении теплового потока сверху-вниз

Таблица А.4

Термическое сопротивление вертикальных прослоек с применением
экранной изоляции Aluthermo QUATRO

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки R_B , ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Термическое сопротивление теплоизоляции R_M , ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Теплопроводность воздушной прослойки λ_B , Вт/($\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$)	Суммарное термическое сопротивление $R_\Sigma = R_B + R_M$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт
10	0,320	0,256	0,031	0,576
15	0,367	0,256	0,041	0,623
20	0,389	0,256	0,051	0,645
25	0,415	0,256	0,060	0,671
30	0,420	0,256	0,071	0,676
35	0,438	0,256	0,080	0,694
40	0,440	0,256	0,091	0,696

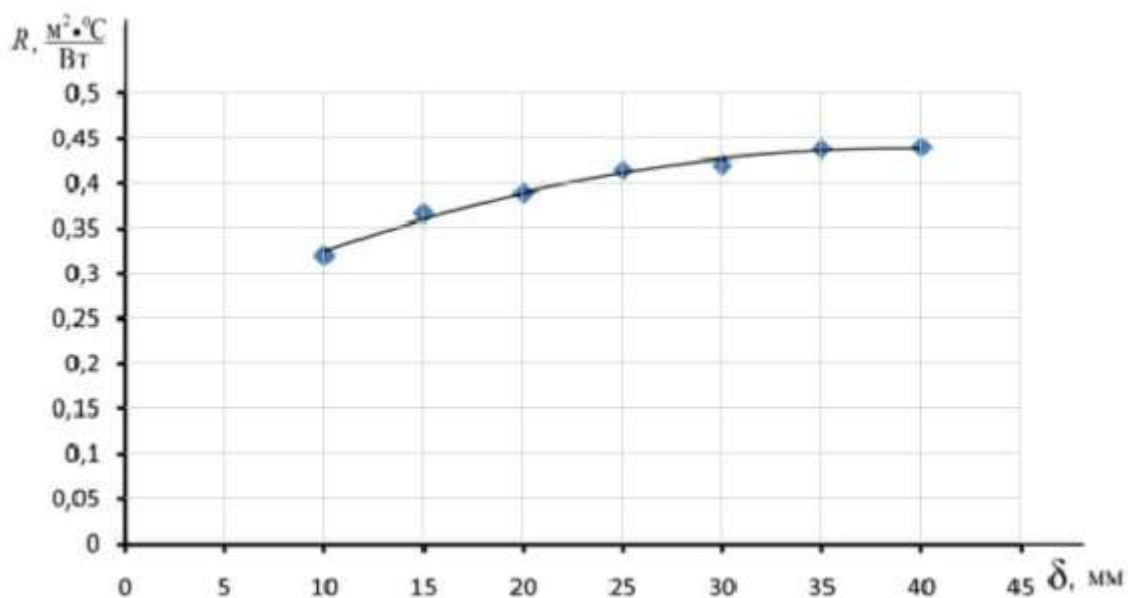


Рис. А.4. Зависимость термического сопротивления вертикальной
воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции
Aluthermo QUATRO

Таблица А.5

Термическое сопротивление вертикальных прослоек с применением
экранной изоляции Фольгоизол

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивлени е воздушной прослойки $R_{\text{в}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Термическое сопротивление теплоизоляции $R_{\text{м}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Теплопроводность воздушной прослойки $\lambda_{\text{в}}$, Вт/($\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$)	Суммарное термическое сопротивлен ие $R_{\Sigma} = R_{\text{в}} + R_{\text{м}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт
10	0,320	0,197	0,031	0,517
15	0,380	0,197	0,039	0,577
20	0,392	0,197	0,051	0,589
25	0,424	0,197	0,059	0,621
30	0,435	0,197	0,069	0,632
35	0,445	0,197	0,079	0,642
40	0,450	0,197	0,089	0,647

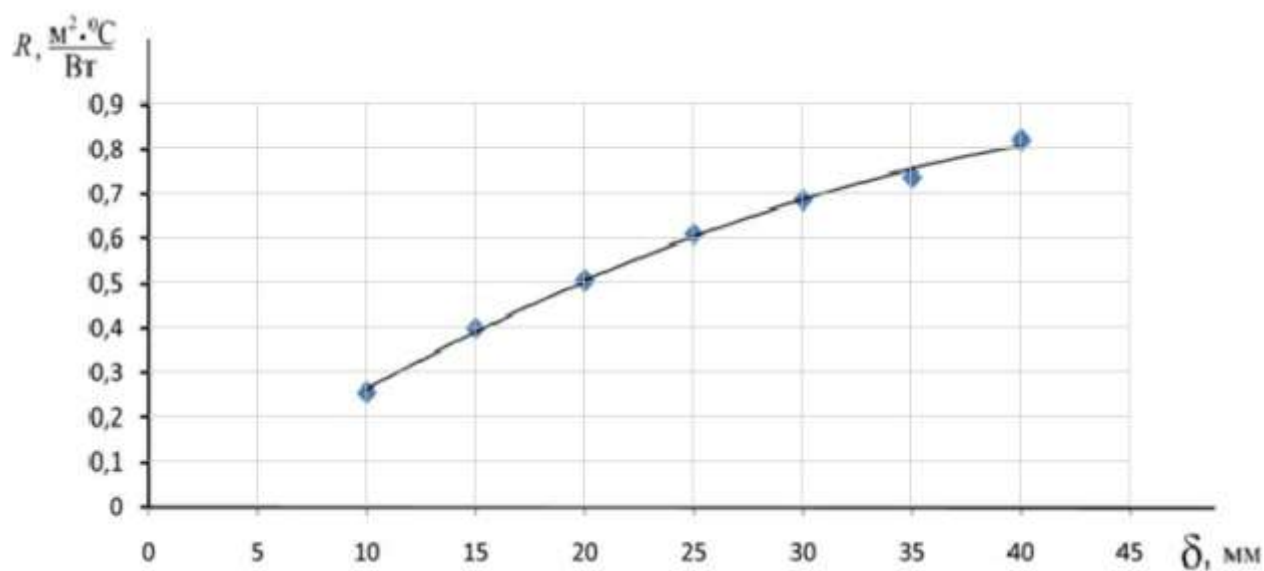


Рис. А.5. Зависимость термического сопротивления вертикальной
воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции
Фольгоизол

Таблица А.6

Термическое сопротивление вертикальных прослоек с применением
экранной изоляции Пенофол

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки $R_{\text{в}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$)/Вт	Термическое сопротивление теплоизоляции $R_{\text{м}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$)/Вт	Теплопроводность воздушной прослойки $\lambda_{\text{в}}$, Вт/($\text{м} \cdot ^\circ\text{С}$)	Суммарное термическое сопротивление $R_{\Sigma} = R_{\text{в}} + R_{\text{м}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$)/Вт
10	0,310	0,121	0,032	0,431
15	0,381	0,121	0,039	0,502
20	0,410	0,121	0,049	0,531
25	0,425	0,121	0,059	0,546
30	0,429	0,121	0,070	0,550
35	0,442	0,121	0,079	0,563
40	0,451	0,121	0,089	0,572

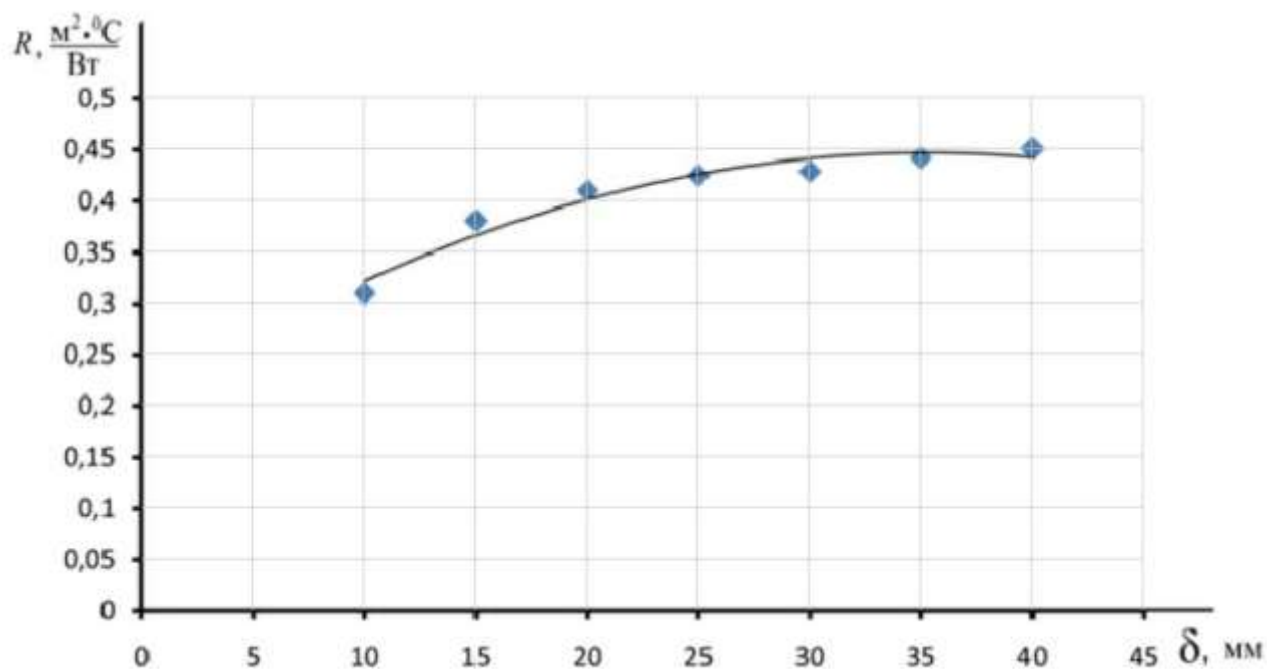


Рис. А.6. Зависимость термического сопротивления вертикальной
воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции
Пенофол

Таблица А.7

Термическое сопротивление горизонтальных воздушных прослоек с применением экранной изоляции Aluthermo QUATRO при направлении теплового потока снизу-вверх

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки R_v , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Термическое сопротивление теплоизоляции R_m , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Теплопроводность воздушной прослойки λ_v , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Суммарное термическое сопротивление $R_\Sigma = R_v + R_m$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$
10	0,343	0,256	0,029	0,599
15	0,390	0,256	0,038	0,646
20	0,418	0,256	0,048	0,674
25	0,445	0,256	0,056	0,701
30	0,449	0,256	0,067	0,705
35	0,469	0,256	0,075	0,725
40	0,471	0,256	0,085	0,727

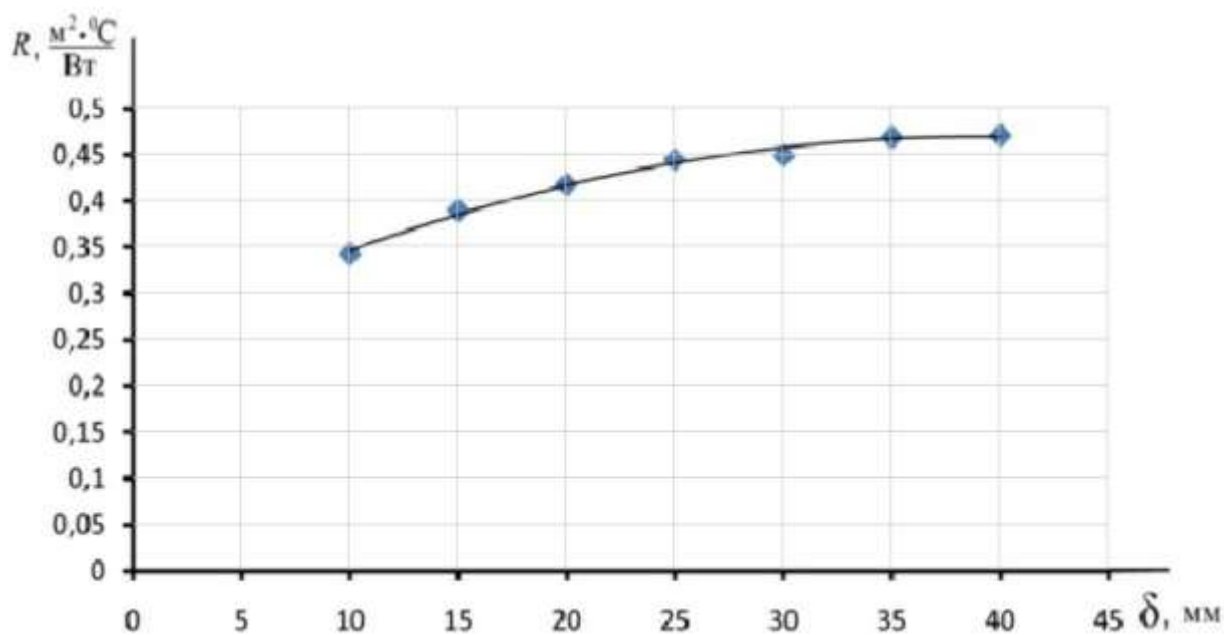


Рис. А.7. Зависимость термического сопротивления горизонтальной воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции Aluthermo QUATRO и направлении теплового потока снизу-вверх

Таблица А.8

Термическое сопротивление горизонтальных воздушных прослоек с применением экранной изоляции Фольгоизол при направлении теплового потока снизу-вверх

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки $R_{\text{в}}$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Термическое сопротивление теплоизоляции $R_{\text{м}}$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Теплопроводность воздушной прослойки $\lambda_{\text{в}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Суммарное термическое сопротивление $R_{\Sigma} = R_{\text{в}} + R_{\text{м}}$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$
10	0,344	0,197	0,029	0,541
15	0,408	0,197	0,037	0,605
20	0,423	0,197	0,047	0,620
25	0,451	0,197	0,055	0,648
30	0,467	0,197	0,064	0,664
35	0,475	0,197	0,074	0,672
40	0,482	0,197	0,083	0,679

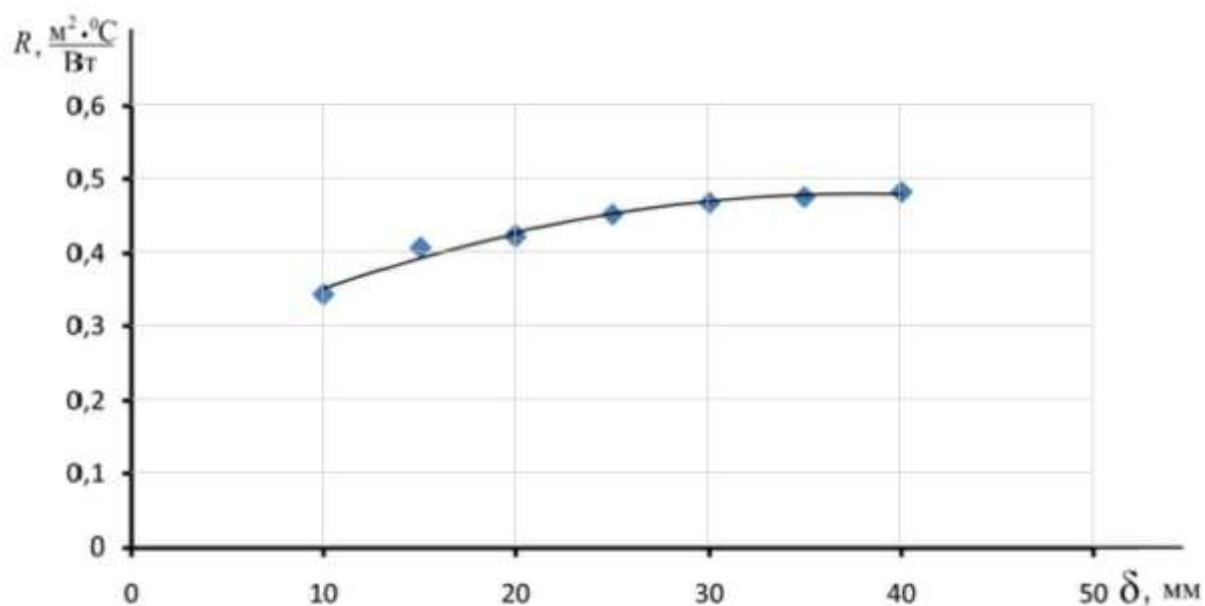


Рис. А.8. Зависимость термического сопротивления горизонтальной воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции Фольгоизол и направлении теплового потока снизу-вверх

Таблица А.9

Термическое сопротивление горизонтальных воздушных прослоек с применением экранной изоляции Пенофол при направлении теплового потока снизу-вверх

Толщина воздушной прослойки, мм	Термическое сопротивление воздушной прослойки R_v , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Термическое сопротивление теплоизоляции R_m , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Теплопроводность воздушной прослойки λ_v , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Суммарное термическое сопротивление $R_\Sigma = R_v + R_m$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$
10	0,335	0,121	0,030	0,456
15	0,409	0,121	0,037	0,530
20	0,440	0,121	0,045	0,561
25	0,456	0,121	0,055	0,577
30	0,460	0,121	0,065	0,581
35	0,472	0,121	0,074	0,593
40	0,481	0,121	0,083	0,602

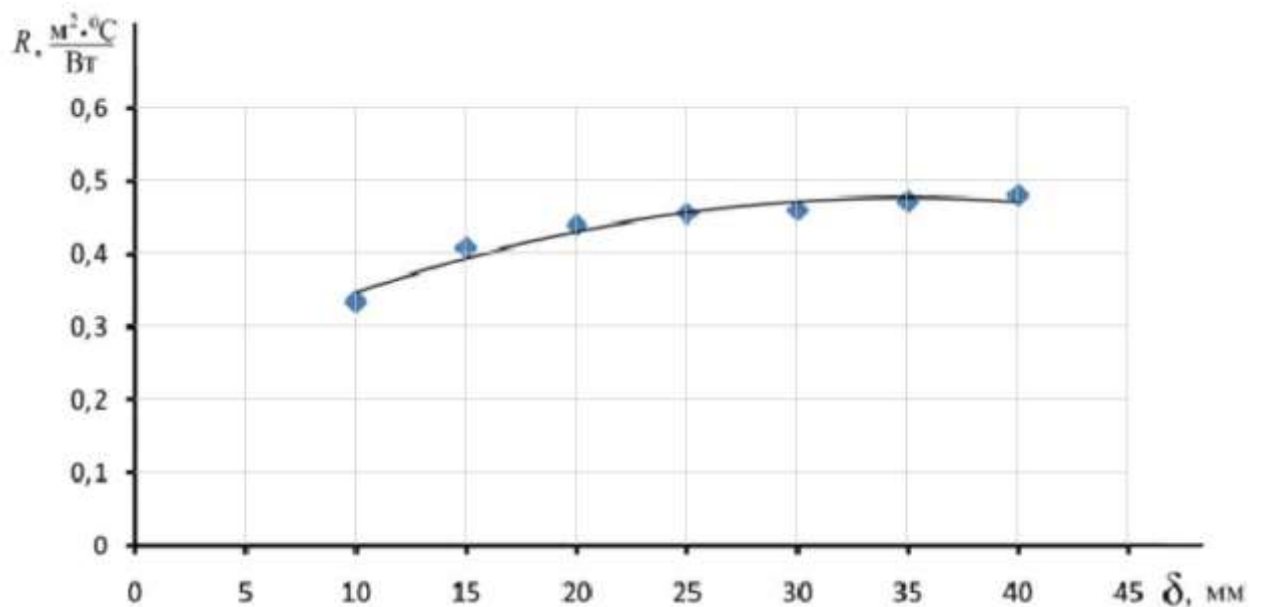
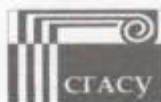


Рис. А.9. Зависимость термического сопротивления горизонтальной воздушной прослойки от её толщины при использовании теплоизоляции Пенофол и направлении теплового потока снизу-вверх

Приложение Б
Акты и справки о внедрении



Министерство образования и науки РФ
ФГБОУВПО Самарский государственный
архитектурно-строительный университет

443001, Самара, ул. Молодгвардейская 194
Тел.: (846) 242-17-84, факс: (846) 332-19-65, 242-17-87
E-mail: sgasu@sgasu.smr.ru

«Утверждаю»
Проректор по учебной работе СГАСУ

А. А. Титов
«__» _____ 2014 г.

Акт

об использовании методики экспериментального исследования термического сопротивления замкнутых воздушных прослоек с тепловыми экранами, методики экспериментального исследования теплозащитных характеристик ограждающих конструкций с экранной изоляцией, методики экспериментального исследования теплопроводности тонкостенных штукатурных слоев в ограждающих конструкциях в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, начальник учебного отдела В. К. Солдатов, заведующий кафедрой ОПФХ, профессор, д.ф.-м.н., Н.С. Бухман составили настоящий акт о том, что методика экспериментального исследования термического сопротивления замкнутых воздушных прослоек с тепловыми экранами, методика экспериментального исследования теплозащитных характеристик ограждающих конструкций с экранной изоляцией и методика экспериментального исследования теплопроводности тонкостенных штукатурных слоев в ограждающих конструкциях, разработанные в результате исследований профессора, к.т.н., Ю. С. Вытчикова, аспиранта М. Е. Сапарёва, используются при выполнении лабораторных работ по курсу «Строительная теплофизика» на кафедре ОПФХ студентами специальности 270800.62 «Строительство» профиля подготовки «Теплогазоснабжение и вентиляция» с 2014 г.

Начальник учебного отдела

Зав. каф. ОПФХ,
профессор, д.ф.-м.н.

Разработчики

В. К. Солдатов

Н. С. Бухман

Ю. С. Вытчиков

М. Е. Сапарёв



ООО «НЕОВЕНТ», 443070, г.Самара, ул. Песчаная 1, офис 206.

Тел. (846) 267-31-80 E-mail: neovent@bk.ru

Исх. №348

От «22» августа 2014 года.

СПРАВКА

о практическом использовании результатов диссертационной работы М. Е. Сапарёва
«Исследование теплового режима утепленных ограждающих конструкций зданий и
воздуховодов с применением экранной тепловой изоляции»

Результаты научных исследований к.т.н., профессора кафедры ОПФХ СГАСУ Ю. С. Вытчикова и аспиранта кафедры ОПФХ СГАСУ М. Е. Сапарёва в виде методики теплотехнического расчета ограждающих конструкций воздуховодов применяются в ООО «НЕОВЕНТ» при расчете тепловой изоляции воздуховодов и оборудования систем вентиляции и кондиционирования.

Данная методика позволяет более точно определить теплотери изолированными воздуховодами приточных систем вентиляции и кондиционирования, а также изменение температуры транспортируемого воздуха.

С уважением,
Генеральный директор
ООО «НЕОВЕНТ»



Хурии И.А.

СПРАВКА

о практическом использовании результатов диссертационной работы
М. Е. Сапарёва «Исследование теплового режима утепленных ограждающих
конструкций зданий и воздуховодов с применением
экранной тепловой изоляции» в ООО «Ритм-Л»

В рамках рабочей документации «Жилая застройка в границах улиц Ново-Садовая, ул. Луначарского, пр. Ленина в Октябрьском районе г. Самары» при использовании результатов исследований к.т.н., профессора кафедры ОПФХ Ю. С. Вытчикова и аспиранта кафедры ОПФХ М. Е. Сапарёва был разработан и принят к внедрению способ внутреннего утепления пенополиуретаном, защищенным изнутри гипсокартоном с невентилируемой воздушной прослойкой, экранированной алюминиевой фольгой со стороны утеплителя.

Применение данного способа теплозащиты наружных стен позволяет снизить расход пенополиуретана на 20% по сравнению с вариантом напыления пенополиуретана, защищенного изнутри цементно-песчаным раствором. Расчетный годовой экономический эффект при осуществлении данного способа утепления составит 868614,6 руб/год.

Генеральный директор ООО «РИТМ-Л»,
доктор технических наук,
Советник РААСН,
Председатель Комиссии
по энергосбережению
в строительстве РОИС



Л. Д. Евсеев

Приложение В

Расчет влажностного режима наружной стены, утепленной с применением
экранной тепловой изоляции

Расчет ограждающей конструкции на соответствие требованиям паропроницаемости

Исходные данные:

Район строительства – г.Самара

Тип здания – здание культурно-зрелищного назначения

Расчетная схема ограждающей конструкции стены представлена на рисунке 1

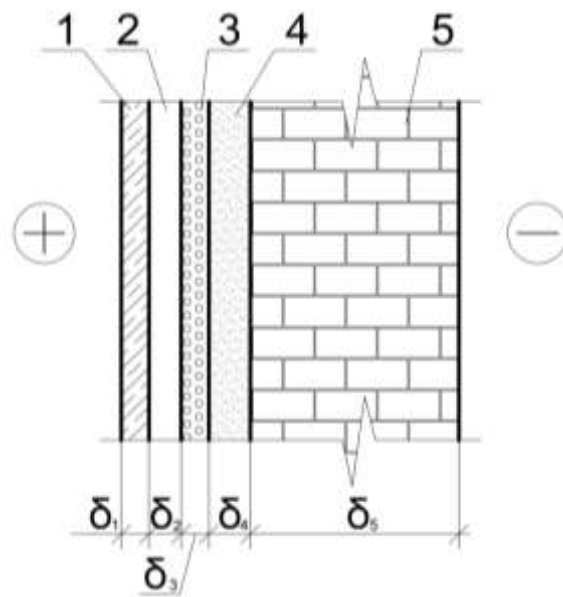


Рис. 1. Расчетная схема ограждающей конструкции стены

1 – гипсокартонные листы ГКЛО

$\delta_1 = 0,020$ м; $\gamma_1 = 800$ кг/м³; $\lambda_1 = 0,19$ Вт/(м°С); $\mu_1 = 0,075$ мг/(м·ч·Па)

2 – воздушная прослойка

$\delta_2 = 0,015$ м; $\lambda_2 = 0,041$ Вт/(м°С); $\mu_2 = 1$ мг/(м·ч·Па);

3 – пенофол

$\delta_3 = 0,010$ м; $\gamma_3 = 54$ кг/м³; $\lambda_3 = 0,033$ Вт/(м°С); $\mu_3 = 0,0022$ мг/(м·ч·Па);

4 – известково-песчаный раствор

$\delta_4 = 0,020$ м; $\gamma_4 = 1600$ кг/м³; $\lambda_4 = 0,70$ Вт/(м°С); $\mu_4 = 0,12$ мг/(м·ч·Па);

5 – кладка из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе

$\delta_5 = 0,51$ м; $\gamma_5 = 1800$ кг/м³; $\lambda_5 = 0,76$ Вт/(м°С); $\mu_4 = 0,11$ мг/(м·ч·Па).

Температура внутреннего воздуха принимается равной $t_{в} = 20$ °С; температура наиболее холодной пятидневки $t_{н} = -30$ °С; относительная

влажность внутреннего воздуха $\varphi_{\text{в}} = 55\%$; относительная влажность наружного воздуха $\varphi_{\text{н}} = 84\%$.

Определяем сопротивление теплопередаче глади наружной стены:

$$R_0^{\text{учл}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,19} + \frac{0,015}{0,041} + \frac{0,01}{0,033} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,51}{0,87} + \frac{1}{23} = 1,63 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}.$$

Находим общее сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции

$$R_{0,\text{п}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_4}{\mu_4} + \frac{\delta_5}{\mu_5} = \frac{0,02}{0,075} + \frac{0,015}{1} + \frac{0,01}{0,0022} + \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,51}{0,11} = 9,63 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$$

Определяем упругость водяного пара внутреннего воздуха $e_{\text{в}}$, Па, при расчетной температуре и влажности этого воздуха:

$$e_{\text{в}} = (\varphi_{\text{в}} / 100) E_{\text{в}} = (55 / 100) / 2338 = 1286 \text{ Па};$$

где $E_{\text{в}}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре $t_{\text{в}}$, принимается по [103], $E_{\text{в}} = 2338 \text{ Па}$.

Вычислим значение комплекса $f_i(t_{\text{м.у}})$, характеризующего температуру в плоскости возможной конденсации по формуле

$$f_i(t_{\text{м.у}}) = 5330 \frac{R_{0,\text{п}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н.отр}}) \mu_i}{R_0^{\text{учл}} (e_{\text{в}} - e_{\text{н.отр}}) \lambda_i}.$$

$$f_1(t_{\text{м.у}}) = 5330 \frac{9,63(20 - (-13,5))}{1,63(1286 - 220)} \frac{0,075}{0,19} = 391,6;$$

$$f_2(t_{\text{м.у}}) = 5330 \frac{9,63(20 - (-13,5))}{1,63(1286 - 220)} \frac{1}{0,041} = 143,6;$$

$$f_3(t_{\text{м.у}}) = 5330 \frac{9,63(20 - (-13,5))}{1,63(1286 - 220)} \frac{0,0022}{0,033} = 66,1;$$

$$f_4(t_{\text{м.у}}) = 5330 \frac{9,63(20 - (-13,5))}{1,63(1286 - 220)} \frac{0,12}{0,7} = 170,1;$$

$$f_5(t_{\text{м.у}}) = 5330 \frac{9,63(20 - (-13,5))}{1,63(1286 - 220)} \frac{0,11}{0,76} = 143,6.$$

По [104] определяем значения температур максимального увлажнения для каждого слоя многослойной конструкции:

$$t_{м.у1}=-17,2^{\circ}\text{C}; t_{м.у2}=-2,7^{\circ}\text{C}; t_{м.у3}=9,9^{\circ}\text{C}; t_{м.у4}=-5,3^{\circ}\text{C}; t_{м.у5}=-2,6^{\circ}\text{C}.$$

Вычислим температуры на стыках слоев:

$$t_1 = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0^{усл}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right) = 20 - \frac{20 - (-13,5)}{1,63} \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,19} \right) = 15,5^{\circ}\text{C};$$

$$t_2 = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0^{усл}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) = 20 - \frac{20 - (-13,5)}{1,63} \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,19} + \frac{0,015}{0,041} \right) = 8,0^{\circ}\text{C};$$

$$t_3 = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0^{усл}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) = 20 - \frac{20 - (-13,5)}{1,63} \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,19} + \frac{0,015}{0,041} + \frac{0,01}{0,033} \right) = 1,7^{\circ}\text{C};$$

$$t_4 = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0^{усл}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} \right) =$$

$$20 - \frac{20 - (-13,5)}{1,63} \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,19} + \frac{0,015}{0,041} + \frac{0,01}{0,033} + \frac{0,02}{0,7} \right) = 1,14^{\circ}\text{C};$$

$$t_5 = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0^{усл}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} \right) =$$

$$= 20 - \frac{20 - (-13,5)}{1,63} \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,19} + \frac{0,015}{0,041} + \frac{0,01}{0,033} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,51}{0,87} \right) = -10,9^{\circ}\text{C}.$$

Сравнивая полученные температуры в слоях и на их стыках, можно сделать вывод о том, плоскость возможной конденсации будет находиться в кирпичной кладке ограждающей конструкции.

Координата плоскости возможной конденсации $x_5=0,133$ м.

Определим фактическое сопротивление паропроонианию $R_{п.н}$ части ограждения между наружной поверхностью ограждения и плоскостью возможной конденсации:

$$R_{п.н} = \frac{\delta_5 - x_5}{\mu_5} = \frac{0,51 - 0,133}{0,11} = 3,43 \text{ м}^2 \cdot \text{Па/Вт}.$$

Определяем температуру t_i в зоне конденсации для трех периодов года:

а) зимний период (январь, февраль, март, декабрь):

$Z_1=4$ мес;

средняя температура зимнего периода t_1 :

$$t_1 = (-13,5 + (-12,6) + (-5,8) + (-9,6))/4 = -10,3 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура в зоне конденсации:

$$\tau_1 = -13,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

б) весенне-осенний период (октябрь, ноябрь):

$$Z_2 = 2 \text{ мес};$$

средняя температура весенне-осеннего периода t_2 :

$$t_2 = (4,2 + (-3,4))/2 = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура в зоне конденсации:

$$\tau_2 = -1,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

в) летний период (апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь):

$$Z_3 = 6 \text{ мес};$$

средняя температура летнего периода t_3 :

$$t_3 = (5,8 + 14,3 + 18,6 + 20,4 + 19 + 12)/6 = 15,01 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура в зоне конденсации:

$$\tau_3 = 14,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Согласно [103] по температурам τ_1 , τ_2 , τ_3 находим парциальные давления E_1 , E_2 , E_3 : $E_1=225 \text{ Па}$; $E_2=545 \text{ Па}$; $E_3=1615 \text{ Па}$.

Согласно [104] определяем упругость водяного пара в плоскости возможной конденсации за годовой период эксплуатации:

$$E = \frac{1}{12}(E_1 Z_1 + E_2 Z_2 + E_3 Z_3), \text{ Па},$$

где Z_1 , Z_2 , Z_3 – продолжительность, мес., зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов, соответственно.

$$E = (225 \cdot 4 + 545 \cdot 2 + 1615 \cdot 6)/12 = 973 \text{ Па}.$$

Определяем требуемое сопротивление паропроницанию из условия недопустимости накопления влаги в ограждении за годовой период эксплуатации:

$$R_{n1}^{\text{тр}} = \frac{(e_e - E)R_{\text{п.н}}}{(E - e_n)} = \frac{(1286 - 973)3,43}{973 - 310} = 1,62 \text{ м}^2\text{ч}\cdot\text{Па}/\text{мг},$$

Требуемое сопротивление паропроницанию из условия ограничения накопления влаги за период с отрицательными температурами определяется по формуле

$$R_{n2}^{\text{тр}} = \frac{0,0024z_0(e_e - E_0)}{\rho_w \delta_w \Delta w + \eta}, \text{ м}^2\text{ч}\cdot\text{Па}/\text{мг},$$

где z_0 - продолжительность периода влагонакопления, сут., т.е. периода с отрицательными температурами; ρ_w - плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\rho_w = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$; δ_w - толщина изоляции, м; Δw - предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале, %, $\Delta w_{av} = 2\%$; η - коэффициент, определяемый по [104].

Для определения E_0 находим температуру в плоскости возможной конденсации при средней температуре наружного воздуха $t_0 = -8,98^\circ\text{C}$.

$$\tau_0 = 20 - (20 - (-8,9)) \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,19} + \frac{0,015}{0,041} + \frac{0,01}{0,033} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,133}{0,76} \right) / 1,63 = 0,6^\circ\text{C};$$

$$E_0 = 630 \text{ Па};$$

$$\eta = 0,0024(E_0 - e_{\text{н.отр}})z_0 / R_{\text{п.н}} = 0,0024(630 - 310) \cdot 151 / 3,43 = 33,8,$$

$e_{\text{н.отр}}$ - средняя упругость водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре наружного воздуха $t_0 = -8,98^\circ\text{C}$, $e_{\text{н.отр}} = 310 \text{ Па}$.

$$R_{n2}^{\text{тр}} = \frac{0,0024 \cdot 151(1286 - 630)}{1800 \cdot 0,51 \cdot 2 + 33,8} = 0,13 \text{ м}^2\text{ч}\cdot\text{Па}/\text{мг}.$$

Далее определяем фактическое сопротивление паропроницанию R_{vp} части ограждения между внутренней поверхностью ограждения и плоскостью возможной конденсации:

$$R_n = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_4}{\mu_4} + \frac{x_5}{\mu_5} = \frac{0,02}{0,075} + \frac{0,015}{1} + \frac{0,01}{0,0022} + \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,133}{0,11} = 6,21 \text{ м}^2\text{ч}\cdot\text{Па}/\text{мг}.$$

$$R_n > R_{n2}^{\text{tp}}; 6,21 > 0,13;$$

$$R_n > R_{n2}^{\text{tp}}; 6,21 > 1,62.$$

Приложение Г

Исследование паропроницаемости вспененного полиэтилена

Цель работы – определить значения коэффициента паропроницаемости образца вспененного полиэтилена.

В процессе выполнения работы были определены экспериментальным путем значения коэффициентов паропроницаемости образца вспененного полиэтилена.

Методика проведения испытаний на паропроницаемость строительных и теплоизоляционных материалов

Экспериментальное исследование паропроницаемости теплоизоляционных и строительных материалов проводилось в соответствии с ГОСТ 25898-2012 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию».

Схема установки для определения паропроницаемости исследуемых теплоизоляционных материалов приведена на рис. Г.1.

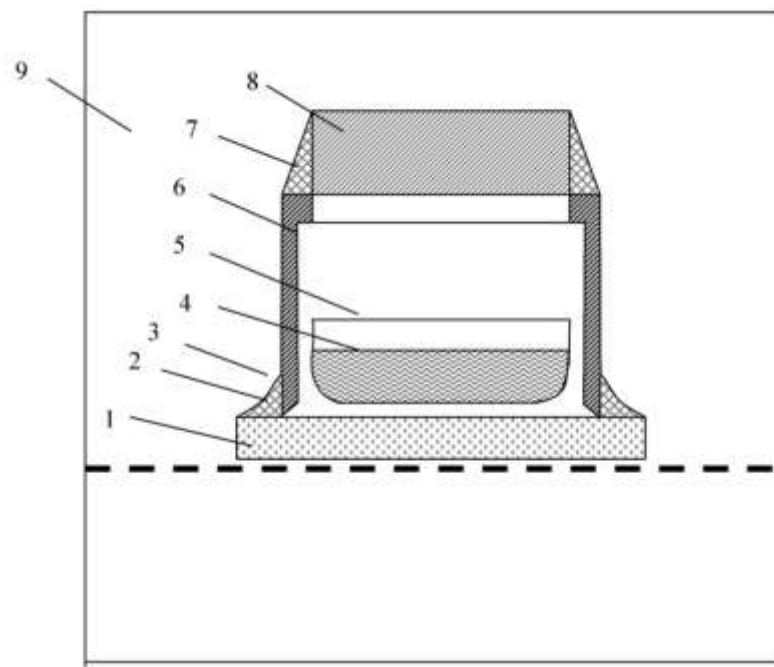


Рис. Г.1. – Схема прибора для определения паропроницаемости:

- 1 – перфорированная металлическая полка; 2 – стеклянная пластина;
- 3 – пластилин; 4 – дистиллированная вода; 5 – стеклянная чашка типа ЧВ;
- 6 – металлическая цилиндрическая обойма; 7 – смесь парафина с канифолью; 8 – образец испытуемого материала; 9 – шкаф

Исследуемый образец 8 помещался на металлическую обойму 6. Промежутки между боковой поверхностью образца и верхней гранью металлической обоймы заполнялись разогретой смесью парафина и канифоли 7. В стеклянную чашку 5 наливалось (120 ± 5) г дистиллированной воды 4. Чашка взвешивалась, устанавливалась на стеклянную пластинку 2 размерами 130×130 мм и накрывалась металлической обоймой с образцом. Промежуток между боковой поверхностью обоймы и стеклянной пластиной заполнялся пластилином 3.

Проведение эксперимента

Три образца исследуемого материала диаметром 100 мм помещались на перфорированную полку шкафа. Шкаф находился в термостатированном помещении с температурой (20 ± 2) °С.

На нижнюю полку шкафа помещались чашки с насыщенным водным раствором шестиводного азотнокислого магния для создания в шкафу относительной влажности воздуха $(54,5 \pm 1)$ %.

На перфорированной полке шкафа размещался измеритель температуры и влажности CENTER 313, термограф и гигрограф для непрерывного измерения температуры и относительной влажности воздуха в шкафу при проведении испытания. Один раз в 7 суток для сравнения измерялась аспирационным психрометром температура и относительная влажность воздуха в шкафу.

При закрытии шкафа, щели между дверцами шкафа и корпусом промазывали строительной мастикой.

Через 7 суток, после начала испытания, стеклянная чашка с дистиллированной вынималась из металлической обоймы и взвешивалась. Эксперимент повторялся трижды. За плотность потока принимали наименьшее значение из результатов трех последовательных взвешиваний.

По результатам взвешивания вычислялась плотность потока водяного

пара проходящего через образец по формуле:

$$q_{vp} = \frac{\Delta m}{\Delta \tau \cdot F}, \text{ мг/(ч} \cdot \text{м}^2\text{)}, \quad (\text{Г.1})$$

где Δm – уменьшение массы чашки с дистиллированной водой за время $\Delta \tau$, мг;

$\Delta \tau$ – время между двумя последовательными взвешиваниями, ч;

F – площадь образца, м².

Сопротивление паропрооницанию слоя материала R_{vp} , (м²·ч·Па)/мг, вычислялось по формуле:

$$R_{vp} = \frac{E_{p1} - e_2}{q_{vp}} - \frac{\delta_{a.l}}{\mu_{a.l}}, \quad (\text{Г.2})$$

где E_{p1} – парциальное давление насыщенных паров воды при температуре испытания, Па;

$\delta_{a.l}$ – толщина воздушного слоя, равная расстоянию от уровня воды в стеклянной чашке до нижней грани образца в обойме при последнем взвешивании, м;

$\mu_{a.l}$ – паропроницаемость воздуха в металлической обойме с образцом, равная 1,01 мг/(м·ч·Па);

e_2 – парциальное давление паров над образцом, Па.

Величина e_2 , Па, вычислялась по формуле:

$$e_2 = \frac{\varphi_{av} \cdot E_{p1}}{100}, \quad (\text{Г.3})$$

где φ_{av} – среднее значение относительной влажности воздуха в шкафу за последние 7 суток испытания, определяемое по показаниям измерителя температуры и влажности CENTER 313, %.

Коэффициент паропроницаемости материала каждого образца вычислялся по формуле:

$$\mu = \frac{\delta}{R_{vp}}, \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}, \quad (\text{Г.4})$$

где δ – толщина образца, м.

Коэффициент паропроницаемости испытываемого материала вычислялся как среднее арифметическое значение результатов измерения паропроницаемости трех образцов материала.

Результаты испытаний образца вспененного полиэтилена на паропроницаемость

Результаты испытаний на паропроницаемость образца вспененного полиэтилена приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1

Результаты испытаний образца вспененного полиэтилена на паропроницаемость

Материал	№ пробы	Изменение массы воды Δm , мг	Время между двумя взвешиваниями Δt , ч	Средняя температура воздуха в шкафу t_a , °C	Средняя относительная влажность воздуха $\varphi_{a,1}$, %	Толщина пробы δ , м	Толщина воздушного слоя $\delta_{a,1}$, м	Плотность потока водяного пара q_{vp} , мг/(ч·м²)	Сопротивление паропропусканию пробы R_{vp} , (м²·ч·Па)/мг	Коэффициент паропроницаемости пробы μ , мг/(м·ч·Па)
Пенофол	1	480	168	23	50	0.009	0.017	364.16	3.91	0.0022