

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



КОРОЯНОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ НА
ОСНОВЕ СТЕНОВЫХ БЛОКОВ С КАПИЛЛЯРНЫМИ ТРУБКАМИ**

Специальность 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Зайцев Олег Николаевич

Курск 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ	13
1.1 Системы водяного отопления: преимущества и недостатки	13
1.2 Тепловой комфорт в помещениях при проектировании систем отопления	18
1.3 Системы водяного отопления на основе капиллярных трубок	24
1.4 Методы расчета и проектирования систем водяного отопления на основе капиллярных трубок.....	30
1.5 Выводы	39
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНОВОГО БЛОКА С СИСТЕМОЙ КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБОК.....	40
2.1 Разработка конструкции стенового блока с системой капиллярных трубок	40
2.2 Численная модель стенового блока с системой капиллярных трубок.	43
2.2.1 Трехмерная модель стенового блока с системой капиллярных трубок для исследования.....	46
2.2.2 Анализ результатов теплового расчета стенового блока с системой капиллярных трубок	48
2.3 Тепловой расчет помещения при отоплении с помощью стенового блока с системой капиллярных трубок.....	58
2.3.1 Трехмерная модель помещения.....	58
2.3.2 Анализ теплового расчета помещения со стеновым блоком с системой капиллярных трубок	59
2.4 Верификация полученных результатов.....	65
2.5 Выводы	66
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНОВОГО БЛОКА СИСТЕМЫ КАПИЛЛЯРНОГО ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ	68

3.1 Описание экспериментального стенда.....	73
3.2 Экспериментальное исследование изменения температуры теплоносителя на выходе при использовании блока предложенной конструкции	77
3.3 Экспериментальное исследование изменения средней температуры поверхности блока предложенной конструкции.....	98
3.4 Тепловизионный анализ экспериментального блока	110
3.4 Метрологический анализ экспериментальных исследований.....	119
3.5 Выводы	120
ГЛАВА 4. ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ. АЛГОРИТМ ПОДБОРА ПРЕДЛОЖЕННОГО СТЕНОВОГО БЛОКА С СИСТЕМОЙ КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБОК. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ.....	123
4.1 Методика проведения промышленного испытания оборудования	123
4.2 Алгоритм подбора стенового блока с системой капиллярных трубок (инженерный расчет).....	131
4.3 Техничко-экономическое обоснование применимости разработанных средств	135
4.4 Выводы	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	159
Приложение А. Акт о внедрении в образовательный процесс результатов диссертационной работы.....	183
Приложение Б. Акт о внедрении результатов диссертационной работы ООО «ПРАЙМКЕЙ»	184
Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы ООО «ЕВРОКЛИМАТ 2000»	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Системы теплоснабжения являются одним из основополагающих элементов обеспечения развития государства. Учитывая широкую географию и разнообразие климатических зон на территории Российской Федерации, для проектирования отопительных систем требуется учет множества факторов, включая помимо климата, конструкцию и назначение зданий, их теплоизоляцию, массивность ограждающих конструкций. Согласно проведенному анализу, на долю жилых зданий приходится около 40% всей потребляемой тепловой энергии.

Основная часть отопительных систем в жилых зданиях реализуется с помощью радиаторов. Однако, несмотря на свое большое распространение, такие системы имеют ряд недостатков, негативным образом влияющих на энергоэффективность теплоснабжения. Использование альтернативных вариантов отопительных систем, например, водяного или электрического теплого пола, сопряжено с более высокими затратами на монтаж и эксплуатацию.

Поэтому актуальным является вопрос поиска альтернативных вариантов систем отопления, которые с одной стороны позволяли бы повысить энергоэффективность теплоснабжения жилых зданий, а с другой стороны имели бы экономическую целесообразность их реализации.

Степень разработанности темы исследования.

Фундаментальные вопросы, связанные с работой отопительных систем в целом, поднимались в работах П.Н. Каменева, [1], А.Н. Сканави [2], В.Н. Богословского [56], низкотемпературных отопительных систем – А.Г. Крафта [3].

Вопросами применения низкотемпературных отопительных систем занимались О.Н. Зайцев [7, 8], И.П. Ангелюк [9]. В работах А.В. Ищенко [47], Г.Д. Никитина [48] рассматриваются системы водяного теплого пола.

Вопросами использования лучистых климатических систем в последнее время занимались С.А. Волошин [59], М.В. Бодров [63, 69], К.В. Макунина [67], А.Е. Руин [68], вопросами капиллярного водяного отопления – Н.И. Захаров [60], А.В. Шишкин [62], М.В. Хрестьяновская [64], К. Р. Marshall [65], Chuck Yu [104], использованием капиллярных систем для кондиционирования воздуха в помещении – В.А. Широков [70], А.Ю. Попова [71], А.А. Жуликов [72], К.А. Трошкин [73]. Вопросам математического и численного моделирования капиллярных отопительных систем посвящены работы А.В. Шишкина [77], Sh. Fu [74], S. Gendelis [86].

Кроме того, были рассмотрены работы отечественных и зарубежных авторов, посвященные вопросам оптимизации и повышения эффективности систем водяного отопления. Однако, в современных условиях произошли изменения в тепловом распределении и изменении интенсивности тепловых процессов в отапливаемых помещениях, которые требуют изменения подхода к системам водяного отопления и расположению нагревательных приборов. В частности, увеличение термосопротивления ограждающих конструкций в несколько раз и уменьшение температуры в системах отопления привели к уменьшению мощности конвективного потока от нагревательных приборов, что изменило аэродинамику движения воздуха в помещении (в данном случае, инфильтрирующийся воздух закрывал нагревательный прибор, который по нормативным требованиям должен располагаться в местах наибольших теплопотерь).

Объект исследования – система водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками.

Предмет исследования – термодинамические и гидродинамические характеристики стеновых блоков с системой капиллярных трубок.

Цель работы заключается в совершенствовании системы водяного отопления помещений жилых зданий на основе использования блоков с капиллярными трубками путем более равномерного распределения тепла в

помещении за счет использования совмещения блоков и внутренних стеновых панелей для улучшения условий комфортности микроклимата.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

1) Выполнить обзор существующих систем отопления жилых зданий с целью выявления достоинств и недостатков каждого из них с учетом снижения температурного режима системы отопления и уменьшения мощности конвективного потока в местах наибольших теплопотерь.

2) На основании выполненного анализа существующих систем отопления разработать оригинальную конструкцию стенового блока с системой капиллярных труб, позволяющую добиться равномерного прогрева воздуха в помещении путем дополнительного радиационного нагрева внутренней поверхности ограждающих конструкций в местах наибольших теплопотерь при соблюдении нормативных значений температуры воздуха и потерь давления в системе.

3) Выполнить численное моделирование предложенной конструкции стенового блока для определения параметров его работы, при которых достигается наиболее равномерный прогрев воздуха в помещении при минимально возможных энергозатратах.

4) Провести экспериментальные исследования термодинамических характеристик стенового блока с системой капиллярных трубок на разработанном экспериментальном стенде и сопоставить их с данными, полученными в результате численного моделирования.

5) Разработать алгоритм инженерного расчета стенового блока с системой капиллярных трубок, учитывающий параметры его эксплуатации и позволяющий обеспечить требуемую температуру воздуха и условия комфортности микроклимата в отапливаемом помещении.

6) Выполнить оценку экономической эффективности внедрения разработанной системы отопления жилых зданий на основе стеновых блоков с капиллярными трубками для различных регионов Российской Федерации.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Выявлено, что в современных системах отопления при снижении температурного режима и уменьшении мощности конвективного потока в местах наибольших теплопотерь происходит подавление конвективной составляющей нагревательного прибора, что приводит к потере количества тепла, передаваемого в помещение. Для исключения данного недостатка предложена оригинальная конструкция стенового блока с системой капиллярных трубок для реализации систем водяного отопления жилых зданий, при которой достигается равномерный прогрев поверхности стенового блока, равномерное распределение температуры по отапливаемому помещению, а также потери давления в системе, сопоставимые с потерями давления в системах радиаторного водяного отопления и системах водяного теплого пола.

2. Выполнено численное моделирование стенового блока с системой капиллярных труб, в результате которого определены режимные параметры его работы при заданных параметрах теплоносителя, а также распределение температуры по помещению, отапливаемому с помощью данного блока.

3. Получено регрессионное уравнение зависимости температуры теплоносителя на выходе из стенового блока от температуры теплоносителя на входе, массового расхода теплоносителя и диаметра капиллярных трубок, графический анализ которого показал, что наибольшая интенсивность изменения температуры теплоносителя на выходе из системы наблюдается при изменении температуры теплоносителя на входе, изменение массового расхода напрямую влияет на изменение температуры на выходе, а диаметр капиллярных трубок практически не оказывает влияния на данный параметр. При этом, во всех случаях наблюдается параболическая зависимость, а увеличение массового расхода теплоносителя приводит к тому, что разница температур на входе и выходе из системы уменьшается, что свидетельствует о снижении теплоотдачи системы.

4. Определена регрессионная зависимость средней температуры поверхности стенового блока от температуры теплоносителя на входе и его массового расхода, с помощью которой составлены соответствующие графики, анализ которых выявил, что наибольшая интенсивность изменения средней температуры поверхности стенового блока наблюдается при изменении температуры теплоносителя на входе, увеличение массового расхода теплоносителя также приводит к увеличению средней температуры поверхности блока, но с меньшей интенсивностью.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке численной модели предложенной конструкции стенового блока с системой капиллярных труб, описывающей параметры его работы, получении регрессионных зависимостей для определения температуры теплоносителя на выходе из стенового блока и средней температуры поверхности блока.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке алгоритма инженерного подбора стенового блока с системой капиллярных труб, разделенной на секции, для отопления помещений жилых зданий с учетом условий эксплуатации. Также произведена оценка экономической эффективности внедрения предложенной системы отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубами для различных регионов Российской Федерации, в ходе которой было выявлено, что наибольшая экономическая целесообразность использования данной системы существует в регионах с холодным и умеренно-холодным климатом с температурой воздуха наиболее холодной пятидневки от -18°C до -24°C и продолжительностью отопительного сезона от 184 до 203 дней.

Методология и методы исследования.

Диссертационное исследование выполнено с использованием следующих методов научного исследования: анализа научно-технической литературы, сравнительного анализа, численного моделирования в программной среде SolidWorks FlowSimulation, экспериментальных исследований, тепловизионного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная конструкция стенового блока с системой капиллярных трубок, состоящая из листов гипсокартона, между которыми находятся секции капиллярных трубок, соединенные коллекторами, каждая из которых состоит из 30 капиллярных трубок, расположенных с интервалом 0,015 м, позволяющая обеспечить равномерный прогрев поверхности стенового блока, а также равномерное распределение тепла по помещению с соблюдением нормативных требований.

2. Численное моделирование предложенной конструкции стенового блока на основании блока программ SolidWorks FlowSimulation, описывающее термодинамические и гидродинамические параметры работы системы, а также параметры температуры воздуха в отапливаемом помещении при использовании предложенной системы капиллярного водяного отопления.

3. Полученная регрессионная зависимость температуры теплоносителя на выходе из стенового блока с системой капиллярных трубок от температуры теплоносителя на входе в диапазоне 40-50 °С, массового расхода теплоносителя в диапазоне 0,0055-0,0083 кг/с и диаметра капиллярных трубок 0,003-0,006 м, определившая, что в результате обработки результатов экспериментальных исследований данные соответствуют результатам, полученным в ходе математического моделирования (расхождения не превышают 5%).

4. Полученная регрессионная зависимость средней температуры поверхности стенового блока с системой капиллярных трубок от температуры теплоносителя на входе в диапазоне 40-50°С и массового расхода теплоносителя в диапазоне 0,0055-0,0083 кг/с, полученная в результате обработки результатов экспериментальных исследований.

5. Алгоритм инженерного подбора стенового блока с системой капиллярных трубок, позволяющий определить требуемые параметры системы для отопления помещения с учетом геометрии помещения и условий эксплуатации системы.

6. Расчет экономической эффективности внедрения предложенной системы водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками, показавший наибольшую экономическую целесообразность внедрения предложенной системы в регионах с температурой воздуха наиболее холодной пятидневки от -18°C до -24°C и продолжительностью отопительного сезона от 184 до 203 дней.

Степень достоверности научных положений и выводов диссертационного исследования подтверждается использованием современных методов численного моделирования с помощью программного обеспечения SolidWorks FlowSimulation и корректным применением методов статистической обработки результатов экспериментальных исследований. Между результатами, полученными в ходе численного моделирования и в ходе экспериментальных исследований, отсутствуют противоречия, расхождения составляют не более 5%. Результаты выполненного диссертационного исследования были внедрены в образовательную и производственную деятельность.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования, методы расчета и конструктивные решения внедрены в практику проектирования ООО «Евроклимат 2000», ООО «Праймкей» и использованы при проектировании объектов «Промышленный комплекс по производству фармацевтических субстанций на площадке ОЭЗ ППТ «Калуга» и «Завод по производству готовых лекарственных форм на площадке ОЭЗ ППТ «Моглино», что подтверждается полученными актами о внедрении. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск) и используются при проведении лабораторных работ, практических занятий, а также в курсовом и дипломном проектировании бакалавров направлений подготовки 08.03.01 «Строительство» и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», магистров направлений подготовки 08.04.01 «Строительство» и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» при изучении дисциплин:

«Отопление», «Теплоснабжение», «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологии», «Децентрализованное отопление и горячее водоснабжение», «Термодинамические и теплообменные процессы в теплоэнергетике».

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались на следующих научно-практических конференциях: XIII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2024), LXXVIII Международная научно-практическая конференция «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика» (Санкт-Петербург, 2024), Международный научный семинар «Вопросы эффективности в различных отраслях» (Брест, 2025), 77-я Международная научная конференция «Социотехническое строительство» (Казань, 2026).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 8 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в издании, входящем в международную реферативную базу данных Scopus.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, проведении комплексного аналитического обзора литературных источников, разработке теоретических положений и численной модели стенового блока с системой капиллярных труб в программной среде SolidWorks FlowSimulation. Автор лично организовывал и проводил экспериментальные исследования на лабораторных и промышленных установках, осуществлял обработку полученных экспериментальных данных и производил анализ результатов проведенных исследований. Личное участие автора заключалось также в подготовке научных публикаций и апробации результатов работы на конференциях и семинарах. Все основные научные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, получены автором самостоятельно.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 185 страницах машинописного текста, содержит 19 таблиц, 69 рисунков, 3 приложения, библиографический список состоит из 145 источников.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ

1.1 Системы водяного отопления: преимущества и недостатки

Повышение эффективности использования энергетических ресурсов является одной из важнейших задач, стоящих перед исследователями. Российские и зарубежные ученые ищут способы, позволяющие повысить энергоэффективности отопительных систем, что отражено в ряде публикаций по данной тематике [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Проектирование систем теплоснабжения осуществляется на основе нормативных документов [10, 11, 12, 13, 14, 15], в которых установлены основные требования к системам отопления.

Необходимость внедрения энергосберегающих технологий в системах отопления, а также основные принципы правового регулирования в данной сфере отражены в [10, 16].

Значительная часть потребления тепловой энергии в жилых и коммерческих зданиях приходится на системы водяного отопления, в которых в качестве теплоносителя используется вода [17, 18, 19]. Данный вид отопления является наиболее распространенным на территории России. Различными исследователями совершенствуются методики расчета систем водяного отопления и изучаются перспективы их дальнейшего развития с учетом меняющихся требований к отопительным системам [20, 21, 22, 23]. Гидравлический режим также играет важную роль в организации системы отопления и активно исследуется. Так, например, в работе [24] автор приводит методику технического обоснования необходимости установки регуляторов в двухтрубных системах отопления.

К системам водяного отопления относятся, например, радиаторные системы, системы теплого пола, плинтусное отопление. Далее рассмотрим преимущества и недостатки каждого из них.

Наиболее широко применяемым видом систем отопления является радиаторное отопление. На рисунке 1.1 представлена доля рынка радиаторов отопления по сегментам потребления.

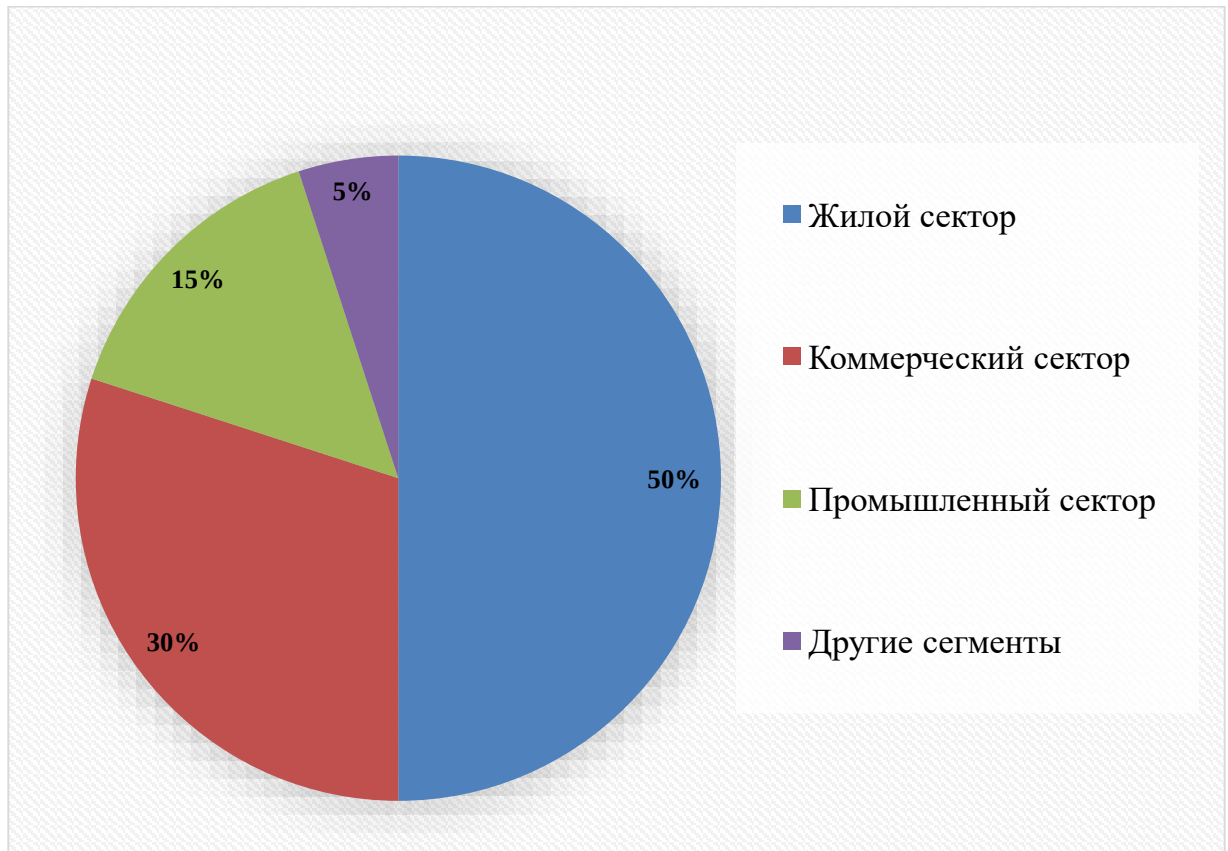


Рисунок 1.1 – Доля рынка радиаторов отопления по сегментам потребления

Из представленной диаграммы видно, что основная доля радиаторного отопления приходится на жилой и коммерческий секторы. Однако, несмотря на широкое распространение, данный вид отопления имеет существенный недостаток, а именно высокие тепловые потери. Большую часть составляют конвективные тепловые потери, происходящие через стены, окна и другие ограждающие конструкции. При этом дополнительные тепловые потери через перегретую стену за радиатором могут достигать 30 % [25]. Также на тепловые потери влияют качество теплоизоляции и климатические условия. Распределение тепловых потерь для частного жилого дома представлено на рисунке 1.2.

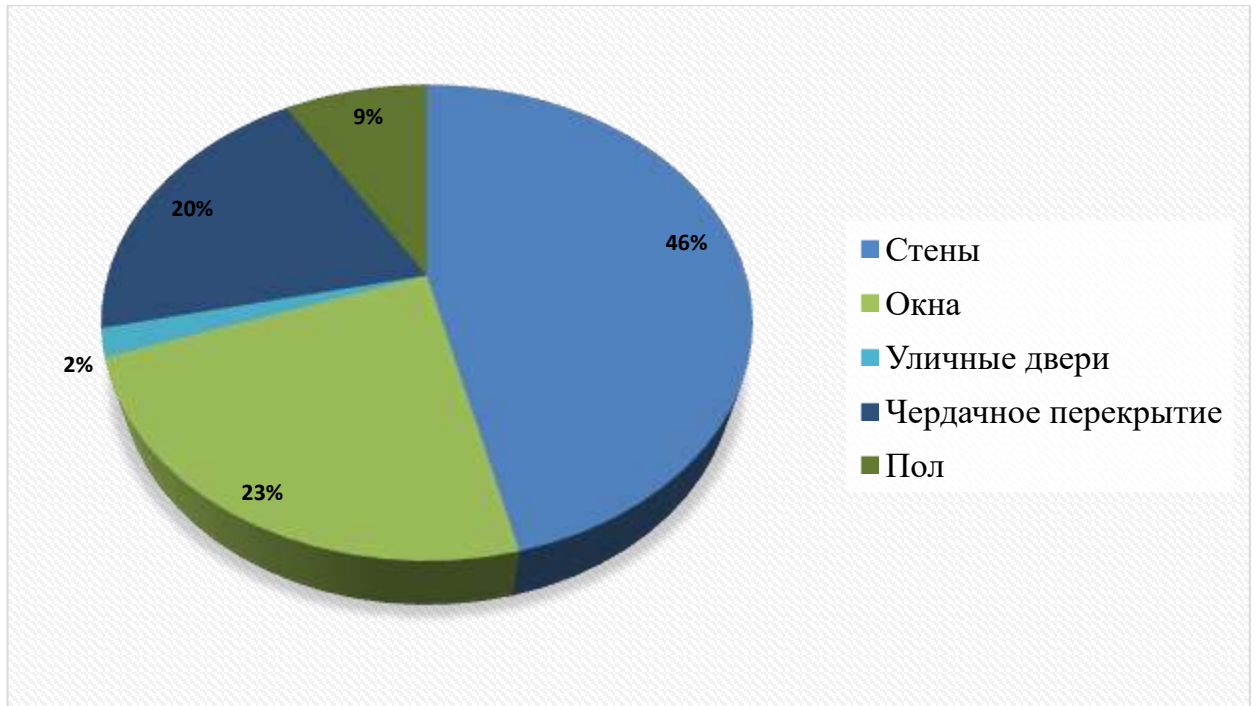


Рисунок 1.2 – Теплопотери частного жилого дома

Для повышения энергоэффективности систем радиаторного водяного отопления и условий комфортности микроклимата разрабатываются различные технологические решения. Например, в работе [26] авторы предлагают внедрение системы, позволяющей в автоматическом режиме регулировать температуру теплоносителя в закрытой системе. Авторы на примере школы производят расчеты, в результате которых приходят к выводу, что использование такой системы позволяет снизить коммунальные затраты на 14,05%.

Последние десятилетия в РФ активно развивается индивидуальное строительство. Многоквартирных домов с централизованными системами отопления в процентном соотношении становится все меньше. Поэтому существует необходимость в разработке энергоэффективных систем поквартирного отопления и автономных систем отопления для частных домов. На рисунке 1.3 представлен объем ввода жилья в России за последние 5 лет.

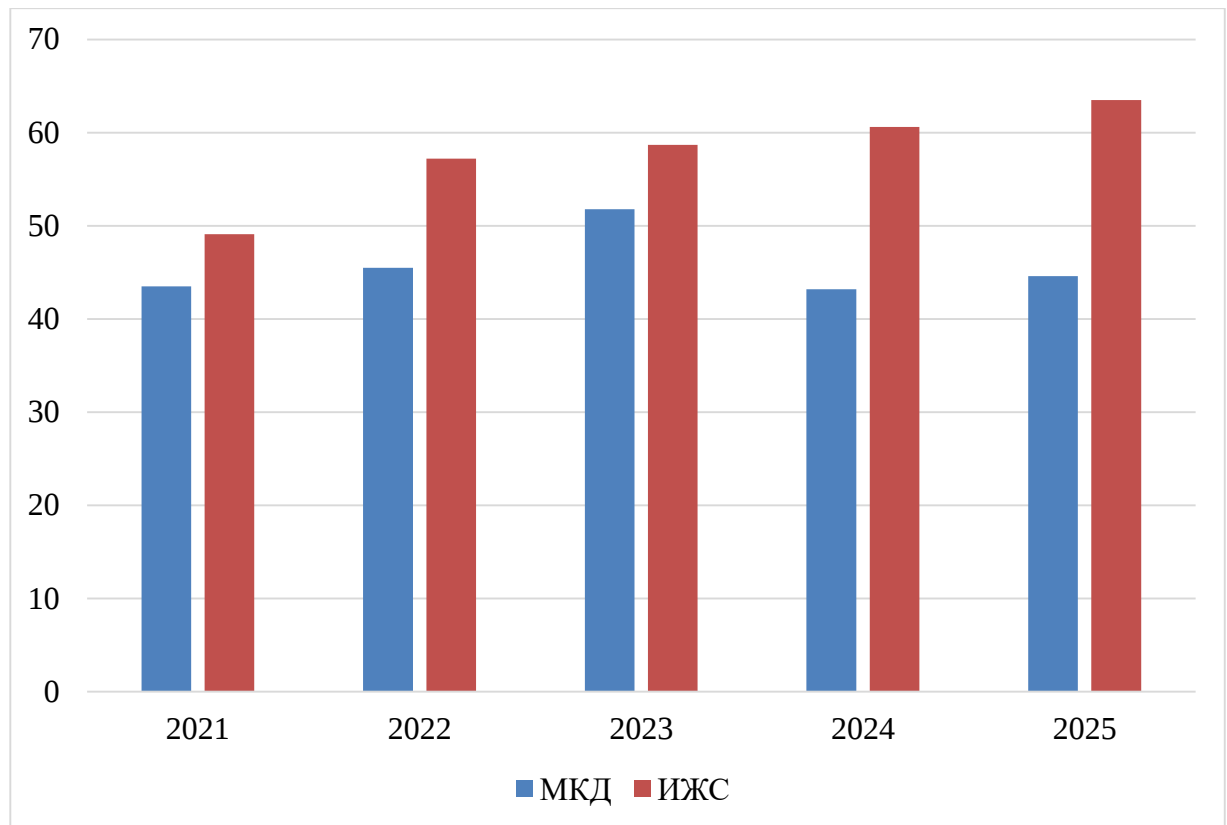


Рисунок 1.3 – Объем ввода жилья в РФ (млн м²)

В случае с частными жилыми домами имеется необходимость устройства автономной системы отопления [27]. Она может быть реализована с помощью газовых котлов, электрических водонагревателей или бойлеров косвенного нагрева. Также для организации данных систем могут применяться гелиоколлекторы [28, 29, 30, 31, 32].

Особенности работы газовых котлов, их преимущества и недостатки рассмотрены в работах [33, 34, 35].

Помимо частных домов газовые и электрические водяные котлы используются для организации систем поквартирного отопления в многоквартирных домах. В работах [36, 37, 38, 39] рассматриваются вопросы проектирования и перспектив развития данных систем. Работы [40, 41] содержат исследования по регулированию и обеспечению устойчивости систем поквартирного отопления.

Одним из основных способов повышения энергоэффективности отопительных систем является снижение температуры теплоносителя. Это

дает возможность использовать в системах отопления конденсационные котлы, которые имеют более высокий КПД в сравнении с традиционными газовыми котлами при температуре теплоносителя до 55 °С [42, 43], а также тепловые насосы [44, 45].

Однако, необходимо учитывать тот факт, что в системах радиаторного водяного отопления основная часть тепла передается за счет конвекции. В зоне установки отопительного прибора возникает мощный конвективный поток, направляющий теплый воздух к потолку. В связи с тем, что воздух обладает вязкостью, при снижении температуры теплоносителя в радиаторе происходит подавление конвективных потоков в зоне установки отопительного прибора. В результате снижается количество тепла, передаваемого от радиатора в отапливаемое помещение, и увеличиваются тепловые потери через наружные стены [46].

Таким образом, для реализации систем низкотемпературного отопления требуются отопительные приборы с большой теплопередающей поверхностью. Примером таких систем, применяемых на практике, являются системы водяного и электрического теплого пола.

Одним из альтернативных вариантов реализации систем водяного отопления являются системы водяного теплого пола. В статьях [47, 48, 49, 50] рассматриваются системы водяного теплого пола с точки зрения энергоэффективности и экономической выгоды. Данный вид отопления может быть использован и как самостоятельная система, и совместно с радиаторным водяным отоплением в тех случаях, когда мощности водяного теплого пола недостаточно для компенсации тепловых потерь помещения. Использование водяных теплых полов позволяет добиться более равномерного прогрева воздуха по всему объему отапливаемого помещения. Однако, расположенная в помещении мебель, а также различные напольные покрытия напрямую влияют на эффективность данного вида отопления. Кроме того, обслуживание и ремонт водяных теплых полов значительно сложнее и дороже, чем систем

радиаторного водяного отопления, поскольку трубы располагаются в стяжке пола.

Альтернативным вариантом является использование электрических теплых полов, монтаж которых обходится дешевле, чем у водяных, однако эксплуатационные расходы значительно выше, что делает данный вид отопления менее востребованным, нежели водяное [51, 52, 53].

Существуют также системы плинтусного водяного отопления. При их использовании распределение температуры по отапливаемому помещению более равномерное, чем при радиаторном водяном отоплении. При этом для их работы температура теплоносителя должна быть на уровне радиаторных систем [54, 55].

1.2 Тепловой комфорт в помещениях при проектировании систем отопления

Рассмотренные выше системы водяного отопления различаются по способу передачи тепла в отапливаемое помещение. В случае радиаторного отопления основная часть тепла передается за счет конвекции. Системы водяного и электрического теплого пола, а также системы плинтусного отопления являются лучистыми, поскольку основная часть тепла передается путем радиационного теплообмена. При использовании лучистых отопительных систем радиационная температура помещения оказывается больше, чем температура воздуха [56].

В случае применения радиаторных систем отопления или систем с использованием конвекторов возникает неравномерное распределение температур по высоте, хотя средняя температура воздуха в помещении поддерживается на требуемом уровне. Основная часть тепла от радиаторов и конвекторов передается путем конвекции. При этом основной конвективный поток возникает в зоне расположения отопительного прибора. За счет данного потока происходит неравномерный прогрев воздуха в помещении. Зона

наиболее комфортной температуры (20-22 °С) располагается в данном случае на уровне груди человека, воздух возле потолка при этом нагревается на 2-3 °С выше, а на уровне пола температура может держаться на уровне 18-19 °С [57]. При этом средняя температура воздуха в помещении поддерживается на требуемом уровне [12].

Применение лучистых систем отопления, например, теплого пола за счет отсутствия мощных конвективных потоков, создает более комфортные условия для человека. Большая часть тепла в таких системах передается за счет радиационного теплообмена. Однако, такие системы могут монтироваться не только на полу. В зависимости от конкретной задачи отопительные приборы могут быть смонтированы на стенах или потолках.

Необходимо отметить, что требования к величине температуры воздуха в помещении в отопительный период, указанные в [12] относятся не ко всему объему помещения, а только к его обслуживаемой зоне. Обслуживаемая зона помещения, для которой определены нормы, представлена на рисунке 1.4. Параметры данного пространства следующие: нижняя граница находится на высоте 0,1 м от уровня пола, верхняя граница – на высоте 2 м от уровня пола, расстояние от стен составляет 0,5 м.



Рисунок 1.4 – Границы обслуживаемой зоны помещения

В таблице 1.1 представлены требования к параметрам микроклимата в отапливаемом помещении в соответствии с [12].

Таблица 1.1 – Нормируемые параметры микроклимата помещения

Параметр	Оптимальные значения	Допустимые значения
Температура воздуха, °C	20-22	18-24
Результирующая температура, °C	19-20	17-23
Относительная влажность, %	30-45	60
Скорость движения воздуха, м/с	0,15	0,2

Для определения значений результирующей температуры, используется соотношение (1.1) в том случае, если скорость движения воздуха не превышает 0,2 м/с. В случае, если она находится в диапазоне от 0,2 до 0,6 м/с, используется формула (1.2) [12].

$$t_{su} = \frac{t_p + t_r}{2}; \quad (1.1)$$

$$t_{su} = 0,6 \cdot t_p + 0,4 \cdot t_r, \quad (1.2)$$

где t_{su} – результирующая температура помещения, °С;

t_p – температура воздуха внутри помещения, °С;

t_r – радиационная температура внутри помещения, °С.

Радиационная температура при выполнении практических расчетов определяется по упрощенному выражению [54]:

$$t_r = \frac{\sum F_i \cdot t_i}{\sum F_i}, \quad (1.3)$$

где t_i – температура внутренней поверхности ограждений помещения и отопительных приборов с площадью внутренней поверхности F_i , °С.

На рисунке 1.5 представлены оптимальные соотношения температуры воздуха внутри помещения и радиационной температуры для различных условий нахождения в нем человека в отопительный период [56].

В соответствии с [13] условия комфорта микроклимата в помещении оцениваются с помощью двух основных показателей:

- PMV (Predicted Mean Vote) – прогнозируемая средняя оценка воздушной среды;

- PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) – прогнозируемый процент недовольных температурой среды.

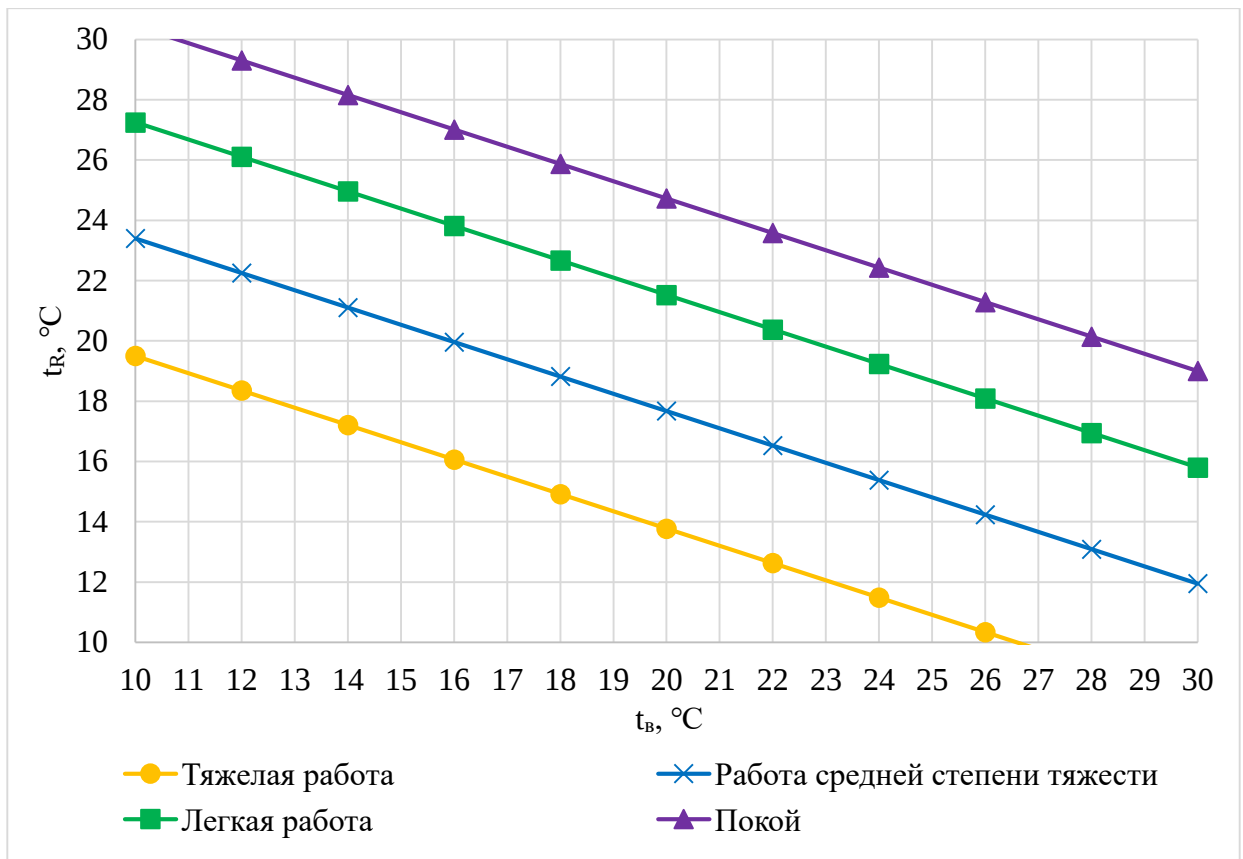


Рисунок 1.5 – Оптимальные соотношения температуры воздуха в помещении и радиационной температуры для различных видов физической активности

На рисунках 1.6 и 1.7 представлены графики зависимости значений показателей PMV и PPD от средней радиационной температуры при нормируемом значении температуры воздуха $20\text{ }^\circ\text{C}$ с разделением на три категории тепловых условий для человека [12].

Для расчета показателей PMV и PPD использовались следующие исходные данные:

- радиационная температура $t_r = 14...30\text{ }^\circ\text{C}$;
- скорость движения воздуха $v_g = 15\text{ м/с}$ [13];
- относительная влажность воздуха $\varphi = 30\%$ [13];
- коэффициент, учитывающий метаболизм человека – 1,2 мет (легкая работа);
- коэффициент, учитывающий изоляцию одежды – 0,7 кло (легкая домашняя одежда).

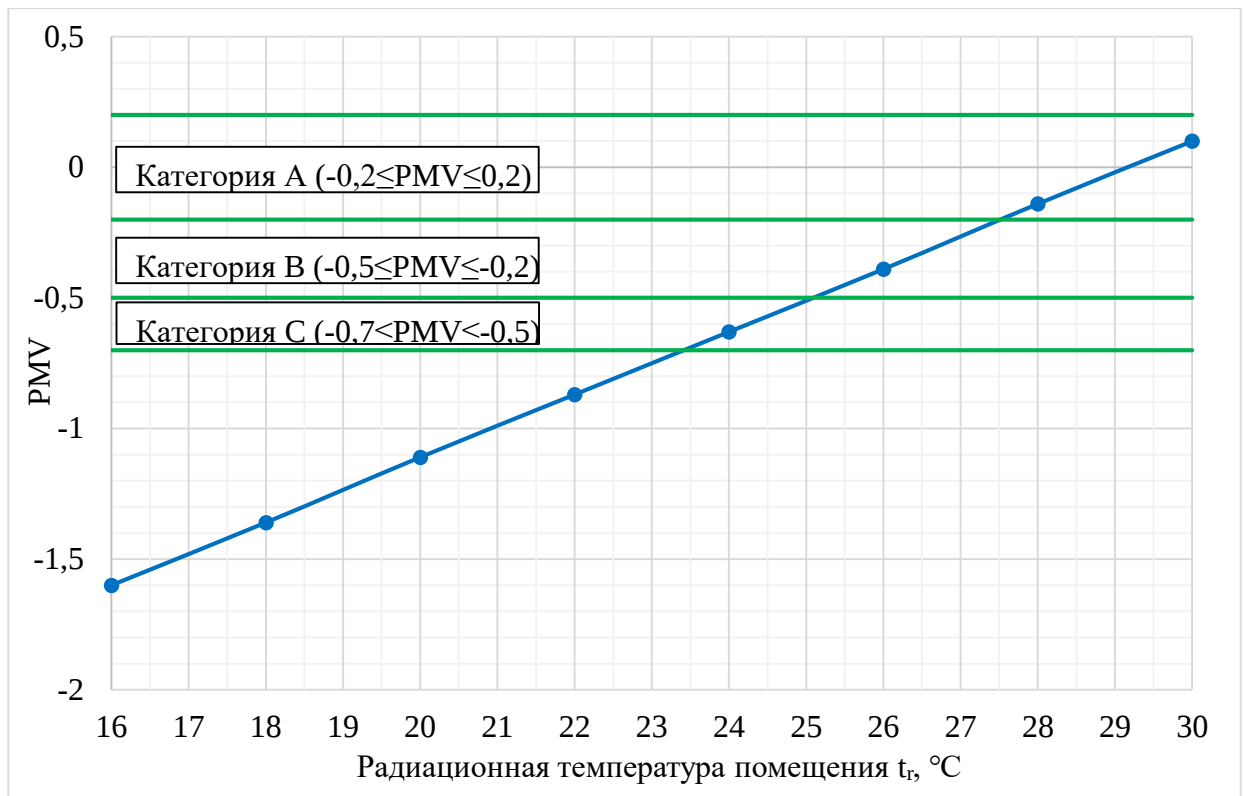


Рисунок 1.6 – Прогнозируемая средняя оценка качества воздушной среды

Анализ полученных графиков показал, что для обеспечения высоких показателей комфортности микроклимата необходимо поддерживать радиационную температуру помещения на уровне не менее 24 °C. Таким образом, с помощью изменения радиационной температуры помещения можно управлять состоянием тепловой среды. В жилых помещениях таких значений радиационной температуры можно добиться только использованием лучистых систем отопления. Наряду с теплыми полами к таким системам относятся и системы на основе капиллярных трубок.

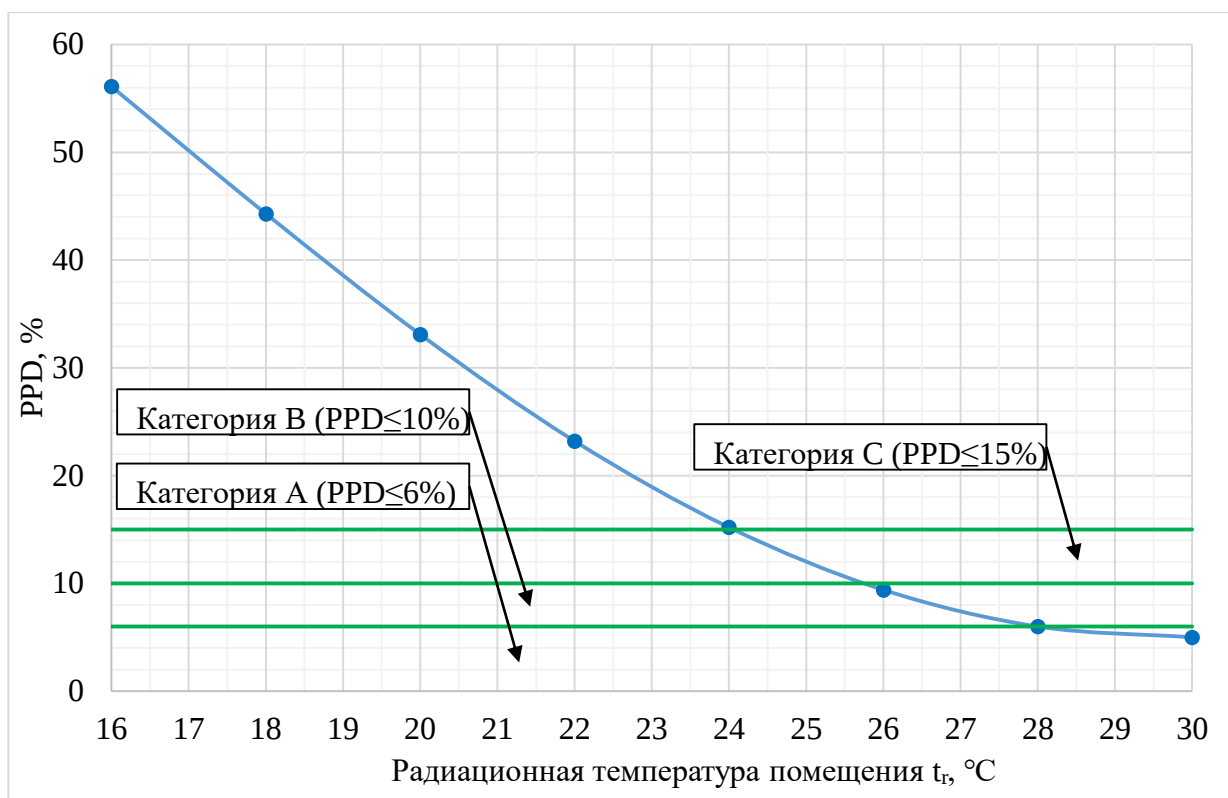


Рисунок 1.7 – Прогнозируемый процент недовольных температурой среды

1.3 Системы водяного отопления на основе капиллярных трубок

В последнее время существенно изменились требования, предъявляемые к системам, обеспечивающим комфортный микроклимат в помещении. Это касается в том числе энергоэффективности и удобства эксплуатации данных систем. Традиционные системы имеют достаточно много недостатков, а лучистые климатические системы на данный момент применяются недостаточно широко. Это обусловлено тем, что существующие виды их реализации недостаточно оптимизированы.

Технология водяного отопления на основе капиллярных трубок заключается в устройстве системы отопления, в которой теплоноситель (в данном случае вода) циркулирует через сеть капиллярных трубок небольшого диаметра, которые равномерно встроены в поверхность стен, полов или потолков помещений. Благодаря малым расстояниям между капиллярами и их небольшим диаметрам (0,003-0,006 м) данная технология позволяет

обеспечивать равномерный нагрев поверхности, в которую встроены капиллярные трубки, что в свою очередь способствует равномерному нагреву воздуха в отапливаемом помещении. Подобные системы позволяют обеспечивать более комфортный микроклимат в отапливаемых помещениях за счет равномерного нагрева воздуха, исключается пересушивание воздуха. Это особенно важно для зданий с массовым пребыванием людей, таких как школы, больницы, жилые дома.

Основное преимущество данной технологии заключается в возможности организации низкотемпературного отопления, поскольку температура теплоносителя в такой системе составляет порядка 35-50 °С. Следовательно, снижается потребление энергоресурсов.

Однако, на данный момент системы капиллярного водяного отопления значительно менее распространены, чем традиционные радиаторные системы и системы водяного теплого пола. Это обуславливается в первую очередь отсутствием типовых решений для проектирования и строительства зданий, включающих в себя капиллярное водяное отопление. Поэтому требуются дополнительные исследования, направленные на поиск оптимальных конструкций, материалов и технологий для производства составляющих для организации подобных систем.

Подобные системы являются гибкими и универсальными, что дает возможность применять их как в новых, так и в реконструируемых зданиях, давая возможность для создания энергоэффективных проектов в строительстве. Они могут применяться как в жилых зданиях, так и в офисных, торговых помещениях и т.д. Однако, такие системы не рекомендуется применять в помещениях с высокими потолками или при наличии больших открытых пространств. Использование систем отопления на основе капиллярных трубок дает ряд преимуществ, что делает эту технологию особенно актуальной в части поиска энергоэффективных и экономически выгодных решений в строительстве.

Помимо энергоэффективности, к преимуществам данной технологии можно отнести компактность, поскольку капилляры занимают мало места и встраиваются внутрь конструктивных элементов здания, не занимая места в самом помещении. Изготовление капилляров из полипропилена делает такие системы надежными и долговечными. Кроме того, важным достоинством таких систем является экологичность, поскольку в них не применяются газы или другие вредные вещества. Это делает их безопасными для человека и окружающей среды. Тихая работа таких систем также делает их оптимальным выбором для использования в жилых помещениях.

К недостаткам системы водяного капиллярного отопления можно отнести более высокую стоимость капиллярных трубок по сравнению с обычными трубами. Малый диаметр капилляров накладывает определенные ограничения на их максимальную длину. Также стоит отметить повышенный риск засорения капилляров. В случае необходимости замены капиллярной трубки могут возникнуть сложности в ремонте. Капилляры требуют регулярного обслуживания для недопущения отложений на внутренних стенках.

Очевидна необходимость инноваций в сфере строительства и отопительных систем. Стеновые блоки с капиллярными трубками могут быть одним из наиболее перспективных направлений для исследования. Они могут стать эффективным решением для современных и будущих проектов [58].

В настоящее время капиллярное водяное отопление реализуется на основе капиллярных матов. Они представляют собой подающую и обратную полипропиленовые трубы, к которым присоединены капиллярные трубки. В основном для коллекторов используются трубы диаметром 0,02 м. Диаметр капилляров варьируется в диапазоне 0,003-0,006 м. В зависимости от условий эксплуатации шаг между капиллярными трубками может быть 0,01; 0,02 или 0,03 м. Ширина мата от 0,15 м до 1 м, длина - от 1 до 6 м [59]. Такая конструкция мата позволяет обеспечить небольшое гидравлическое сопротивление для заданного расхода воды. Капиллярные трубки позволяют

избегать завоздушивания при любом виде раскладки матов. Мат можно расположить на стене таким образом, чтобы подающая и обратная трубы располагались на полу, а капилляры шли вверх.

Работа [60] посвящена исследованию процессов теплообмена в помещении при использовании в качестве отопительных приборов капиллярных матов. Как правило, капиллярные маты для рассматриваемых систем изготавливаются из полипропилена. Этот материал является безопасным для здоровья человека. Основным достоинством авторы отмечают возможность обеспечения благоприятного температурного режима в отапливаемом помещении. В данной отопительной системе используется низкопотенциальный источник тепла.

Статья [61] содержит исследования гидравлических свойств капиллярных матов, которые применяются в низкотемпературных системах отопления.

Авторами в работе [62] исследуется работа капиллярной системы водяного отопления потолочного размещения.

Проанализировав особенности реализации систем отопления на основе капиллярных матов, были выделены следующие преимущества данной технологии. Маты могут применяться как во вновь сооружаемых зданиях, так и при ремонте существующих путем размещения их на плитах перекрытий и на стенах с последующим заштукатуриванием. Капиллярные маты имеют небольшой вес, что упрощает их монтаж. Их гибкость позволяет устанавливать маты не только на абсолютно ровные поверхности, но и повторять геометрию помещения, а также обходить другие инженерные коммуникации.

Важным преимуществом установки капиллярных матов на потолок является возможность их использования не только для обогрева, но и для охлаждения помещений без дополнительных затрат. Согласно данным экспериментов [62], мощность охлаждения на 40 % состоит из конвекционной составляющей и на 60 % из лучистой. Поскольку при монтаже матов на

потолок конвекция практически отсутствует, то в работе системы остается задействована только лучистая составляющая. Таким образом, тепловая мощность такой системы составляет 60 % от мощности охлаждения при равной разнице температур теплоносителя и воздуха в помещении.

В работе [63] авторами изучается система лучистого отопления, реализованная на основе водяных инфракрасных излучателей.

В статье [59] представлен пример отопления капиллярной системой, расположенной на потолке. В результате исследования авторы пришли к выводу, что капиллярные маты можно укладывать под слоем плитки, а также использовать их для систем снеготаяния, не увеличивая нагрузку на кровлю.

В работе [64] произведен обзор применения капиллярных матов, выделены их достоинства и недостатки. Также проанализирована возможность их дальнейшего применения и развития. Общий вывод заключается в том, что системы отопления с использованием капиллярных матов являются перспективным решением для строительства современных зданий как жилого, так и общественного назначения.

В работе [65] представлен обзор капиллярного отопительного прибора с низким осевым градиентом и высокой скоростью нагрева.

В европейских странах системы отопления на основе капиллярных трубок приобретают все большую популярность при строительстве зданий. Это обусловлено в первую очередь их энергоэффективностью. Такие системы имеют широкое распространение, например, в странах северной Европы. Они применяются в различных областях. К примеру, в Германии порядка 40% потребления энергии приходится на промышленность и коммерцию [66]. Поэтому развитие этих отраслей напрямую связано с повышением энергоэффективности. Одним из наиболее ярких примеров использования системы водяного капиллярного отопления является основное производство и офис компании GeoClimaDesign AG, которая разработала концепцию зданий с «нулевым» потреблением энергии. На этом примере было продемонстрировано, что возможно одновременно соблюдать принципы

защиты памятников архитектуры и применения энергоэффективных систем при их реконструкции. Основной проблемой до реконструкции являлись высокие теплопотери через ограждающие конструкции. Вследствие того, что с увеличением разницы температур между внутренней и внешней стороной увеличиваются и теплопотери, использование радиаторной системы было признано неэффективным решением. Поэтому была поставлена задача организации низкотемпературной системы отопления. Выбор был сделан в пользу применения капиллярных матов, поскольку такие системы обладают наименьшей температурой теплоносителя среди всех применяемых систем отопления. Монтаж матов на потолке также является удобным с точки зрения сохранения конструкций реконструируемого здания.

Существуют примеры применения систем на основе капиллярных матов и при строительстве многоквартирных домов. Одним из таких является высотное здание «Iduna», расположенное в г. Оснабрюке [66]. В данном здании панельного типа капиллярные маты также были установлены на потолках. Они выполняют не только функцию обогрева помещений, но и их охлаждения в теплый период. Необходимо отметить, что при полезной площади здания в 7500 м² данная система отопления позволила снизить эксплуатационные затраты на 70% по сравнению с традиционными радиаторными системами.

Исследованию водяных потолочных панелей для лучистого отопления посвящены работы [67, 68, 69], в которых рассмотрены принципы ее функционирования, характеристики излучающих профилей, особенности монтажа, выявлены основные преимущества и недостатки. Также проанализировано воздействие данной системы на человека, длительное время находящегося в помещении. Авторы приходят к выводу, что использование водяных потолочных панелей для лучистого отопления позволяет снизить потребление энергетических ресурсов.

Как уже было отмечено ранее, капиллярные маты могут использоваться не только для отопления, но и для охлаждения помещений. Принцип работы системы «холодных потолков» представлен в статьях [70, 71, 72, 73]. Он

заключается в прокачивании через сеть капиллярных трубок воды с температурой около 16 °С, что приводит к охлаждению воздуха в зоне у потолка, который впоследствии опускается ниже, а на его место поднимается более теплый воздух.

За счет того, что работа данной системы основывается в первую очередь на лучистом теплообмене, то не создается излишней подвижности воздуха в помещении. Это особенно важно с точки зрения гигиеничности и стабильных значений влажности воздуха. За счет того, что капиллярные маты занимают всю поверхность потолка, то охлаждение воздуха происходит равномерно по всему объему помещения.

В качестве источника холода в системах холодных потолков могут использоваться как чиллеры, так и альтернативные источники холода, которыми могут быть тепловые насосы.

Существует риск образования конденсата на потолке при использовании данной системы. Для предотвращения этого применяются специальные датчики, контролирующие уровень влажности.

1.4 Методы расчета и проектирования систем водяного отопления на основе капиллярных трубок

Конструкция капиллярных матов позволяет обеспечить равномерный нагрев поверхности, на которой они смонтированы. В состав гидравлического узла для функционирования системы капиллярного водяного отопления входит теплообменник, распределительный коллектор, циркуляционный насос и запорная арматура. Гидравлический узел необходим для разделения системы на два независимых контура.

Детальное изучение системы водяного отопления с низкой температурой теплоносителя требует использования математической модели. Это позволяет получать данные о различных режимах работы системы с высокой точностью,

не проводя при этом сложных экспериментов, требующих длительной подготовки.

Проведение экспериментов с системами низкотемпературного капиллярного водяного отопления позволяет определить реальные параметры работы этих систем. Особое внимание при проведении подобных экспериментов уделяется возможности применения подобных систем для снижения тепловых потерь и улучшения показателей комфорта для человека. С помощью данных, полученных в результате экспериментов, уточняются теоретические модели и методики расчетов. Это позволяет разрабатывать проекты по оптимизации отопления с большей эффективностью. Кроме того, полученные в ходе экспериментальных исследований результаты могут использоваться при разработке и уточнении стандартов и норм, регулирующих применение подобных систем в строительстве.

Экспериментальные исследования дают возможность дальнейшего совершенствования систем капиллярного водяного отопления. В ходе исследований распределения тепла между различными поверхностями определяются оптимальные материалы и конфигурации капиллярных трубок, которые будут наиболее эффективны в конкретных условиях эксплуатации.

В статье [74] авторы выполнили численное моделирование процессов теплопередачи при использовании капиллярной системы отопления в полу. А в работе [75] изучены особенности распределения частиц в помещении при использовании такой системы отопления.

В работе [76] разработана методика проектирования систем лучистого отопления и охлаждения.

Основной конструктивной особенностью системы водяных потолочных панелей является использование отражателей и изоляторов, которые направляют энергию в заданные участки [67]. Такая конструкция является безопасной и имеет несколько вариантов подключения панелей между собой и к системе отопления. В качестве основания панелей используется специальный оцинкованный профиль с пазами для прокладки труб. Сверху

располагается теплоизоляция для снижения теплопотерь на конвекцию. В процессе монтажа на коллектор может быть установлен воздухоотводчик. Панели могут монтироваться как по одиночке, так и по несколько штук параллельно. Между собой допускается соединять от 2 до 4 панелей. В зависимости от выбранного способа подключения могут использоваться проходные или глухие коллекторы.

Проектирование лучистых систем отопления по большей части не сильно отличается от проектирования системы теплых полов, однако существуют определенные нюансы, рассмотренные в статье [59].

Мощность обогрева и охлаждения при использовании капиллярных матов напрямую зависит от их расположения и способа монтажа. Так, например, при расположении матов за металлическими панелями она составляет порядка 95 Вт/м^2 . Заштукатуривание капиллярного мата слоем порядка $0,01 \text{ м}$ снизит тепловую мощность до 78 Вт/м^2 . В случае, если капиллярный мат будет перекрыт листом гипсокартона тепловая мощность составит 66 Вт/м^2 [59].

Однако, в некоторых случаях монтаж капиллярных матов на потолке не дает достаточной тепловой мощности для обогрева помещения. В этом случае имеет смысл рассмотреть вариант размещения капиллярных матов на стенах. Также могут использоваться конвекционные шкафы с капиллярными матами.

В работе [77] авторы получили методику для расчета теплопередачи системы капиллярного водяного отопления при отоплении помещений прямоугольной формы. Поскольку такие системы на данный момент изучены недостаточно подробно, то при выполнении конструктивных и гидравлических расчетов используются формулы, полученные эмпирическим путем. Вследствие этого, точность вычислений не всегда является высокой. Авторы предлагают методику которая позволит рассчитывать значение удельного теплового потока от низкотемпературной капиллярной системы водяного отопления с высокой точностью. Авторы в ходе исследования подтвердили факт, что в процессе теплообмена большую часть составляет

лучистый теплообмен, а конвективная составляющая достаточно мала. Поэтому при разработке методики основное внимание было уделено изучению процессов лучистого теплообмена, происходящего при использовании капиллярной системы отопления. Для описания процессов лучистого теплообмена использовалась теория угловых коэффициентов. В результате была разработана методика расчета, которая позволила получить результаты, отличающиеся от экспериментальных данных не более, чем на 6%.

Для вычисления величины теплового потока системы капиллярного водяного отопления необходимо знать как лучистую составляющую теплообмена, возникающую вследствие инфракрасного излучения, так и его конвективную часть, которая обусловлена конвекцией у поверхности капиллярных матов. В работах [78, 79] расчет лучистой составляющей выполняется при помощи методики с угловыми коэффициентами. Коэффициент F_{1-2} показывает какая доля излучения с поверхности A_1 попадает на поверхность A_2 . Данный коэффициент представляет из себя геометрическую функцию, являющуюся двойным интегралом (1.4)

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot R^2} dA_1 dA_2. \quad (1.4)$$

Для того, чтобы вычислить значение удельного теплового потока лучистой составляющей теплообмена, необходимо рассчитать угловые коэффициенты между поверхностью помещения, на которой смонтирована капиллярная система, и всеми ограждающими конструкциями помещения. В случае, если помещение имеет прямоугольную форму, то расчет значительно упрощается. Поскольку капиллярные трубки расположены достаточно близко друг к другу и равномерно распределяются по поверхности помещения, то для расчета можно ввести следующее упрощение. Поверхность капиллярных матов условно делится на верхнюю и нижнюю части. Излучение с верхней части капилляров приходится только на поверхность потолка. Лучистая составляющая теплового излучения с нижней части приходится на пол и все стены помещения. Данные поверхности при использовании рассматриваемой

методики представляются как поверхности тонких пластин. Далее производится расчет угловых коэффициентов по приведенной выше формуле. После их вычисления необходимо вычислить коэффициент лучистого теплообмена между двумя плоскостями [80]:

$$F_{\varepsilon_{s-i}} = \frac{1}{\left[\frac{(1 - \varepsilon_s)}{\varepsilon_s} \right] + \left(\frac{1}{F_{i-s}} \right) + \left(\frac{S_s}{S_i} \right) \cdot \left[\frac{(1 - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \right]}, \quad (1.5)$$

где ε_s – коэффициент излучения поверхности, на которой располагаются капиллярные трубки;

ε_i – коэффициент излучения поверхности, теплообмен с которой необходимо рассчитать;

S_s – площадь поверхности, на которой располагаются капиллярные трубки, м^2 ;

S_i – площадь поверхности, теплообмен с которой необходимо рассчитать, м^2 ;

F_{i-s} – угловой коэффициент лучистой составляющей теплообмена между поверхностью, на которой располагаются капиллярные трубки и поверхностью, теплообмен с которой необходимо рассчитать.

Следующим шагом рассчитывается величина удельного теплового потока с поверхности с капиллярными матами, обусловленная лучистой составляющей теплообмена [80, 81, 82]:

$$q_{\text{л}} = \sigma \cdot \sum_{i=1}^n \left[F_{\varepsilon_{s-i}} \cdot \left[(t_s + 273,15)^4 - (t_i + 273,15)^4 \right] \right], \quad (1.6)$$

где t_s – средняя температура поверхности, на которой располагаются капиллярные трубки, $^{\circ}\text{C}$;

t_i – средняя температура поверхности, теплообмен с которой необходимо рассчитать, $^{\circ}\text{C}$.

В случае размещения капиллярных матов на поверхности потолка возникают некоторые сложности при расчетах. Поскольку в первую очередь нагревается воздух, расположенный в непосредственной близости от

поверхности потолка, то практически отсутствует естественная конвекция. Ее составляющая значительно меньше, чем величина лучистой составляющей. Такие процессы теплообмена требуют дополнительных исследований [83]. В работе [84] был проведен ряд экспериментов с нагревом поверхностей помещения. После анализа и обработки результатов была получена зависимость для коэффициента теплоотдачи от нагреваемой поверхности потолка:

$$a_{ск} = \frac{0,704}{d_г^{0,601}} \cdot (\Delta T)^{0,133}, \quad (1.7)$$

где $d_г$ – гидравлический диаметр нагреваемой поверхности, м,

ΔT – разность температур между нагреваемой поверхностью и средней температурой воздуха в помещении, °С.

Для оценки реальной эффективности системы необходим расчет удельной тепловой мощности. Это дает возможность более точно моделировать теплообменные процессы в помещении, что крайне важно для повышения эффективности отопительной системы.

Зная значения температур каждой поверхности помещения и их коэффициенты излучения можно рассчитать величину лучистого теплообмена между системой капилляров и поверхностями помещения. Для вычисления величины лучистого теплообмена между двумя поверхностями применяется следующая формула:

$$q_{рад} = \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{A_1 + A_2} \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (1.8)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана;

ε_1 и ε_2 – коэффициенты излучения поверхностей;

A_1 и A_2 – площади поверхностей, м²;

T_1 и T_2 – температуры поверхностей, К.

Основной целью эксперимента является подтверждение результатов теоретических расчетов, а также изучение зависимости изменения параметров работы системы от условий эксплуатации. Это способствует дальнейшей

оптимизации конструкции системы капиллярного водяного отопления и определению оптимальных режимов ее работы. Основной задачей является более широкое применение подобного рода систем в строительстве с целью повышения энергоэффективности.

Рассмотрим специфику расчета и подбора капиллярных трубок в системах «холодный потолок». От верно выполненных расчетов в данном случае зависит надежность и эффективность работы системы. Первым этапом важно определить условия эксплуатации системы. Необходимо учитывать тип теплоносителя, который будет использоваться в системе, его давление на входе и на выходе из системы, показатели температуры. Все это требуется для определения физических и термодинамических свойств теплоносителя для дальнейших расчетов.

Основной задачей расчетов является определение оптимальной длины и диаметра капиллярных трубок, которые позволят добиться максимальной эффективности системы в конкретных условиях эксплуатации. Первым этапом расчетов определяется диаметр капиллярных трубок исходя из параметров теплоносителя и условий эксплуатации системы. Для более точных расчетов учитываются также потери давления на трение в капиллярных трубках и потери на ускорение теплоносителя, вызванные его вскипанием и движением по капиллярам.

От диаметра трубок зависит скорость потока теплоносителя. С уменьшением диаметра снижается и скорость движения теплоносителя, а значит требуется больше времени для передачи тепла. Слишком маленький диаметр трубки может привести к образованию засоров и снижению эффективности системы отопления.

От длины капиллярных трубок напрямую зависит количество тепла, которое может быть передано от источника тепла. Чем больше длина капиллярной трубки, тем больше тепла может быть передано, однако слишком длинные капилляры могут привести к большим потерям давления, что снизит эффективность отопительной системы.

После определения диаметров трубок рассчитываются потери давления на каждом отдельном участке капилляра. В связи с тем, что свойства теплоносителя и давление могут отличаться на разных участках одной капиллярной трубки, то для расчета ее разбивают на мелкие участки.

Эти расчеты производят до того момента, пока не будет определен критический режим работы отопительной системы. При дальнейшем снижении разницы давлений на входе и выходе из системы движение теплоносителя становится неэффективным или вовсе останавливается.

Основываясь на полученных значениях диаметров и длин капиллярных трубок, а также зная потери давления на каждом отдельном участке капилляров, можно определить оптимальный режим работы всей системы отопления. Это дает возможность не только обеспечить необходимую производительность системы, но и повысить ее энергоэффективность и надежность.

Немаловажным фактором, который необходимо учитывать при проектировании подобных систем, является изменение режима работы в связи с изменением эксплуатационных условий. Это могут быть колебания температуры окружающего воздуха или изменение нагрузки на систему.

Необходимо выбрать материал для изготовления капиллярных трубок. От этого напрямую зависит эффективность работы системы, поскольку одни материалы обладают лучшей теплопроводностью, чем другие. Помимо этого, при выборе материалов следует обращать внимание на их устойчивость к коррозии и образованию отложений на внутренних стенках трубок. С экономической точки зрения важными являются долговечность и стоимость материалов.

Для оценки эффективности отопительной системы применяется коэффициент, показывающий отношение количества тепла, переданного системой, к количеству затраченной энергии. Данный показатель зависит от перечисленных выше факторов, включающих параметры капиллярных трубок,

материал изготовления и т.д. Задачей проектирования является повышение этого коэффициента.

В случае расположения капиллярных трубок в стенах, могут быть использованы формулы (1.9-1.14), полученные из зависимостей, описанных в [85]:

$$t_m - t_e = (t_n - t_e) \cdot (0,055S + 7R + 0,8); \quad (1.9)$$

$$q = 8,07 \cdot (t_n - t_e); \quad (1.10)$$

$$R = \sum (\delta / \lambda); \quad (1.11)$$

$$t_n - t_e = \frac{t_m - t_e}{0,055S + 0,94}; \quad (1.12)$$

$$S = 18,2 \cdot \frac{t_m - t_e}{t_n - t_e} - 17; \quad (1.13)$$

$$(t_n - t_e) = 0,214q, \quad (1.14)$$

где t_m — средняя температура теплоносителя, °C;

t_e — температура воздуха отапливаемого помещения, °C;

t_n — температура поверхности греющей стены, °C;

δ — толщина слоя материала, расположенного над системой капиллярных трубок, м;

λ — теплопроводность слоя, Вт/(м·°C);

S — интервал между соседними капиллярными трубками, м;

q — удельная тепловая мощность капиллярной системы отопления, Вт/м².

В работе [86] авторы проводят расчет мощности капиллярных теплообменников для оптимального нагрева и охлаждения помещения.

1.5 Выводы

В результате анализа литературных источников, касающихся используемых в настоящее время систем водяного отопления, а также степени развития капиллярного отопления можно сделать следующие выводы:

1. Радиаторное отопление, несмотря на свое широкое распространение, имеет ряд существенных недостатков. В их числе высокие тепловые потери через перегретую стену, сильные конвективные потоки, высокая неравномерность распределения температур по высоте по сравнению с альтернативными отопительными системами.

2. Проведенный анализ тепловых условий с помощью показателей PMV (Predicted Mean Vote) и PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) показывает, что достижение комфортных параметров микроклимата возможно только с изменением радиационной температуры помещения, которое могут обеспечить лучистые системы отопления, к которым относятся, например, системы водяного и электрического теплого пола, а также капиллярные системы.

3. Основным видом водяного капиллярного отопления на данный момент являются капиллярные маты, которые монтируются на поверхность полов, потолков и стен. Кроме отопления помещений они могут использоваться и для охлаждения воздуха в теплый период.

4. На данный момент отсутствуют теоретические и практические методики, а также типовые инженерные решения для систем капиллярного водяного отопления, которые могли бы широко применяться на этапе проектирования и строительства жилых и общественных зданий.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНОВОГО БЛОКА С СИСТЕМОЙ КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБОК

2.1 Разработка конструкции стенового блока с системой капиллярных трубок

Поскольку для работы лучистых низкотемпературных систем отопления требуются отопительные приборы с большой теплопередающей поверхностью, то принято решение разместить систему капиллярных трубок в блоке, который может монтироваться на уже существующие стены и перегородки отапливаемого помещения и покрывать всю площадь стены.

Предлагаемая конструкция стенового блока с системой капиллярных трубок должна обеспечить выполнение следующих требований:

- равномерное заполнение всей системы теплоносителем;
- равномерный прогрев поверхности стенового блока;
- минимизация расхода тепла в сторону соседних помещений от отапливаемого помещения;
- равномерный прогрев воздуха в отапливаемом помещении;
- потери давления в разрабатываемой системе не должны превышать потерь давления в системе радиаторного водяного отопления и системе водяного теплого пола.

Учитывая вышеперечисленные требования, а также основываясь на уже существующих конструкциях капиллярных матов, предложена следующая конструкция стенового блока, разрез которого представлен на рисунке 2.1. Стеновой блок разработан для отопления помещения площадью 15 м^2 с высотой потолка 2,7 м. Вид стенового блока, совмещенного с внутренней стеной отапливаемого помещения, в разрезе сбоку представлен на рисунке 2.2.

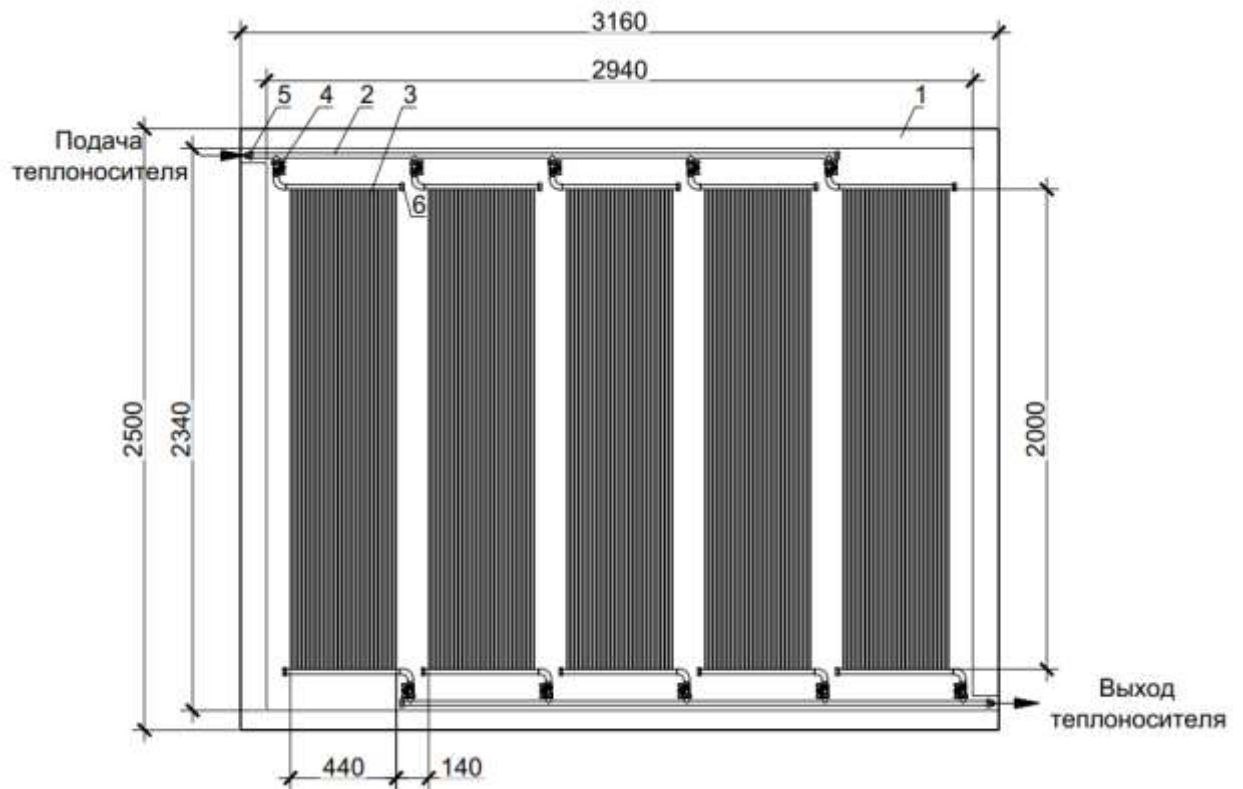


Рисунок 2.1 – Разрез предлагаемой конструкции стенового блока с системой капиллярных трубок



Рисунок 2.2 – Разрез стенового блока, совмещенного с внутренней стеной помещения

Основу стенового блока составляют листы гипсокартона (1), между которыми находится система капиллярных трубок. В качестве коллекторов (2) предполагается использовать полипропиленовые трубы диаметром 0,02 м. Диаметр капиллярных трубок в размере 0,0045 м выбран исходя из анализа существующих систем капиллярного отопления, реализуемых с использованием капиллярных матов. Выбрано среднее значение. Капиллярные трубки также изготавливаются из полипропилена.

Выбор данного материала обусловлен сразу несколькими факторами. Основным преимуществом полипропилена, важным для создания системы капиллярных трубок, является то, что на внутренних стенках не будут образовываться отложения, которые могут привести к засорению. Это является ключевым фактором, учитывая малый диаметр капиллярных трубок. Кроме того, система капиллярных трубок из полипропилена будет обладать небольшим весом, что должно упростить выполнение монтажа. Полипропилен также является одним из наиболее дешевых и доступных материалов.

Для того, чтобы снизить потери давления в системе капиллярных трубок, принято решение разделить их на секции (3), в каждую из которых входит по 30 капиллярных трубок. Кроме того, такое решение позволяет набирать требуемое количество секций для равномерного заполнения всей площади стены. Также в случае повреждения или засорения какой-либо зоны в системе капиллярных трубок будет возможность заменить поврежденный участок, не прибегая к демонтажу всей системы. Для возможности перекрытия подачи теплоносителя, а также замены секций капиллярных трубок предусматривается установка вентилей (4).

Со стороны смежных помещений между системой капиллярных трубок и гипсокартоном должен укладываться слой утеплителя. Это необходимо для того, чтобы тепло от стенового блока передавалось только в сторону отапливаемого помещения. Тем самым снижается тепловая нагрузка на блок. Кроме того, в смежных помещениях, даже если они относятся к тому же

объекту, что и отапливаемое, могут быть иные требования к температурному режиму, поэтому данный фактор также должен учитываться.

Для подключения блока к подающему и обратному трубопроводу системы отопления предусматриваются переходные муфты (5). Расположение входа и выхода теплоносителя выбрано диагональным. Данное решение должно обеспечить равномерное заполнение всей системы капиллярных трубок теплоносителем.

Для герметизации системы предусматриваются заглушки (6).

2.2 Численная модель стенового блока с системой капиллярных трубок

Для получения адекватной картины термодинамических и гидродинамических процессов в разработанном стеновом блоке требуется создание его численной модели. Для достижения поставленной цели было решено использовать систему дифференциальных уравнений с граничными и начальными условиями [87, 88, 89, 90]. Оптимальным выбором будет использование программного обеспечения, которое позволит с достаточной точностью произвести расчеты. В качестве такого инструмента выбран математический аппарат, предлагаемый программным обеспечением SolidWorks [91, 92, 93].

Встроенный функционал FlowSimulation позволяет решать как внешние, так и внутренние задачи. Также есть возможность учета граничных условий, условий на стенках, шероховатости поверхностей, Кроме того, для задачи, поставленной в данном исследовании, важной является возможность учета теплообмена между твердой и текучей средой [91, 92, 93].

Для описания процессов сохранения массы, энергии и импульса среды в рассматриваемом программном обеспечении используются уравнения Навье-Стокса. Поскольку решаемая задача сопряжена с возникновением турбулентных течений, то для их моделирования уравнения осредняются по Рейнольдсу. При этом турбулентное течение рассматривается как сумма

средней части и пульсационной составляющей. При осреднении уравнений возникают новые нелинейные члены-напряжения, определение которых требует дополнительных подходов. В рассматриваемом случае для этого используется полуэмпирическая k - ε модель турбулентности [91, 92, 93, 94].

Система уравнений имеет следующий вид [91, 92, 93, 94]:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{d}{dx_k}(\rho \cdot u_k) = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{d(\rho \cdot u_i)}{dt} + \frac{d}{dx_k}(\rho \cdot u_k \cdot u_i - \tau_{ik}) + \frac{\dots}{dx_i} = S_i, \quad (2.2)$$

$$\frac{d(\rho \cdot E)}{dt} + \frac{d}{dx_k}((\rho \cdot E + P)u_k + q_k - \tau_{ik} \cdot u_i) = S_k \cdot u_k + Q_H, \quad (2.3)$$

где t – время, с;

u – скорость текучей среды, м/с;

ρ – плотность текучей среды, кг/м³;

P – давление текучей среды, Па;

S_i – внешние массовые силы, действующие на единицу массы текучей среды, рассчитываемые по формуле (2.4), кг/м·с²;

E – полная энергия единичной массы текучей среды, Дж;

Q_H – количество тепла, выделяемого тепловым источником в единичном объеме среды, Вт·с;

τ_i – тензор вязких сдвиговых напряжений, определяемый для Ньютоновских текучих сред по формуле (2.5), Па;

q_i – диффузионный тепловой поток, Вт/м².

$$S_i = S_{iporous} + S_{igravity} + S_{irotation}, \quad (2.4)$$

где $S_{iporous}$ – массовая сила сопротивления пористого тела, кг/м·с²;

$S_{igravity}$ – массовая сила гравитации, кг/м·с²;

$S_{irotation}$ – массовая сила вращения системы координат, кг/м·с².

Индексы i говорят о необходимости суммирования показателей по трем координатным направлениям.

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} + \frac{2du_j}{3dx_i} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho \cdot k \cdot \delta_{ij}, \quad (2.5)$$

где $\mu = \mu_i + \mu_i \cdot \mu_j$ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

δ_{ij} – дельта-функция Кронекера;

k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с².

Значение μ определяется с помощью следующего выражения [91, 92, 93]:

$$\mu = f_\mu \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\varepsilon}, \quad (2.6)$$

где C_μ – расстояние от поверхности стенки, м.

Кинетическая энергия турбулентности определяется по следующим выражениям [91, 92, 93, 94]:

$$\frac{d(\rho \cdot k)}{dt} + \frac{d}{dx_k} (\rho \cdot u_k \cdot k) = \frac{d}{dx_k} \left(\left(\mu_i + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dx_k} \right) + S_k, \quad (2.7)$$

$$\frac{d(\rho \cdot \varepsilon)}{dt} + \frac{d}{dx_k} (\rho \cdot u_k \cdot \varepsilon) = \frac{d}{dx_k} \left(\left(\mu_i + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{d\varepsilon}{dx_k} \right) + S_i, \quad (2.8)$$

где

$$S_k = \tau_{ij}^R \cdot \frac{du_i}{dx_j} - \rho \cdot \varepsilon + \mu_i P_H, \quad (2.9)$$

$$S_i = C \cdot \varepsilon_i \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left(f_i \cdot \tau_{ij}^R \frac{du_i}{dx_j} + \mu_i C_B P_B \right) - C_{iz} f_z \frac{\rho \cdot \varepsilon^2}{k}, \quad (2.10)$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_i \left(\frac{du_j}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} - \frac{2du_i}{3dx_j} \cdot \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho \cdot k \cdot \delta_{ij}, \quad (2.11)$$

$$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx_i}, \quad (2.12)$$

где g_i – составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении x_i , м/с²;

P_B – дополнительный генерационный член, который учитывает влияние сил плавучести на турбулентность;

$$\sigma_B = 0,9;$$

$$C_B = 1 \text{ при } P_B > 0 \text{ и } C_B = 0 \text{ при } P_B < 0.$$

Программный комплекс SolidWorks Flow Simulation позволяет учитывать также и радиационный теплообмен [54, 95], что важно с учетом того, что именно эта составляющая является основной при отоплении с помощью капиллярных систем.

2.2.1 Трехмерная модель стенового блока с системой капиллярных трубок для исследования

На основе предложенной конструкции стенового блока с системой капиллярных трубок в программной среде SolidWorks была разработана трехмерная модель блока. На рисунке 2.3 представлен вид данной модели в разрезе.

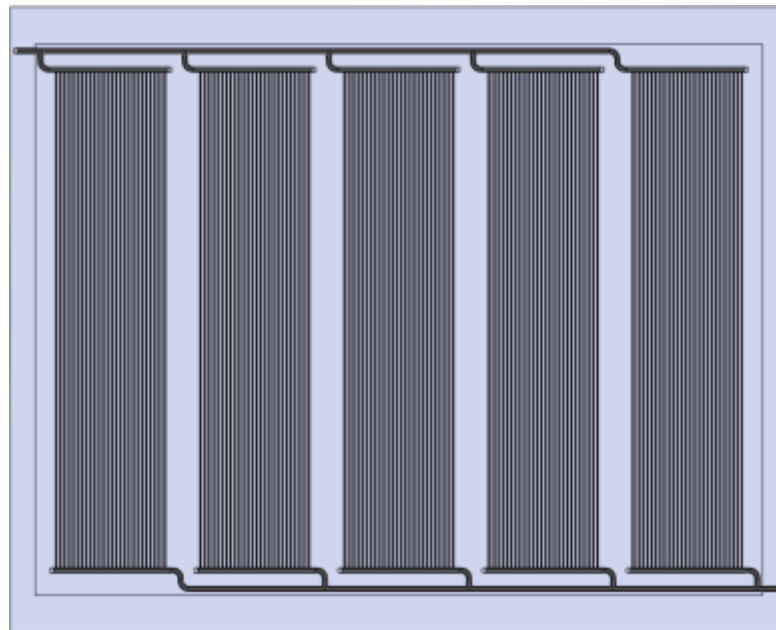


Рисунок 2.3 – Разрез модели стенового блока с системой капиллярных трубок

Далее были выполнены настройки расчета для решения задачи. В качестве материала стенового блока указан гипсокартон. Материал системы капиллярных трубок – полипропилен. В качестве теплоносителя используется вода.

Параметры решаемой задачи:

- высота стенового блока – 2,7 м;
- ширина стенового блока – 3 м;
- длина капиллярных трубок – 2 м;
- диаметр капиллярных трубок – 0,0045 м;
- количество капиллярных трубок в секции – 30 шт;
- количество секций – 5 шт;
- диаметр коллекторов – 0,02 м.

Граничные условия для выполнения расчета:

- температура теплоносителя на входе – 40 °С;
- давление на входе – 303 975 Па;
- массовый расход теплоносителя на выходе – 0,0083 кг/с;
- температура окружающего воздуха – 15 °С [96, 97, 98].

Тепло от стенового блока должно рассеиваться в атмосферу, поэтому был выбран внешний тип задачи.

Важным этапом при подготовке расчета является выбор расчетной сетки, которая позволит получить максимально точное представление о происходящих процессах. Для данной задачи была выбрана расчетная сетка с размером ячеек 0,03 м. На рисунке 2.4 представлена визуализация стенового блока и расчетная сетка.

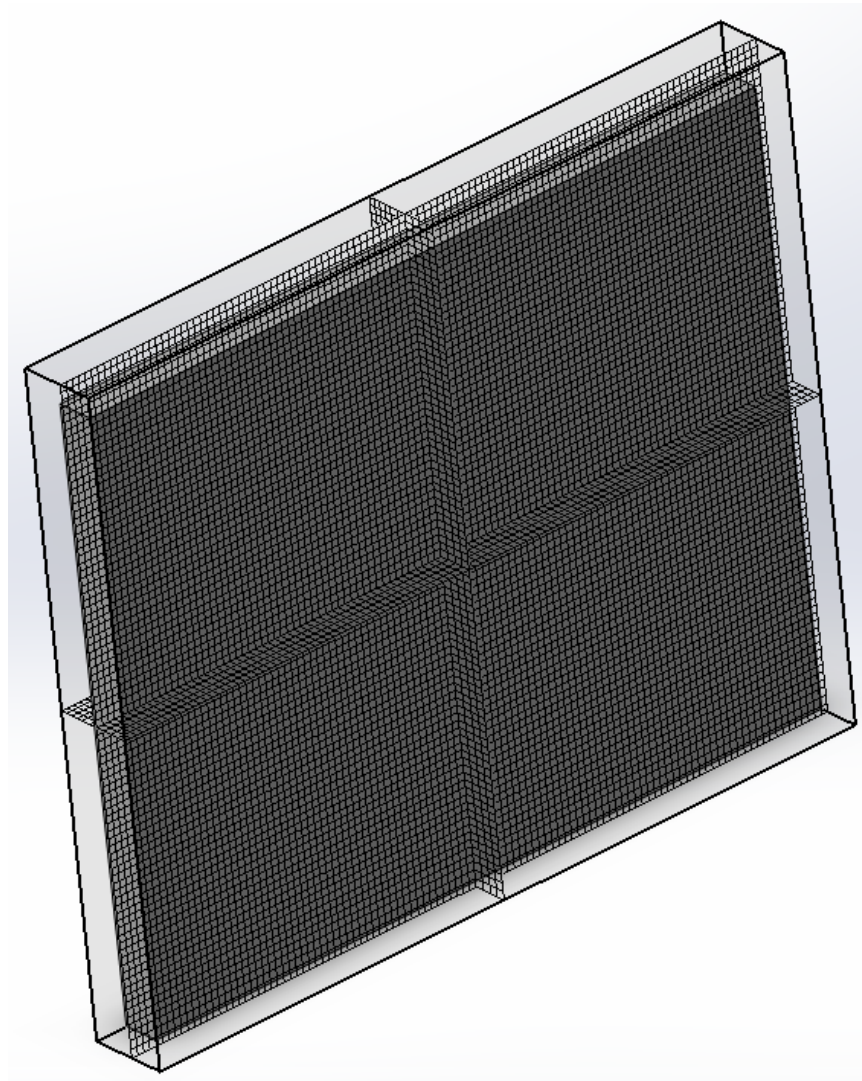


Рисунок 2.4 – Визуализация стенового блока с расчетной сеткой

В качестве целей расчета указаны следующие:

- средняя температура текучей среды;
- средняя температура твердого тела.

В качестве критерия для завершения расчета установлена сходимость всех целей.

2.2.2 Анализ результатов теплового расчета стенового блока с системой капиллярных трубок

В результате проведенного расчета были получены следующие данные:

- картины температур в системе капиллярных трубок;

- картины температур на поверхности стенового блока;
- картины температур в разрезе стенового блока, совмещенного с внутренней стеной отапливаемого помещения;
- картины скоростей в системе капиллярных трубок;
- график изменения температуры теплоносителя при прохождении через систему капиллярных трубок;
- график изменения давления в системе;
- графики температур на поверхности стенового блока по вертикальной и горизонтальной осям.

Далее рассмотрим полученные результаты.

На рисунках 2.5 и 2.6 показаны изменения полей температур в системе капиллярных трубок и на поверхности стенового блока соответственно на разных этапах расчета. Анализируя полученные картины, можно заметить, что заполнение системы капиллярных трубок теплоносителем происходит равномерно. Этому способствует диагональное расположение входа и выхода теплоносителя. По мере заполнения системы происходит нагрев поверхности блока. По завершении расчета можно отметить, что поверхность стенового блока прогревается равномерно. Разница в температуре наиболее и наименее нагретых зон находится в пределах 2 °С. При этом средняя температура поверхности блока составляет 29 °С [97].

Таким образом, выбранная конструкция системы капиллярных трубок позволяет добиться равномерного прогрева стенового блока, что является необходимым условием для равномерного распределения температур в отапливаемом помещении.

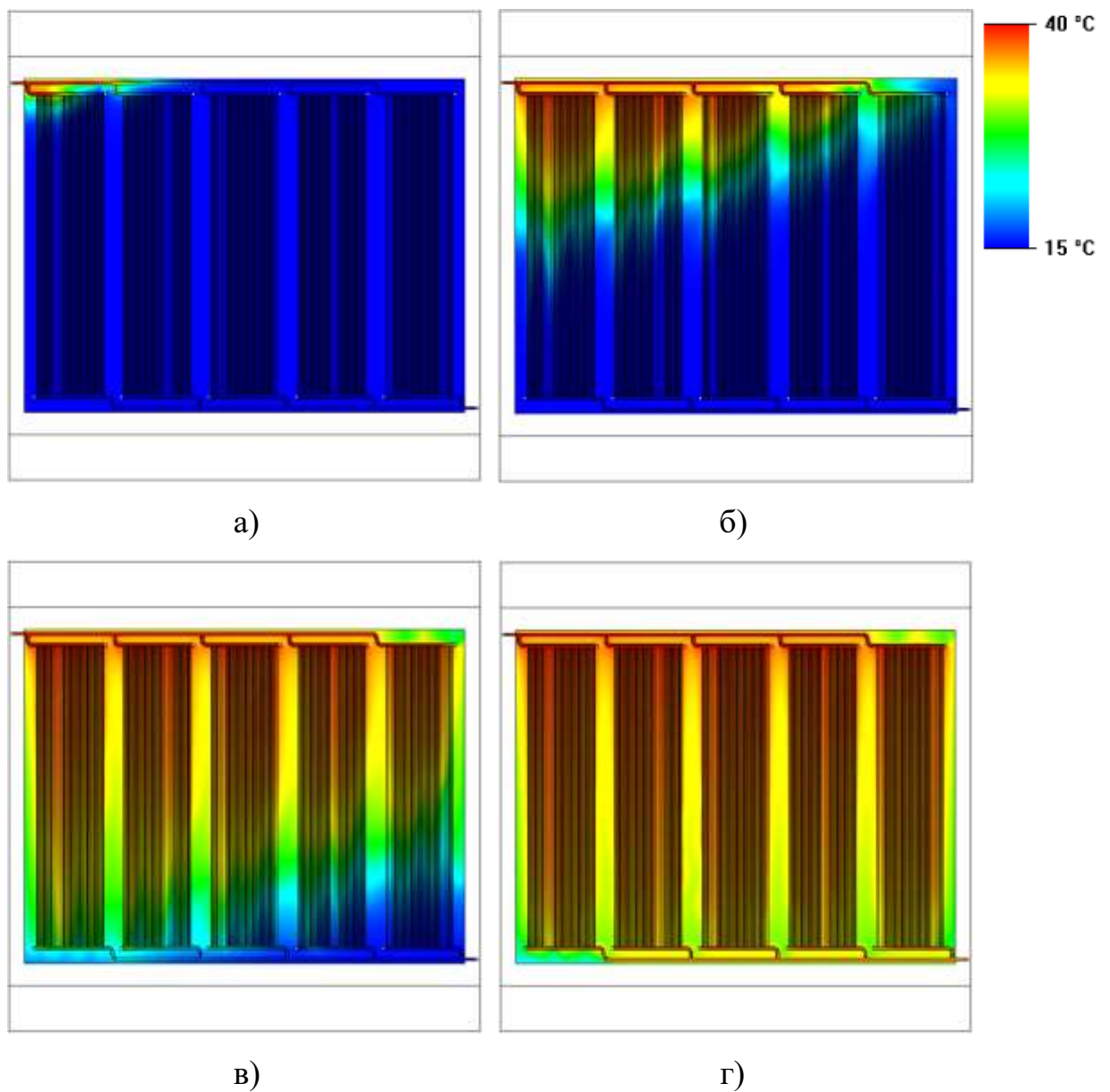


Рисунок 2.5 – Распределение температур в системе капиллярных трубок по мере заполнения теплоносителем

(время: а – 60 секунд; б – 180 секунд; в – 420 секунд; г– 600 секунд)

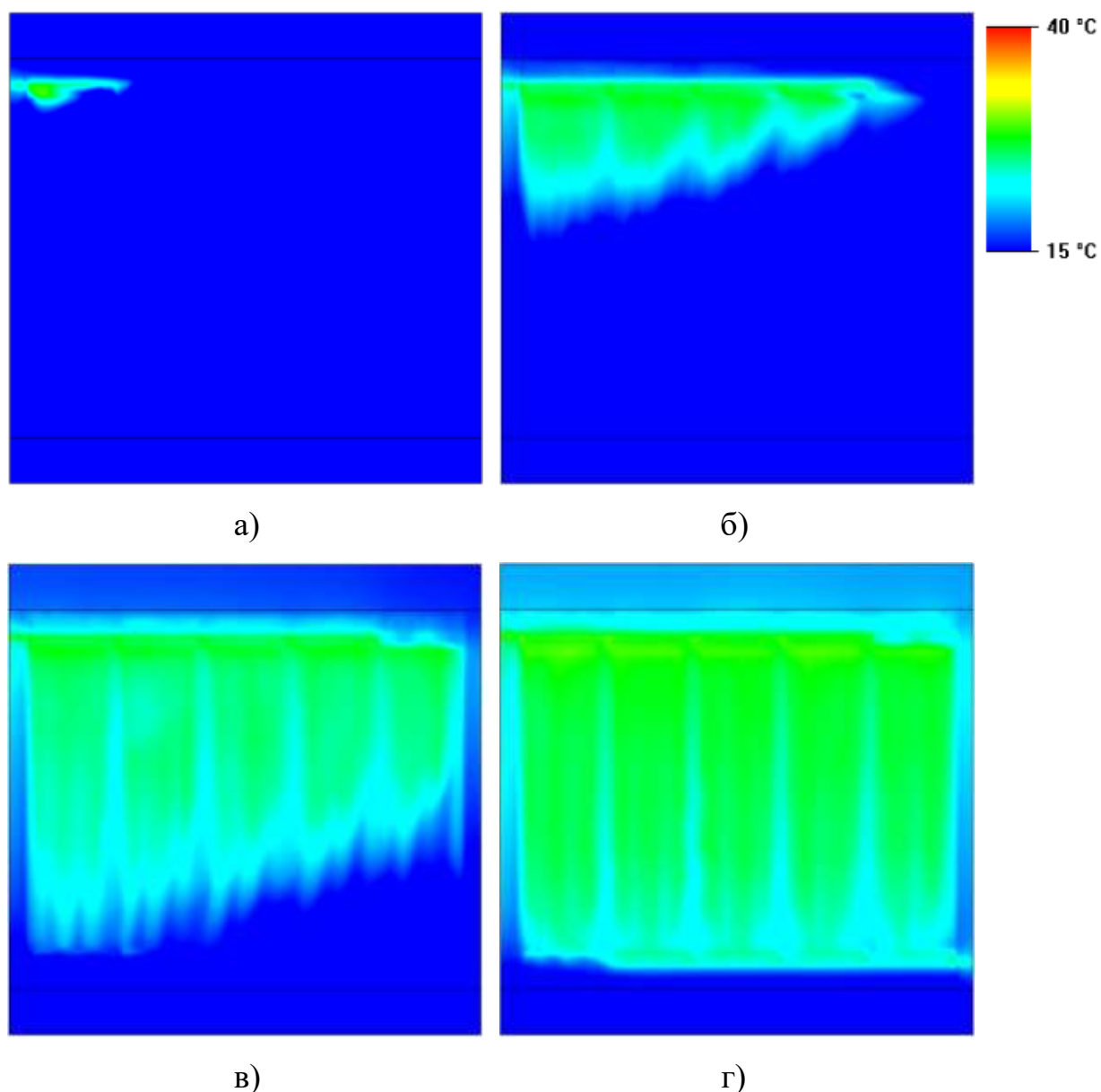


Рисунок 2.6 – Распределение температур на поверхности блока по мере заполнения системы теплоносителем

(время: а – 60 секунд; б – 180 секунд; в – 420 секунд; г– 600 секунд)

На рисунке 2.7 представлено распределение температур в разрезе стенового блока, совмещенного с внутренней стеной помещения. Его анализ говорит о том, что за счет использования утеплителя в стеновом блоке обратная сторона внутренней стены помещения сохранила начальную температуру. Следовательно, все тепло от стенового блока направлено в сторону отапливаемого помещения.

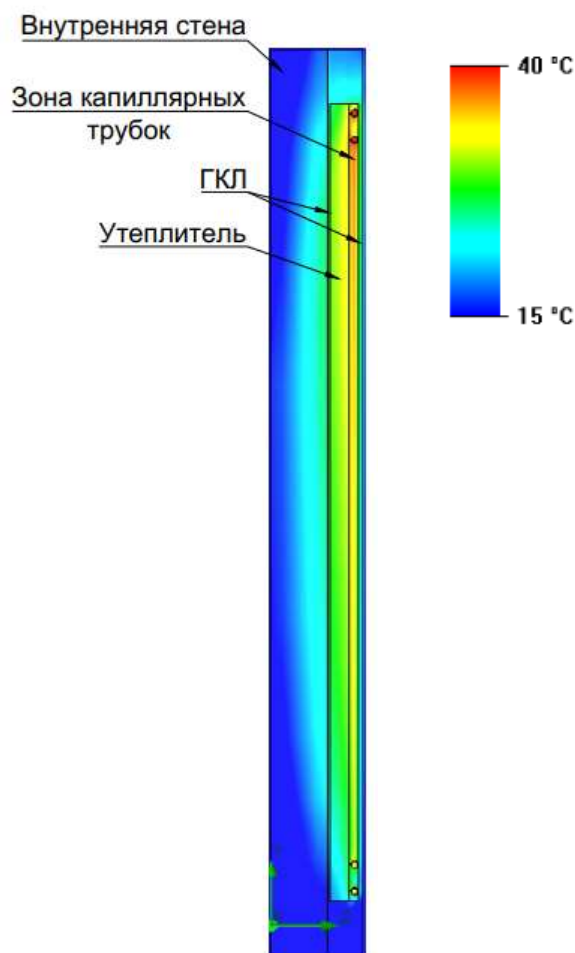


Рисунок 2.7 – Распределение температур в разрезе стенового блока, совмещенного с внутренней стеной помещения

На рисунках 2.8 и 2.9 показаны картины распределения скоростей в системе капиллярных трубок в осях X и Y соответственно на разных этапах выполнения расчета. Анализ полученных данных говорит о том, что во всех секциях капиллярных трубок наблюдается одинаковая скорость движения теплоносителя, что способствует равномерному заполнению системы и, как следствие, равномерному прогреву поверхности блока. При полном заполнении системы теплоносителем скорости по оси X наблюдаются только в коллекторах. При этом по оси Y они выравниваются во всех секциях капиллярных трубок и находятся на уровне 0,3 м/с.

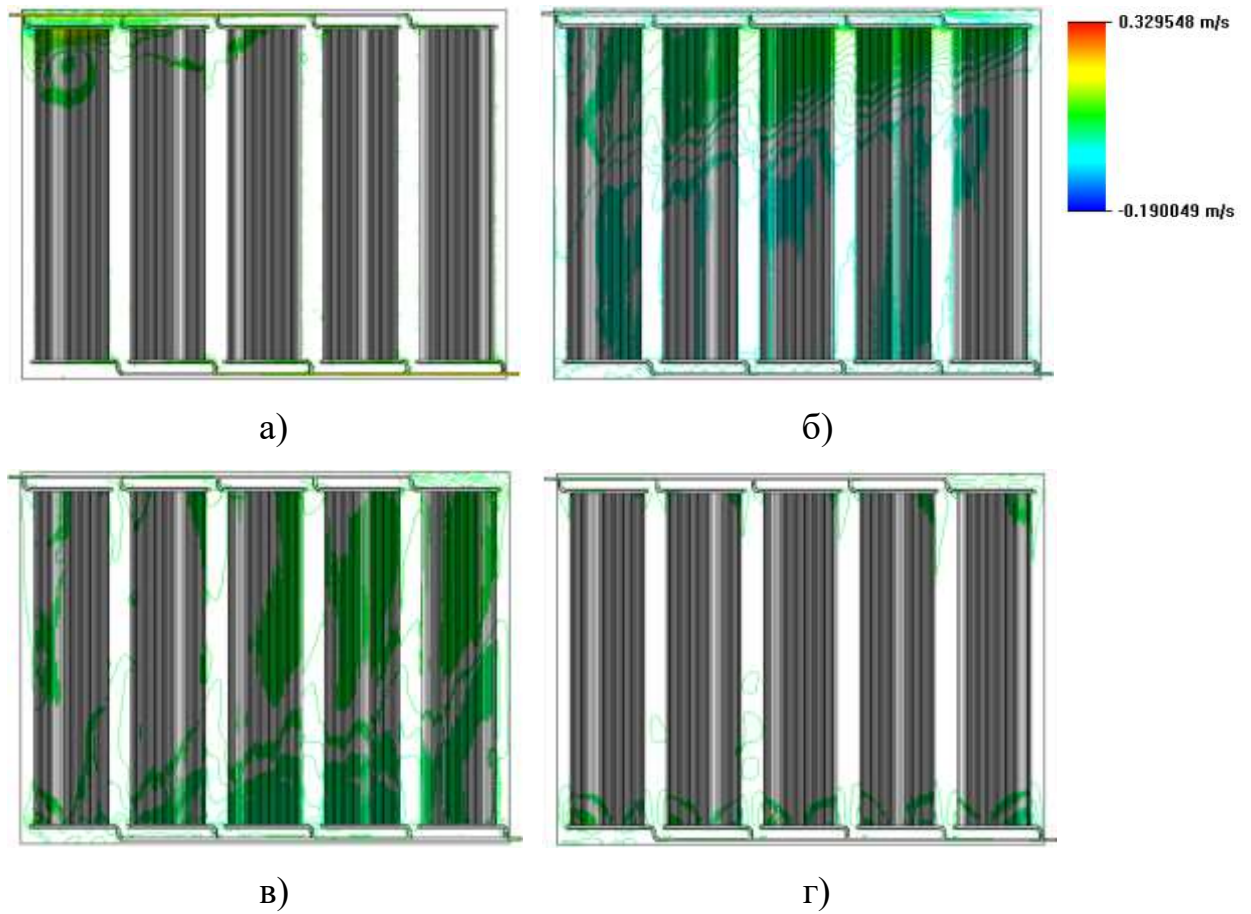


Рисунок 2.8 – Картины распределения скоростей в системе капиллярных трубок по оси X по мере заполнения системы теплоносителем (время: а – 60 секунд; б – 180 секунд; в – 420 секунд; г– 600 секунд)

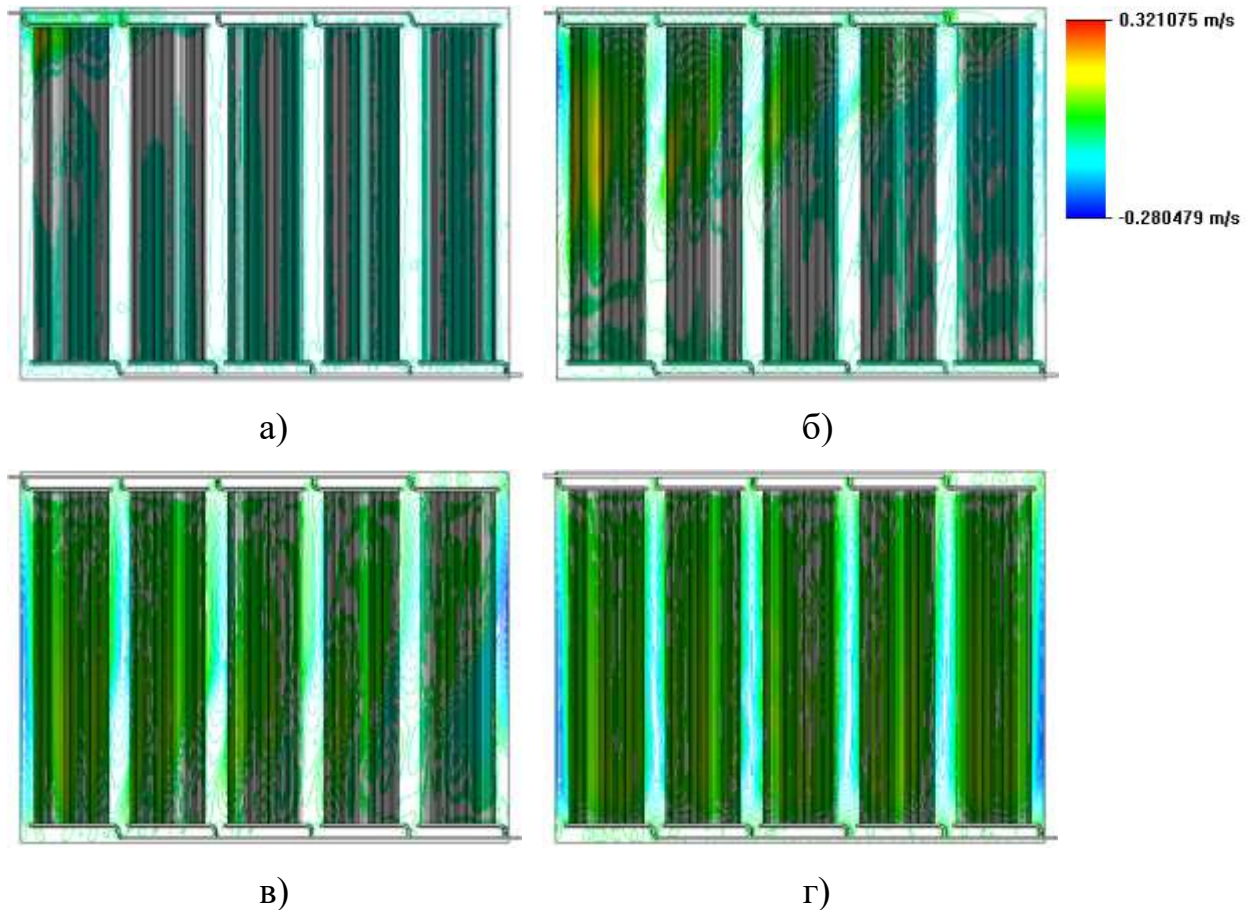


Рисунок 2.9 – Картины распределения скоростей в системе капиллярных трубок по оси Y по мере заполнения системы теплоносителем (время: а – а – 60 секунд; б – 180 секунд; в – 420 секунд; г– 600 секунд)

Рассмотрим полученный график изменения температуры теплоносителя при прохождении через систему капиллярных трубок, представленный на рисунке 2.10. График построен в относительных единицах. В качестве базисной величины для температуры принята начальная температура теплоносителя $t_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве базисной величины для длины принята общая протяженность трубок от входа до выхода теплоносителя $l_0 = 5,2\text{ м}$. Температура теплоносителя после прохождения через систему снизилась на $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом наиболее интенсивное снижение наблюдается при прохождении теплоносителя через систему капиллярных трубок [98].

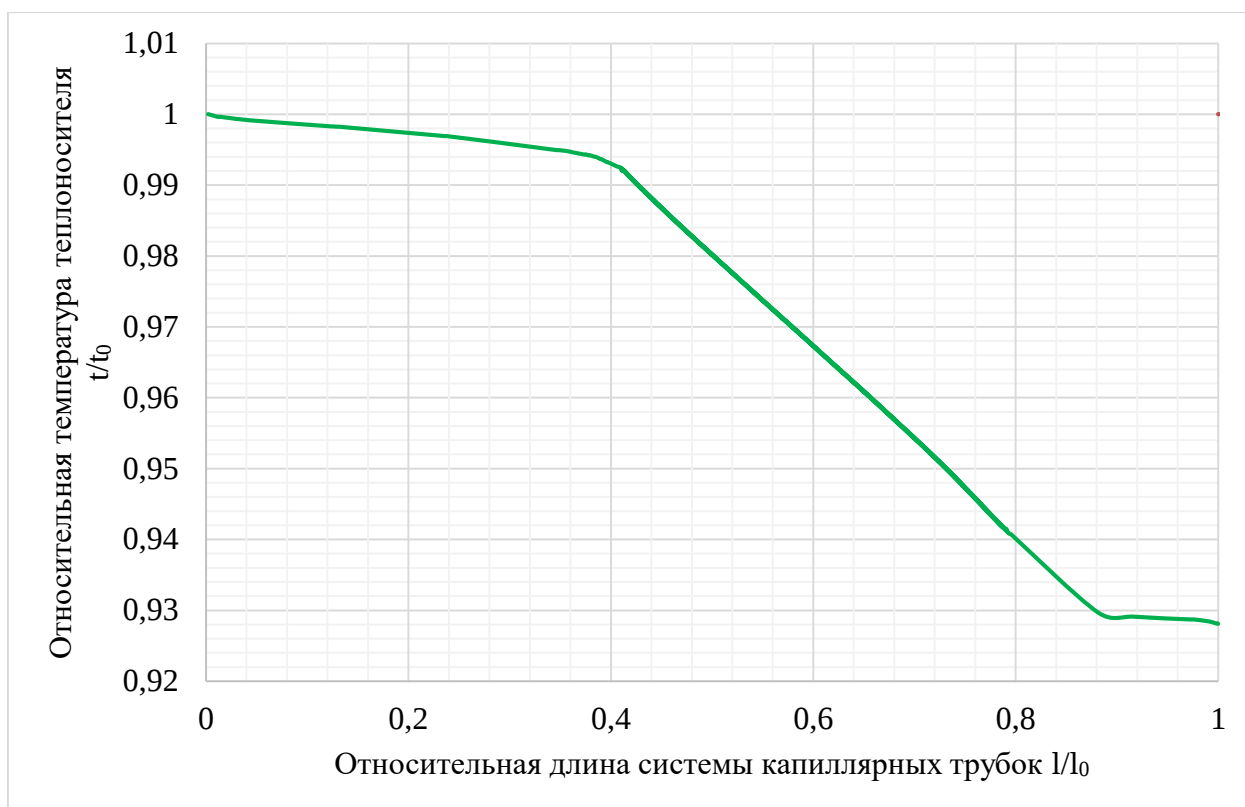


Рисунок 2.10 – График снижения температуры теплоносителя при прохождении через систему капиллярных трубок в относительных единицах

На рисунке 2.11 представлен график потерь давления в системе при прохождении теплоносителя. График также построен в относительных единицах. В качестве базисной величины для давления принято начальное значение $p_0 = 303\,975$ Па. Из графика видно, что наибольшие потери давления наблюдаются в зоне капиллярных трубок. Снижение давления происходит линейно. При этом в коллекторах величина давления не изменяется. Изменение происходит с изменением высоты стенового блока.

При этом суммарные потери давления оказались сопоставимы с системой радиаторного водяного отопления и системы водяного теплого пола и составили порядка 10 кПа. Таким образом, решение разделить систему капиллярных трубок на секции является оптимальным с точки зрения потерь давления.

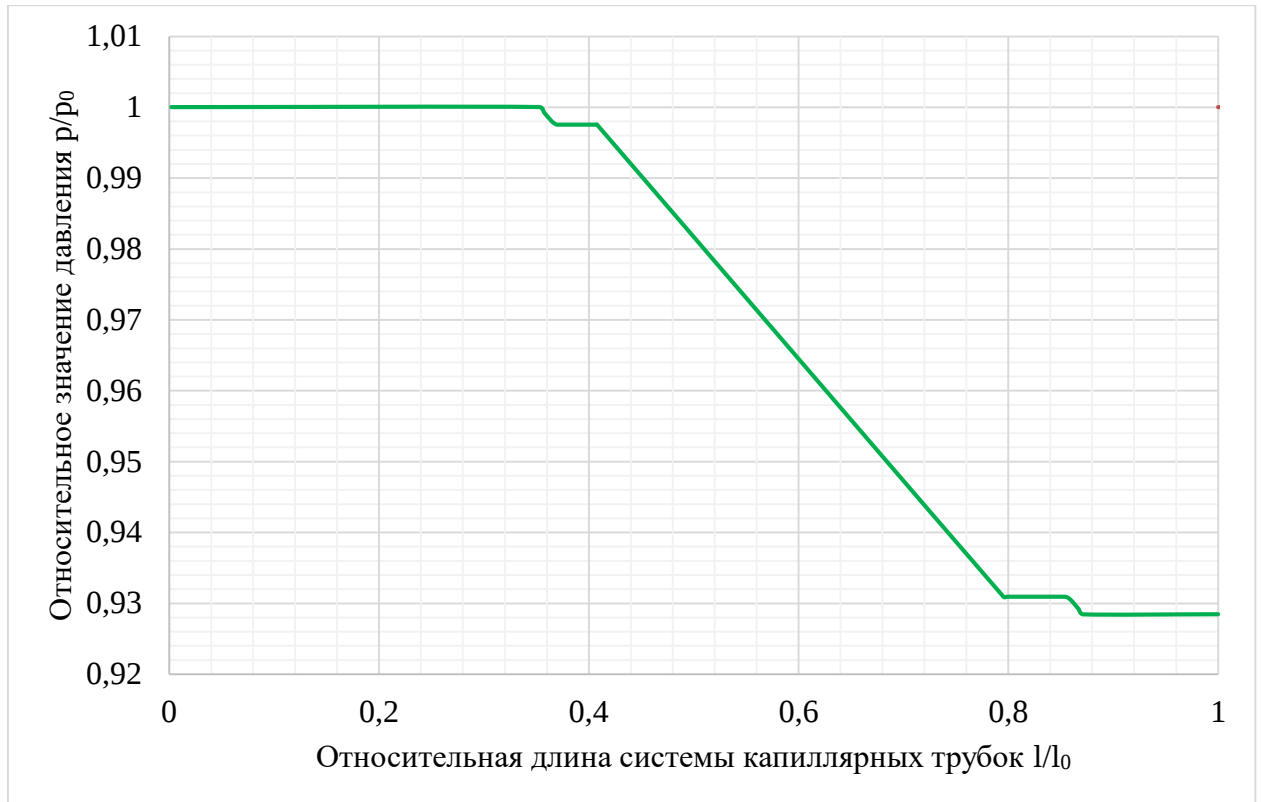


Рисунок 2.11 – График потерь давления в системе капиллярных трубок в относительных единицах

На рисунке 2.12 представлены графики температуры поверхности блока в его верхней, средней и нижней зонах по горизонтальной оси. Графики построены в относительных единицах. В качестве базисной величины для температуры принята температура теплоносителя на входе $t_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве базисной величины для длины принята ширина блока $L_0 = 3\text{ м}$.

Из представленных графиков видно, что максимальные значения температуры наблюдаются в зонах, расположенных над центром секций капиллярных трубок. При этом значения температуры в зонах между секциями незначительно ниже. В абсолютных величинах разница составляет $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2.13 представлен график температуры поверхности блока в его средней зоне по вертикали. График построен в относительных единицах. В качестве базисной величины для длины принята высота блока $H_0 = 2,7\text{ м}$.

Анализируя данный график, можно отметить, что снижение температуры от верхней зоны блока к нижней в области расположения

системы капиллярных трубок является незначительным. В абсолютном выражении оно составляет 2,5 °С [98].

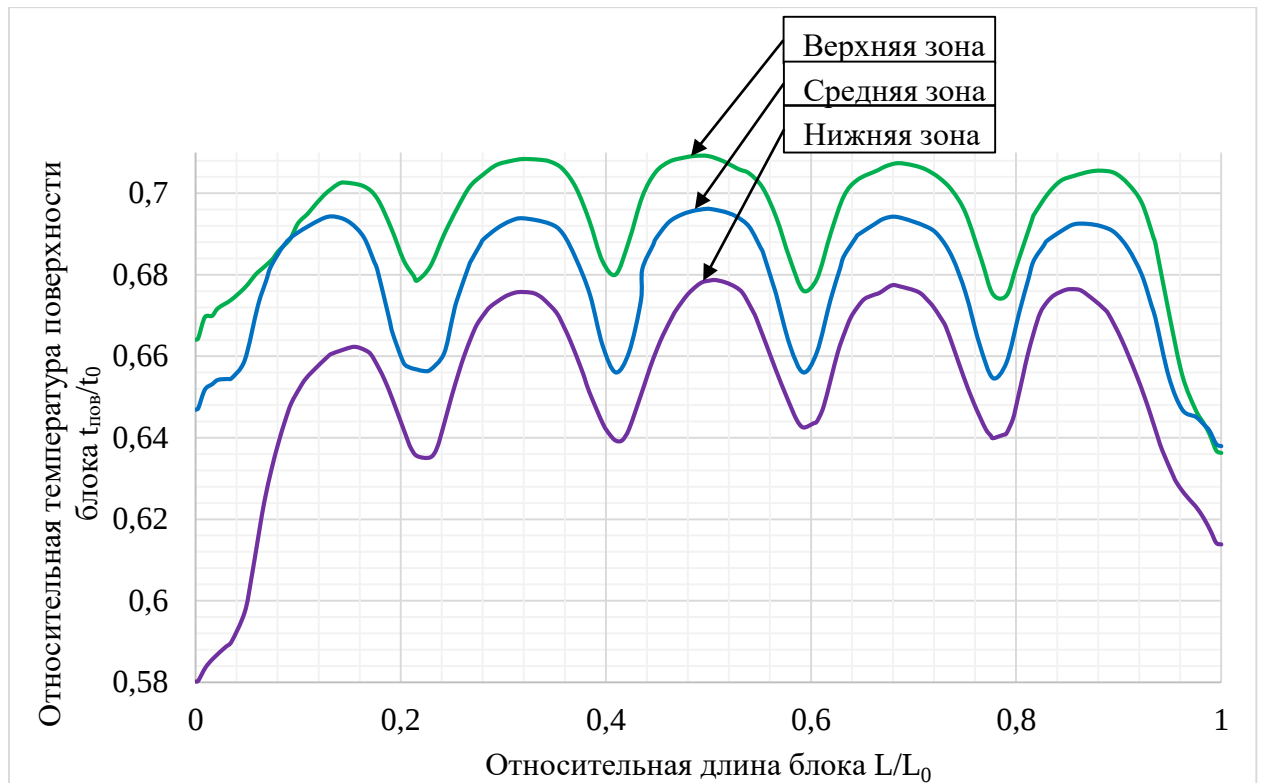


Рисунок 2.12 – Графики температуры поверхности блока по горизонтальной оси

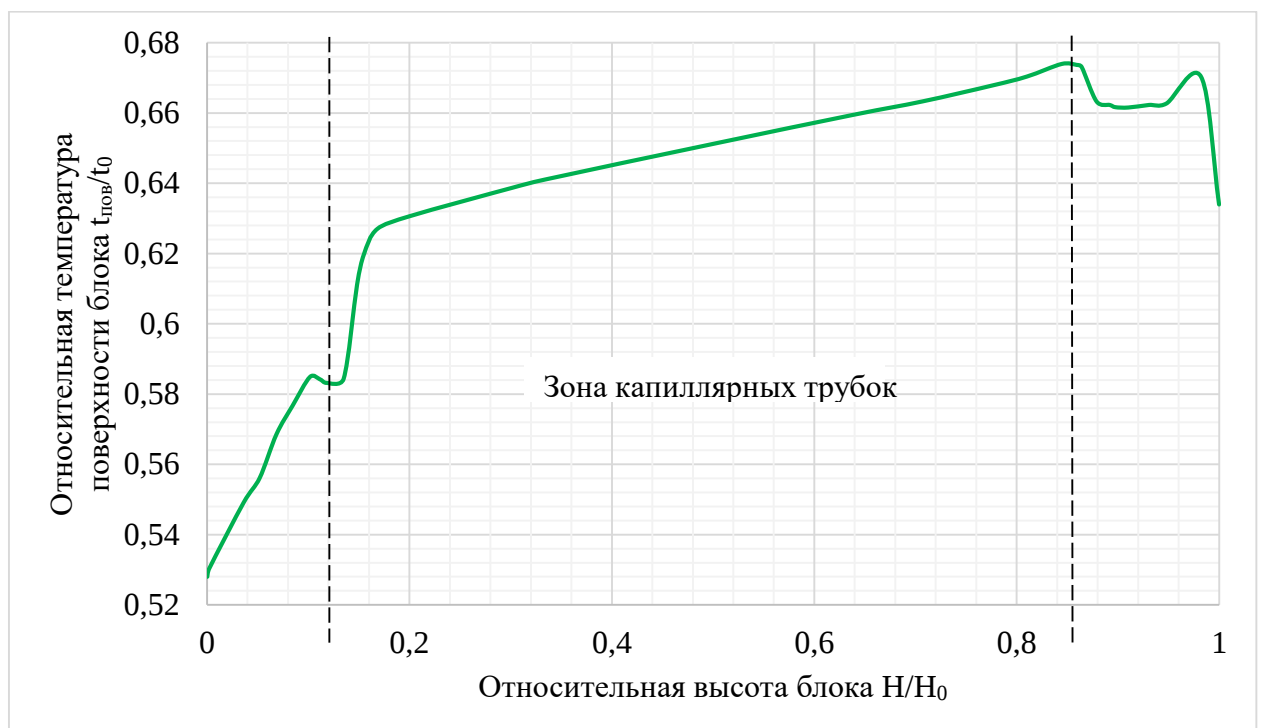


Рисунок 2.13 – График температуры поверхности блока по вертикальной оси

2.3 Тепловой расчет помещения при отоплении с помощью стенового блока с системой капиллярных трубок

2.3.1 Трехмерная модель помещения

Для проведения расчетов в программной среде SolidWorks была создана модель жилого помещения с установленным в нем стеновым блоком с системой капиллярных трубок. Стеновой блок располагается на стене, противоположной наружной стене с оконным проемом. Данное расположение выбрано для того, чтобы теплый воздух от стенового блока двигался навстречу потокам инфильтрующегося холодного воздуха через щели в оконном проеме, а также от более холодной наружной стены.

Разработанная модель помещения для проведения расчета представлена на рисунке 2.14.

Исходные данные для расчета следующие:

- длина помещения – 5 м;
- ширина помещения – 3 м;
- высота помещения – 2,7 м;
- площадь оконного проема – 1,2 м²;
- количество наружных стен – 1 шт;
- материал стен – строительные блоки;
- начальная температура воздуха в помещении – 15°C.

Граничные условия для выполнения расчета:

- температура теплоносителя на входе – 40 °C;
- давление на входе – 303 975 Па;
- массовый расход теплоносителя на выходе – 0,0083 кг/с;
- давление окружающей среды – 101 325 Па;
- температура наружного воздуха – -5°C.

При расчете предполагаем, что смежные помещения, а также помещения сверху и снизу от рассматриваемого являются отапливаемыми.

Размер ячеек расчетной сетки принимаем равным 0,05 м по каждой из осей. Полученная модель с расчетной сеткой представлена на рисунке 2.14.

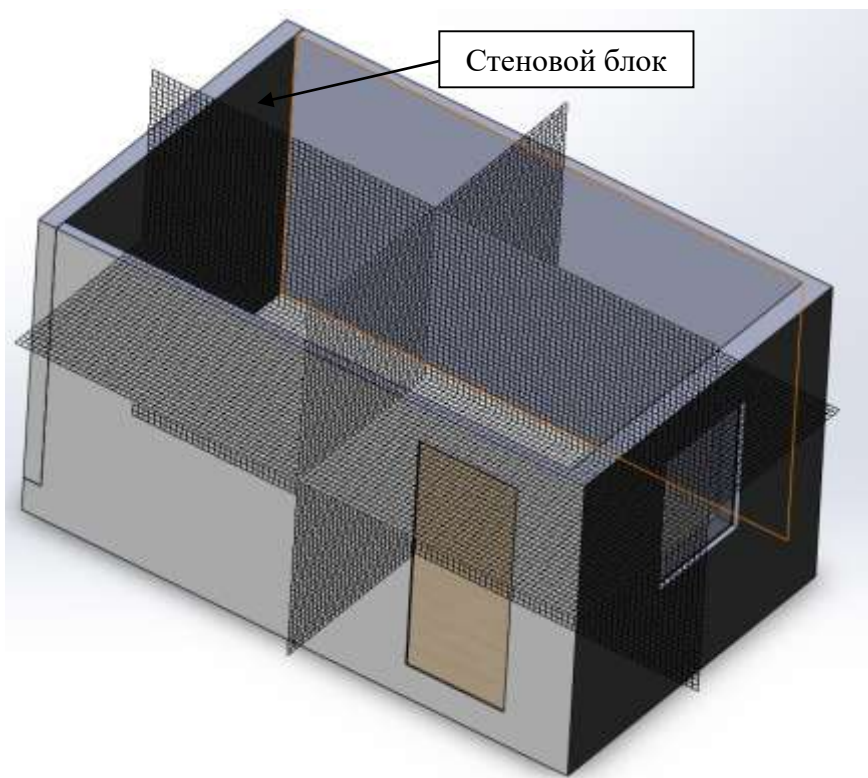


Рисунок 2.14 – Модель помещения со стеновым блоком с капиллярными трубками с расчетной сеткой

В качестве целей расчета указаны следующие:

- средняя температура текучей среды;
- средняя температура твердого тела.

В качестве критерия для завершения расчета установлена сходимость всех целей.

2.3.2 Анализ теплового расчета помещения со стеновым блоком с системой капиллярных трубок

В результате теплового расчета были получены следующие результаты:

- картины температур на поверхности стен помещения;
- картины полей распределения температур в помещении;

- графики распределения температур в помещении;
- картины полей скоростей воздуха в помещении.

Далее рассмотрим полученные результаты.

На рисунке 2.15 представлены картины температур на внутренней поверхности стен помещения и на полу.

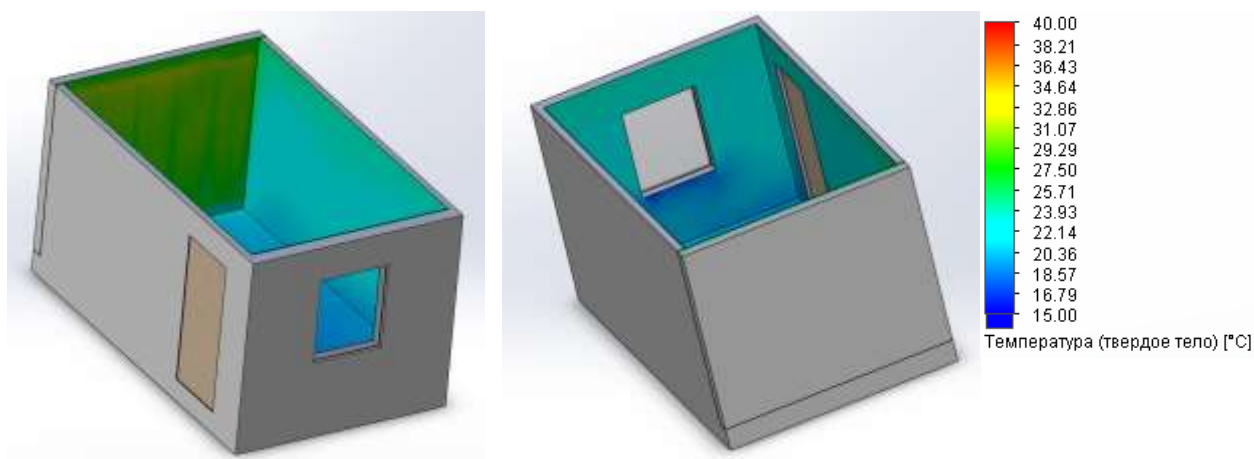


Рисунок 2.15 – Поля температур внутренних поверхностей помещения

По приведенным выше изображениям видно, что наибольшая температура наблюдается непосредственно у стенового блока, где она составляет в среднем 29 °С. Смежные стены имеют среднюю температуру 22 °С. Средняя температура внутренней поверхности наружной стены составляет 20 °С с наиболее холодной зоной возле оконного проема за счет инфильтрующегося холодного воздуха. Средняя температура пола также находится в пределах 20 °С. При этом необходимо отметить, что для всех поверхностей характерно равномерное распределение температур по их площади.

На рисунке 2.16 представлены картины полей температур в средней зоне помещения в осях Y-Z на различных этапах расчета.

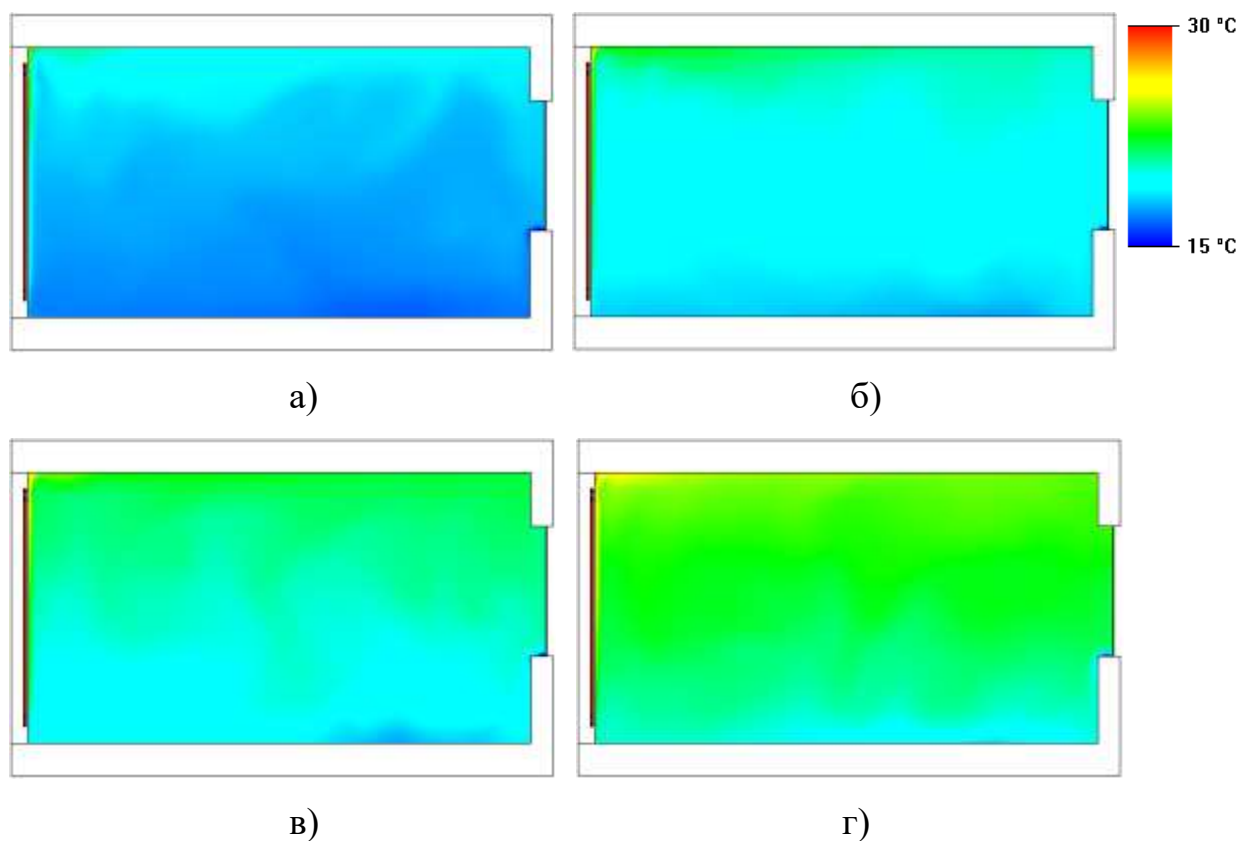


Рисунок 2.16 – Картины распределения температур в средней зоне помещения в плоскости Y-Z на разных этапах расчета (время: а – 60 секунд; б – 180 секунд; в – 420 секунд; г– 600 секунд)

Из представленных изображений видно, что потоки теплого воздуха от стенового блока с капиллярными трубками «выдавливают» холодный воздух в сторону наружной стены. При этом по завершении расчета наблюдается равномерный прогрев воздуха в помещении, в том числе и в обслуживаемой зоне помещения [12]. Разница между температурой воздуха у потолка и температурой на уровне пола не превышает 3,8 °C.

На рисунке 2.17 приведены картины температур в середине помещения по завершении расчета в различных плоскостях. Данные изображения показывают, что по всему объему помещения наблюдается равномерный прогрев воздуха.

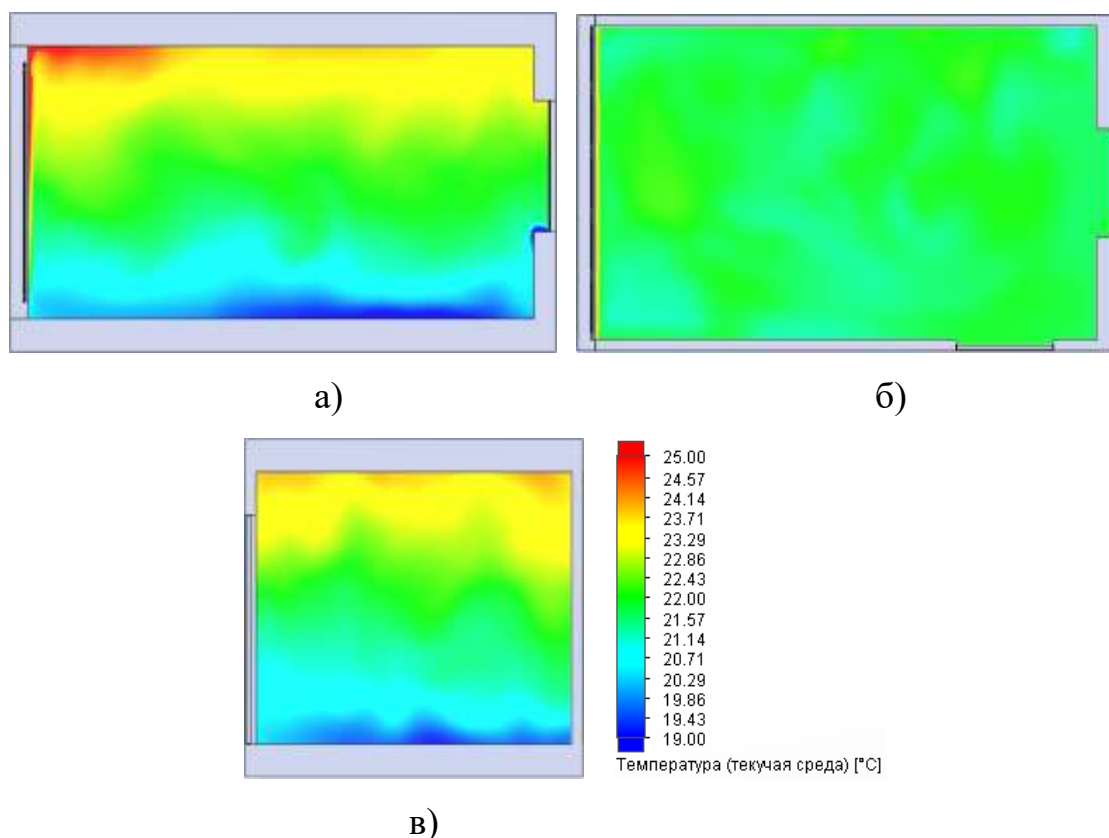


Рисунок 2.17 – Картины распределения температур в средней зоне помещения (а – в плоскости Y-Z; б – в плоскости X-Z; в – в плоскости X-Y)

Для сравнительного анализа было выполнено моделирование отопления рассматриваемого помещения с помощью радиатора. Результирующая картина распределения температур в плоскости Y-Z приведена на рисунке 2.18. Из нее видно, что в зоне установки радиатора возникает мощный конвективный поток. При этом температура воздуха в подпотолочной зоне значительно выше температуры на уровне пола. Для более детального сравнения на рисунке 2.19 представлены графики распределения температур в центре помещения для двух сравниваемых видов отопления.

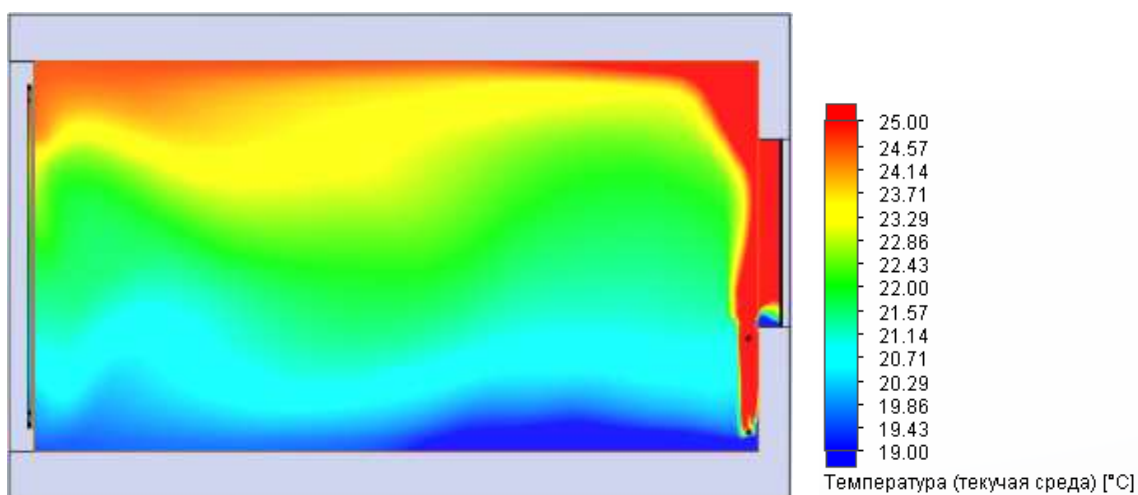


Рисунок 2.18 – Картины распределения температур в средней зоне помещения в плоскости Y-Z при использовании радиатора

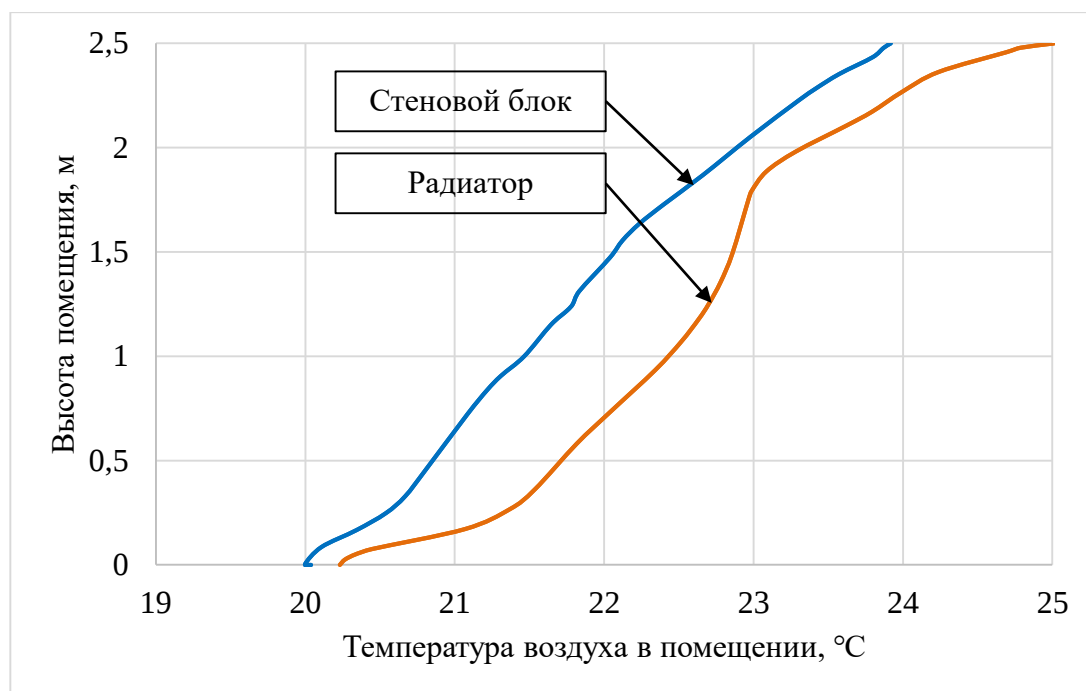


Рисунок 2.19 – Графики распределения температур по высоте (ось Y) в центре отапливаемого помещения

Из представленных графиков видно, что на уровне пола наблюдаются примерно равные значения температуры. Однако, увеличение температуры к потолку при использовании стенового блока происходит более плавно, и разница температур на уровне потолка между сравниваемыми системами возрастает. Таким образом, использование стенового блока позволяет

сократить нерациональный расход тепла на нагрев воздуха у подпотолочной зоны.

На рисунке 2.20 представлен график распределения температуры по длине помещения при использовании стенового блока, из которого следует, что наибольшие значения температуры наблюдаются в непосредственной близости от отопительного прибора. По остальному объему помещения наблюдается равномерный прогрев воздуха.

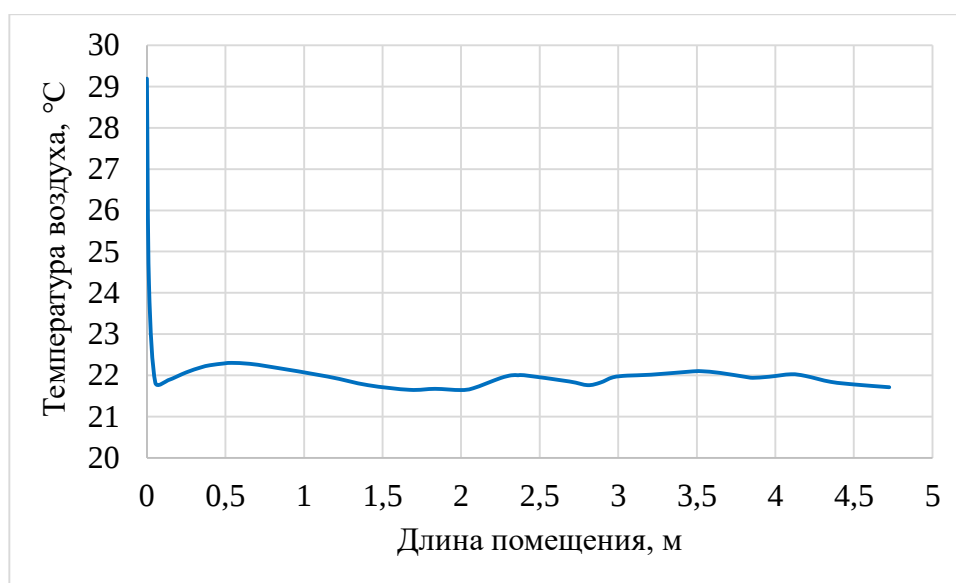


Рисунок 2.20 – График распределения температур по длине (ось Z) в центре отапливаемого помещения

На рисунке 2.21 представлены картины распределения скоростей воздуха в средней зоне помещения в различных плоскостях. Из данных изображений видно, что основные потоки воздуха сосредоточены в зоне, примыкающей к стеновому блоку, а также в местах поступления приточного воздуха из соседнего помещения через дверной проем и инфильтрации наружного воздуха через щели в оконном проеме. При этом в большей части помещения движение воздуха практически отсутствует. Это обусловлено тем, что большая часть тепла от стенового блока передается за счет радиационного излучения, а конвективные потоки практически отсутствуют. При этом в зонах движения воздуха скорости не превышают допустимой нормы 0,15 м/с [12].

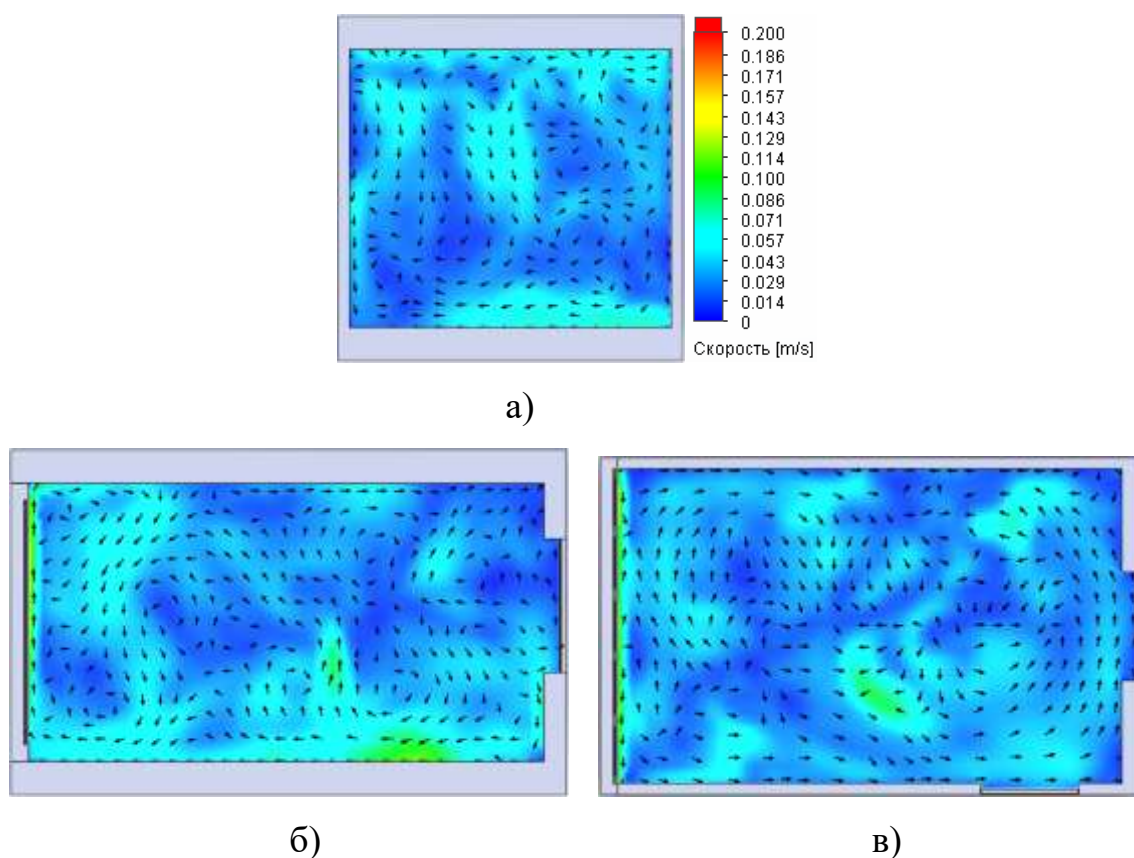


Рисунок 2.21 – Картины распределения скоростей в средней зоне помещения
(а – плоскость X-Y, б – плоскость Y-Z, в – плоскость X-Z)

Таким образом, можно сделать вывод о том, что как по равномерности нагрева воздуха в помещении, так и по отсутствию мощных конвективных потоков предлагаемая система отопления выгодно отличается от традиционных систем радиаторного отопления.

2.4 Верификация полученных результатов

Поскольку существует ряд исследовательских работ, также направленных на изучение систем отопления с помощью расположения отопительных приборов на стенах, сравним их выводы с результатами, полученными в ходе численного моделирования, проведенного в данной работе.

В работе [77], в которой авторы разрабатывают методику расчета теплопередачи водяной капиллярной системы, делается вывод о том, что основная часть тепла от таких систем передается путем лучистого теплообмена, а конвективная составляющая практически отсутствует. Это подтверждается результатами, полученными выше. Конвективные потоки в помещении практически отсутствуют.

Картины температурных полей, полученные авторами в работах [99, 100] идентичны результатам, полученным в ходе моделирования в данной работе. Температура стенового блока увеличивается от пола к потолку. При этом за счет использования капиллярного отопления достигается высокая комфортность микроклимата в отапливаемом помещении.

Исследования [101, 102], посвященные системе капиллярного водяного отопления, подтверждают ранее сделанный вывод о равномерном распределении температуры по высоте в отапливаемом помещении. Максимальная разница температур по высоте составила $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, что с достаточной точностью соотносится с результатами, полученными в работе [101], где температура воздуха по высоте меняется от пола к потолку не более, чем на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В работах [102, 103, 104] авторы приходят к выводу, что системы капиллярного отопления обладают энергосберегающим потенциалом, поскольку для их работы используется теплоноситель с низкой температурой. В ходе численного моделирования, произведенного в данной работе, температура теплоносителя на входе составляла $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, после прохождения через систему капиллярных трубок она снизилась на $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соотносится с результатами работ, обозначенных выше.

2.5 Выводы

1. В результате моделирования предложенной конструкции стенового блока с капиллярными трубками доказано, что достигается равномерное

распределение теплоносителя и, как следствие, равномерный нагрев всей его поверхности. Разница температур между самыми горячими и самыми холодными участками не превышает 2 °С, при этом средняя температура поверхности составляет 29 °С.

2. Разделение системы капиллярных трубок на секции позволило добиться снижения потерь давления в системе до сопоставимых с потерями в традиционных радиаторных системах водяного отопления, а также в системах водяного теплого пола.

3. Предложенная система отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками является низкотемпературной, поскольку достижение заданной температуры воздуха в помещении было зафиксировано при температуре теплоносителя на входе 40 °С. Температура теплоносителя на выходе из системы составила 35,5 °С.

4. Анализ распределения температур в отапливаемом помещении показал высокую равномерность температур по всему объему отапливаемого помещения. Анализ показал, что максимальный перепад температуры по вертикали для системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками составил 3,8 °С. Данный параметр значительно превосходит показатели радиаторных систем водяного отопления, где аналогичный перепад может достигать 7°С. За счет меньшей разницы температур снижается расход тепла на перегрев воздуха в подпотолочной зоне.

5. Анализ распределения скоростей в помещении говорит о практически полном отсутствии конвективных потоков, что также выгодно отличает предлагаемую систему от радиаторного водяного отопления и позволяет устанавливать нагревательные приборы не только в местах наибольших теплопотерь. Это объясняется тем, что основная часть тепла при использовании капиллярной системы передается за счет радиационного излучения, что положительным образом сказывается на показателях комфортности микроклимата.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНОВОГО БЛОКА СИСТЕМЫ КАПИЛЛЯРНОГО ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ

Основной задачей экспериментальных исследований являлось получение термодинамических характеристик предлагаемой конструкции стенового блока с системой капиллярных трубок.

Значения варьируемых параметров приняты с учетом данных, полученных в результате численного моделирования в разделе 2.

Изменения параметров в ходе экспериментов и контроль точности измерений выполнялись с учетом требований [105, 106, 107].

Для проведения экспериментов было изготовлено 3 варианта блоков с капиллярными трубками различных диаметров. Каждый блок представляет из себя два листа пенополистирола размером 1,18х0,58х0,5 м и 1,18х0,58х0,2 м, между которыми располагается система капиллярных трубок. Лист толщиной 0,05 м является основанием, в котором проделаны пазы для укладки капиллярных трубок и коллекторов. Схема данных пазов представлена на рисунках 3.1 и 3.2.

В каждый блок входит 20 капиллярных трубок длиной 1 м, расположенных с интервалом 0,015 м (для капилляров диаметром 0,003 м) и 0,02 м (для капилляров диаметром 0,0045 и 0,006 м). Увеличение расстояния между капиллярными трубками для больших диаметров связано с возможным перекрытием тепловых полей соседних трубок. В качестве коллекторов использованы трубы диаметром 0,02 м [108].

Второй лист пенополистирола толщиной 0,02 м накрывает систему капиллярных трубок и на его наружной поверхности производится фиксация значений температуры в ходе экспериментов.

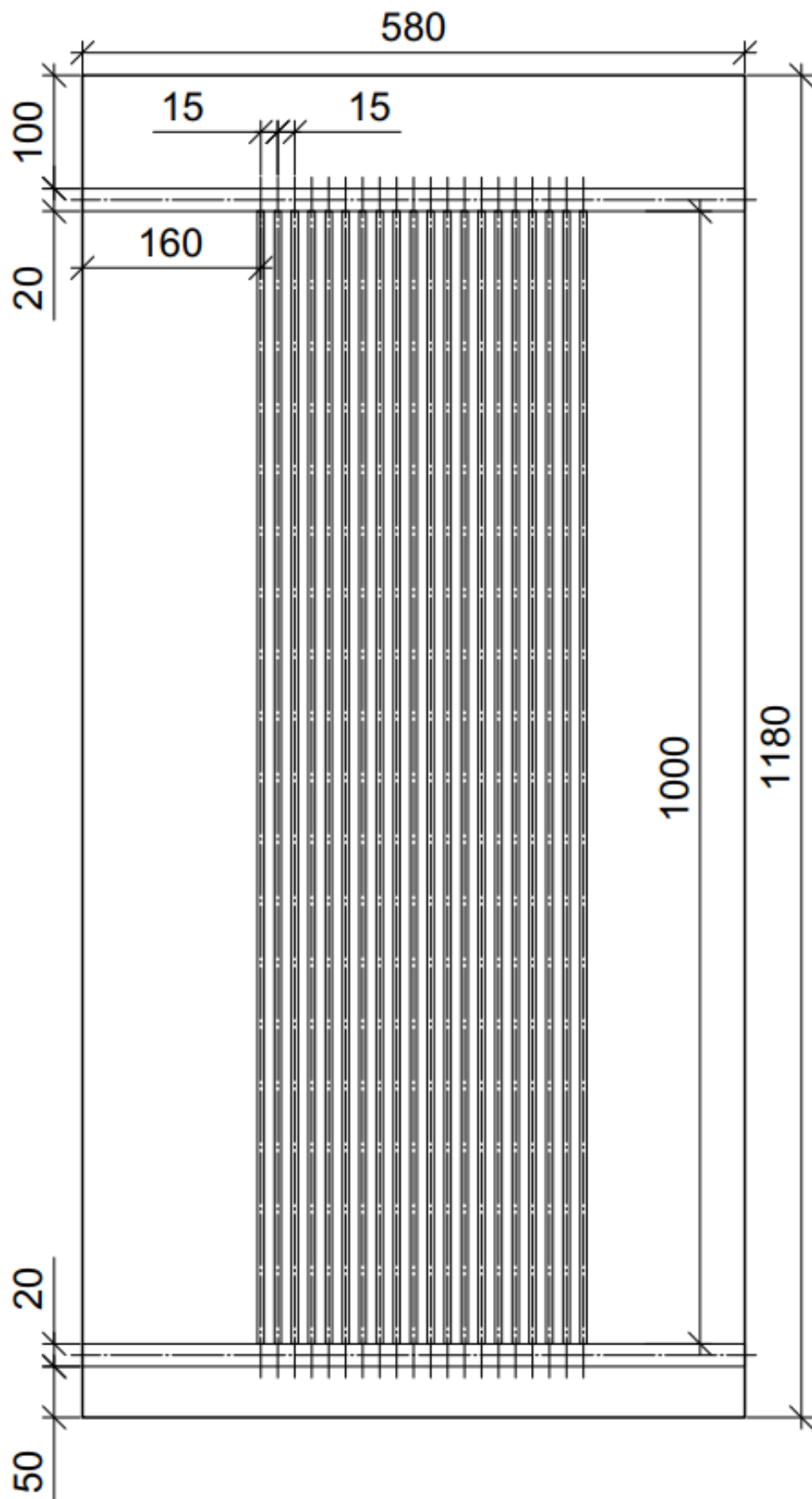


Рисунок 3.1 – Схема расположения пазов для укладки коллекторов и капиллярных трубок (для трубок диаметром 0,003 м)

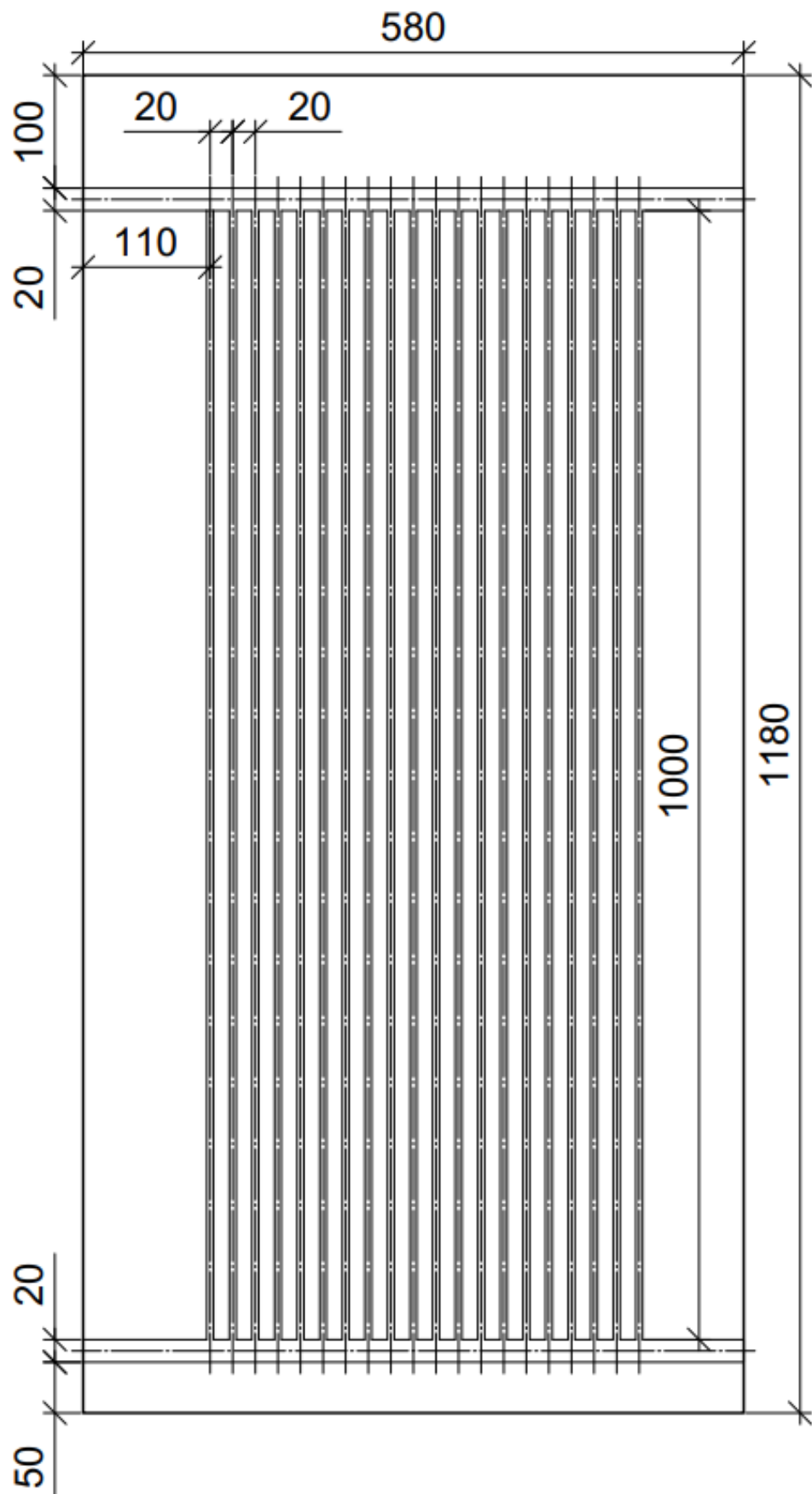


Рисунок 3.2 – Схема расположения пазов для укладки коллекторов и капиллярных трубок (для трубок диаметром 0,0045 и 0,006 м)

Общий вид системы капиллярных трубок внутри блока представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Общий вид системы капиллярных трубок внутри экспериментального блока

В ходе экспериментов проводилась фиксация следующих параметров:

- температура теплоносителя на входе в стеновой блок;
- температура теплоносителя на выходе из стенового блока;

- температура поверхности блока
- давление на входе в стеновой блок;
- давление на выходе из стенового блока;
- расход теплоносителя.

Измерение температуры на поверхности блоков проводилось с использованием цифрового мультиметра типа DT-838 с выносными датчиками температуры. Схема их расположения представлена на рисунке 3.4.

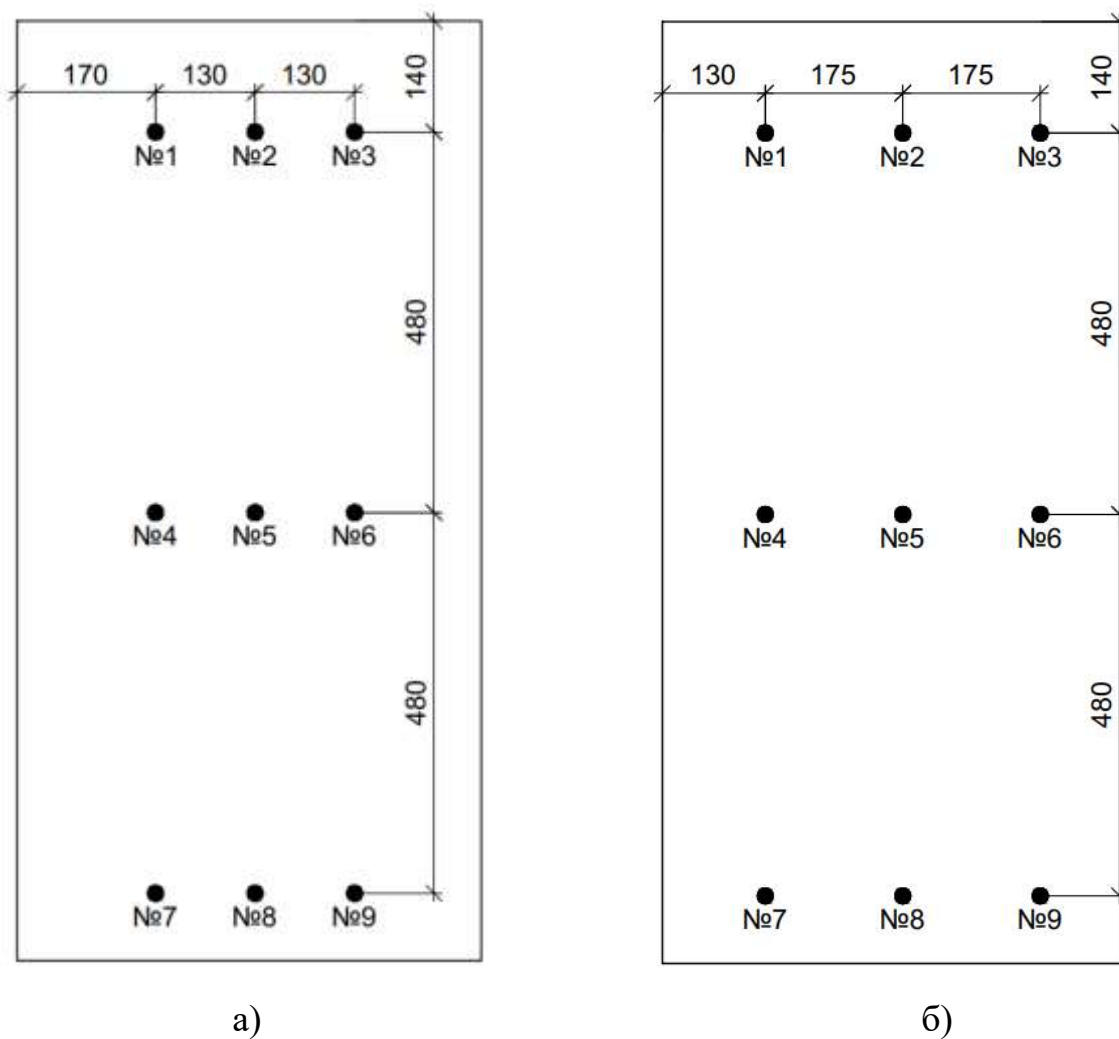


Рисунок 3.4 – Схема расположения и количество точек измерения температуры на поверхности блоков (а – блок с капиллярными трубками диаметром 0,003 м; б – блоки с капиллярными трубками диаметром 0,0045 и 0,006 м)

Измерение температуры теплоносителя в трубках проводилось также с использованием выносных датчиков. Температурные датчики располагались по центру трубок на входе и выходе стенового блока. Фиксация показаний осуществлялась после стабилизации значений показаний мультиметра.

3.1 Описание экспериментального стенда

Для проведения экспериментальных исследований был разработан стенд, схема которого представлена на рисунке 3.5.

Основными элементами стенда являются блок с капиллярными трубками, описанный выше, электрический водонагреватель, циркуляционный насос.

Стенд работает следующим образом: в электрическом водонагревателе вода нагревается до заданной температуры. Нагретая вода с помощью циркуляционного насоса подается в блок с капиллярными трубками, пройдя через который, возвращается обратно в бак водонагревателя.

Для регулирования температуры нагрева воды используется встроенный в водонагреватель термостат.

Регулирование массового расхода теплоносителя через экспериментальный блок осуществляется при помощи шарового крана.

Для фиксации текущего расхода теплоносителя применяется счетчик воды типа СВ-15х.

Контроль значений давления осуществляется при помощи манометров типа МПЗ-УУ2. Манометр установлен перед экспериментальным блоком, манометр установлен после блока.

Контроль значений температуры теплоносителя и температуры поверхности экспериментального блока осуществляется при помощи цифрового мультиметра с выносными датчиками. Датчик установлен на входе теплоносителя в блок, датчик установлен на выходе теплоносителя из блока.

Датчики установлены на наружной стороне блока в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.5.

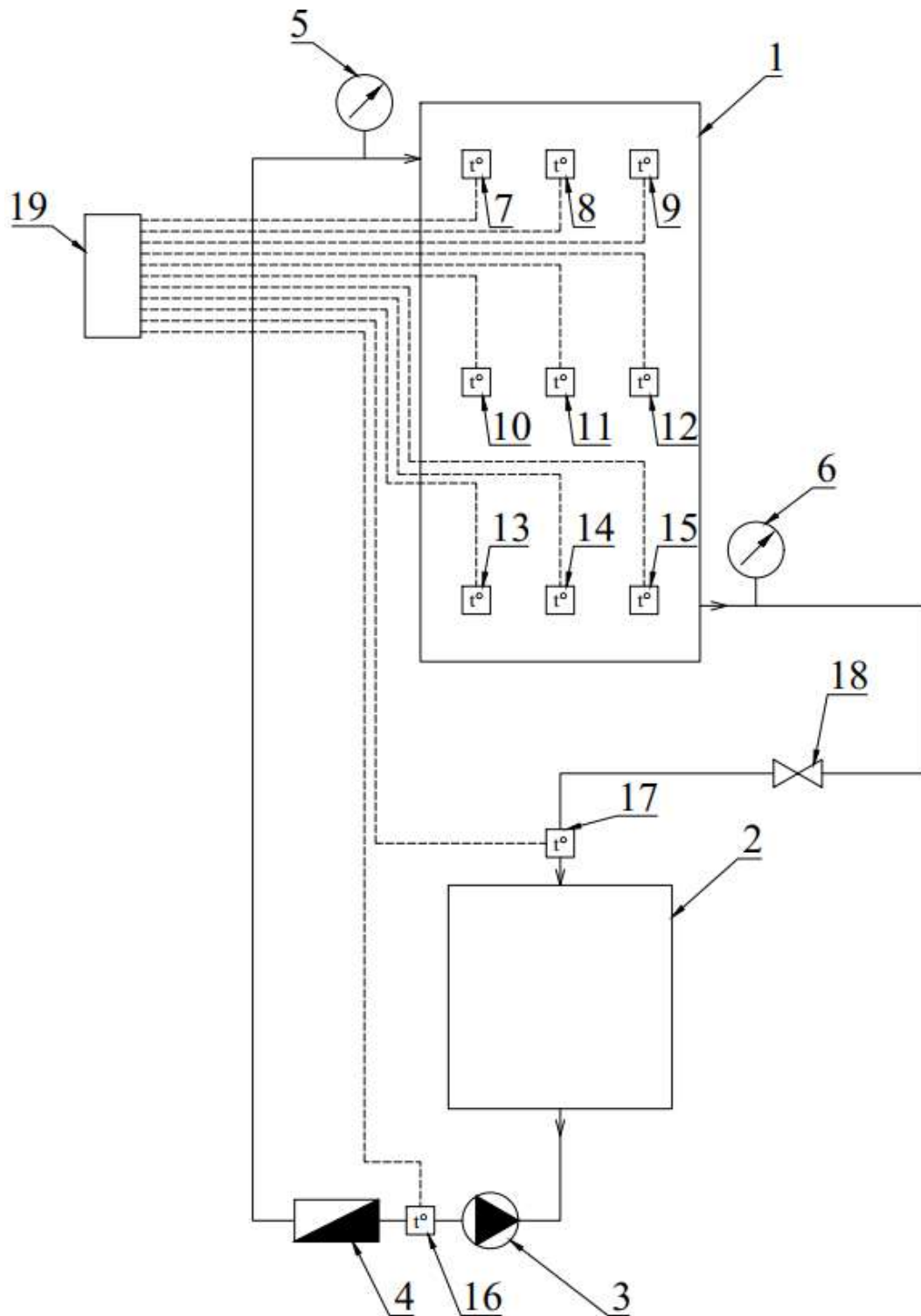


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 – блок с капиллярными трубками; 2 – электрический водонагреватель; 3 – циркуляционный насос; 4 – счетчик воды; 5, 6 – манометры; 7-17 – выносные датчики температуры; 18 – шаровый кран; 19 – цифровой мультиметр

Для получения наглядной картины распределения температур по поверхности блока используется тепловизор.

Подключение подающей и обратной трубы выполнено по диагональной схеме для равномерного заполнения капиллярных трубок теплоносителем.

Проведение эксперимента выполняется в следующем порядке.

1. В электрический водонагреватель заливается вода.
2. Открывается шаровый кран.
3. С помощью циркуляционного насоса система капиллярных трубок заполняется водой.
4. С помощью регулятора на баке электрического водонагревателя устанавливается требуемое значение температуры.
5. После достижения требуемой температуры воды в баке снова включается насос.
6. С помощью шарового крана по показаниям счетчика задается требуемый массовый расход теплоносителя.
7. С помощью манометров снимаются показания давления в системе до и после экспериментального блока.
8. По показаниям цифрового мультиметра контролируется температура теплоносителя на входе и выходе из блока.
9. После стабилизации показаний мультиметра фиксируются значения температуры на входе и выходе из блока.
10. Фиксируются значения температуры на поверхности экспериментального блока с помощью мультиметра.
11. С помощью тепловизора фиксируются картины полей температур.

На рисунке 3.6 представлен экспериментальный стенд с обозначениями его основных элементов.



Рисунок 3.6 – Экспериментальный стенд:

1 – блок с капиллярными трубками; 2 – электрический водонагреватель;
3 – циркуляционный насос; 4 – счетчик воды; 5, 6 – манометры; 7-17 –
выносные датчики температуры; 18 – шаровой кран

После завершения серии экспериментов с каждым из блоков в отдельности все три блока соединяются последовательно и с помощью тепловизора фиксируются поля температур на каждом из них для сравнения и анализа результатов.

Экспериментальный стенд с тремя последовательно подключенными блоками представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Общий вид экспериментального стенда:

1.1 – блок с капиллярными трубками диаметром 0,006 м; 1.2 – блок с капиллярными трубками диаметром 0,0045 м; 1.3 – блок с капиллярными трубками диаметром 0,003 м; 2 – электрический водонагреватель; 3 – циркуляционный насос; 4 – счетчик воды; 5, 6 – манометры; 7, 8 – выносные датчики температуры; 9 – шаровой кран

3.2 Экспериментальное исследование изменения температуры теплоносителя на выходе при использовании блока предложенной конструкции

Целью исследования является получение с помощью теории планирования эксперимента зависимости изменения температуры теплоносителя после прохождения через экспериментальный блок от температуры теплоносителя на входе, массового расхода теплоносителя и диаметра капиллярных трубок.

В исследовании постоянными параметрами приняты:

– температура окружающей среды $t_{cp} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– давление окружающей среды $P_{атм} = 101\,325$ Па.

Варьируемые параметры:

– температура теплоносителя на входе в экспериментальный блок $t_{вх}$, °С;

– массовый расход теплоносителя через экспериментальный блок G , кг/с;

– диаметр капиллярных трубок d , м [108, 109].

В ходе проведения эксперимента отслеживалась верхняя граница давления на входе и выходе экспериментального блока, которая не должна превышать 10 кПа в соответствии с результатами численного моделирования.

Уровни варьирования факторов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Уровни варьирования факторов

Уровни факторов	Факторы		
	X_1 , °С	X_2 , кг/с	X_3 , м
Основной (нулевой)	45	0,0069	0,0045
Нижний	40	0,0055	0,003
Верхний	50	0,0083	0,006
Интервал варьирования	5	0,0014	0,0015

В таблице 3.1 X_1 , °С – температура теплоносителя на входе в экспериментальный блок ($t_{вх}$); X_2 , кг/с – массовый расход теплоносителя через экспериментальный блок (G); X_3 , м – диаметр капиллярных трубок (d).

Для планирования эксперимента был составлен ротатабельный план второго порядка [110, 111, 112]. Число варьируемых факторов составляет $k = 3$. Величина звездного плеча определяется соотношением (3.1):

$$\alpha = 2^{\frac{k-p}{4}} = 2^{\frac{3-0}{4}} = 1,682, \quad (3.1)$$

где $k = 3$ – количество варьируемых факторов;

$p = 0$ – дробная реплика для полного факторного эксперимента.

Полученная матрица ротатабельного планирования второго порядка приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица ротатабельного плана второго порядка

	№ опыта	Факторы (кодированные значения)			Факторы (натуральные значения)			Отклик
		X_1	X_2	X_3	$X_1 (t_{ex}),$ °C	$X_2 (G),$ кг/с	$X_3 (d),$ м	
Ядро плана	1	1	1	1	50	0,0083	0,006	49
	2	-1	1	1	40	0,0083	0,006	39,7
	3	1	-1	1	50	0,0055	0,006	48
	4	-1	-1	1	40	0,0055	0,006	38,5
	5	1	1	-1	50	0,0083	0,003	49
	6	-1	1	-1	40	0,0083	0,003	39,6
	7	1	-1	-1	50	0,0055	0,003	48
	8	-1	-1	-1	40	0,0055	0,003	38,4
Звездные точки	9	$\alpha=+1,682$	0	0	53,41	0,0069	0,0045	51,8
	10	0	$\alpha=+1,682$	0	45	0,0093	0,0045	44,6
	11	0	0	$\alpha=+1,682$	45	0,0069	0,007	43,5
	12	$\alpha=-1,682$	0	0	36,59	0,0069	0,0045	36,2
	13	0	$\alpha=-1,682$	0	45	0,0045	0,0045	42,7
	14	0	0	$\alpha=-1,682$	45	0,0069	0,002	43,3
Центр плана	15	0	0	0	45	0,0069	0,0045	43,4
	16	0	0	0	45	0,0069	0,0045	43,7
	17	0	0	0	45	0,0069	0,0045	43,6
	18	0	0	0	45	0,0069	0,0045	43,5
	19	0	0	0	45	0,0069	0,0045	43,8
	20	0	0	0	45	0,0069	0,0045	43,6

Для получения регрессионной зависимости воспользуемся методикой, приведенной в [110, 111, 113, 114].

Добавим фиктивный столбец $X_0 = 1$, а также дополнительные столбцы $X_{12} = X_1 \cdot X_2$, $X_{13} = X_1 \cdot X_3$, $X_{23} = X_2 \cdot X_3$, $X_{123} = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ в исходную матрицу (таблица 3.2) плана.

$$X_{1j}' = X_{1j}^2 - \frac{\sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2}{20}, \quad (3.2)$$

$$X_{2j}' = X_{2j}^2 - \frac{\sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2}{20}, \quad (3.3)$$

$$X_{3j}' = X_{3j}^2 - \frac{\sum_{j=1}^{20} X_{3j}^2}{20}, \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 = \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2 = \sum_{j=1}^{20} X_{3j}^2 = & (+1)^2 + (-1)^2 + (+1)^2 + (-1)^2 + \\ & + (+1)^2 + (-1)^2 + (+1)^2 + (-1)^2 + (+1,682)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (-1,682)^2 + \\ & + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 = 13,66 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$X_{1j}' = X_{1j}^2 - \frac{13,66}{20} \approx X_{1j}^2 - 0,68, \quad (3.6)$$

$$X_{2j}' = X_{2j}^2 - \frac{13,66}{20} \approx X_{2j}^2 - 0,68, \quad (3.7)$$

$$X_{3j}' = X_{3j}^2 - \frac{13,66}{20} \approx X_{3j}^2 - 0,68. \quad (3.8)$$

Дополним начальную матрицу вновь принятыми и рассчитанными значениями. Также добавим в нее значения отклика Y'_j , °C, рассчитанные с помощью выведенной регрессионной зависимости. Ход ее получения приведен ниже. Преобразованная матрица плана эксперимента представлена в таблицах 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3 – Матрица ротatableного плана второго порядка в кодированных значениях (начало)

	№ опыта	Факторы							
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_{12}	X_{13}	X_{23}	X_{123}
Ядро плана	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
	3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
	4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
	5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
	6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
	7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
	8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
Звездные точки	9	1	$\alpha=+1,682$	0	0	0	0	0	0
	10	1	0	$\alpha=+1,682$	0	0	0	0	0
	11	1	0	0	$\alpha=+1,682$	0	0	0	0
	12	1	$\alpha=-1,682$	0	0	0	0	0	0
	13	1	0	$\alpha=-1,682$	0	0	0	0	0
	14	1	0	0	$\alpha=-1,682$	0	0	0	0
Центр плана	15	1	0	0	0	0	0	0	0
	16	1	0	0	0	0	0	0	0
	17	1	0	0	0	0	0	0	0
	18	1	0	0	0	0	0	0	0
	19	1	0	0	0	0	0	0	0
	20	1	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3.4 – Матрица ротatableного плана второго порядка в кодированных значениях (окончание)

	№ опыта	Факторы			Отклик	
		X'_{11}	X'_{22}	X'_{33}	$Y_j, ^\circ\text{C}$	$Y_j, ^\circ\text{C}$
Ядро плана	1	0,32	0,32	0,32	49	49,15
	2	0,32	0,32	0,32	39,7	39,77
	3	0,32	0,32	0,32	48	48,04
	4	0,32	0,32	0,32	38,5	38,66
	5	0,32	0,32	0,32	49	49,15
	6	0,32	0,32	0,32	39,6	39,77
	7	0,32	0,32	0,32	48	48,04
	8	0,32	0,32	0,32	38,4	38,66
Звездные точки	9	2,15	-0,68	-0,68	51,8	52,1
	10	-0,68	2,15	-0,68	44,6	44,77
	11	-0,68	-0,68	2,15	43,5	43,56
	12	2,15	-0,68	-0,68	36,2	36,33
	13	-0,68	2,15	-0,68	42,7	42,9
	14	-0,68	-0,68	2,15	43,3	43,56
Центр плана	15	-0,68	-0,68	-0,68	43,4	43,25
	16	-0,68	-0,68	-0,68	43,7	43,25
	17	-0,68	-0,68	-0,68	43,6	43,25
	18	-0,68	-0,68	-0,68	43,5	43,25
	19	-0,68	-0,68	-0,68	43,8	43,25
	20	-0,68	-0,68	-0,68	43,6	43,25

Произведем промежуточные преобразования полученной матрицы для определения коэффициентов уравнения регрессии (3.9). В результате получим матрицу, представленную в таблицах 3.5 и 3.6.

$$Y_j' = b_0' + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_{12} + b_{13} \cdot X_{13} + b_{23} \cdot X_{23} + b_{123} \cdot X_{123} + b_{11}' \cdot X_{11}' + b_{22}' \cdot X_{22}' + b_{33}' \cdot X_{33}' \quad (3.9)$$

Таблица 3.5 – Произведение кодированных значений факторов на значения отклика

№ опыта	Факторы										
	$X_0 * Y$	$X_1 * Y$	$X_2 * Y$	$X_3 * Y$	$X_{12} * Y$	$X_{13} * Y$	$X_{23} * Y$	$X_{123} * Y$	$X_{11}' * Y$	$X_{22}' * Y$	$X_{33}' * Y$
1	49	49	49	49	49	49	49	49	15,68	15,68	15,68
2	39,7	-39,7	39,7	39,7	-39,7	-39,7	39,7	-39,7	12,7	12,7	12,7
3	48	48	-48	48	-48	48	-48	-48	15,36	15,36	15,36
4	38,5	-38,5	-38,5	38,5	38,5	-38,5	-38,5	38,5	12,32	12,32	12,32
5	49	49	49	-49	49	-49	-49	-49	15,68	15,68	15,68
6	39,6	-39,6	39,6	-39,6	-39,6	39,6	-39,6	39,6	12,67	12,67	12,67
7	48	48	-48	-48	-48	-48	48	48	15,36	15,36	15,36
8	38,4	-38,4	-38,4	-38,4	38,4	38,4	38,4	-38,4	12,29	12,29	12,29
9	51,8	87,13	0	0	0	0	0	0	111,37	-35,22	-35,22
10	44,6	0	75,02	0	0	0	0	0	-30,33	95,89	-30,33
11	43,5	0	0	73,17	0	0	0	0	-29,58	-29,58	93,53
12	36,2	-60,89	0	0	0	0	0	0	77,83	-24,62	-24,62
13	42,7	0	-71,82	0	0	0	0	0	-29,04	91,81	-29,04
14	43,3	0	0	-72,83	0	0	0	0	-29,44	-29,44	93,1
15	43,4	0	0	0	0	0	0	0	-29,51	-29,51	-29,51
16	43,7	0	0	0	0	0	0	0	-29,72	-29,72	-29,72
17	43,6	0	0	0	0	0	0	0	-29,65	-29,65	-29,65
18	43,5	0	0	0	0	0	0	0	-29,58	-29,58	-29,58
19	43,8	0	0	0	0	0	0	0	-29,78	-29,78	-29,78
20	43,6	0	0	0	0	0	0	0	-29,65	-29,65	-29,65

Сумма	873,9	64,04	7,6	0,54	-0,4	-0,2	0	0	4,98	3,01	1,59
-------	-------	-------	-----	------	------	------	---	---	------	------	------

Таблица 3.6 – Величина квадратов кодированных значений факторов

№ опыта	Квадраты факторов										
	$(X_0)^2$	$(X_1)^2$	$(X_2)^2$	$(X_3)^2$	$(X_{12})^2$	$(X_{13})^2$	$(X_{23})^2$	$(X_{123})^2$	$(X'_{11})^2$	$(X'_{22})^2$	$(X'_{33})^2$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
9	1	2,83	0	0	0	0	0	0	4,62	0,46	0,46
10	1	0	2,83	0	0	0	0	0	0,46	4,62	0,46
11	1	0	0	2,83	0	0	0	0	0,46	0,46	4,62
12	1	2,83	0	0	0	0	0	0	4,62	0,46	0,46
13	1	0	2,83	0	0	0	0	0	0,46	4,62	0,46
14	1	0	0	2,83	0	0	0	0	0,46	0,46	4,62
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
Сумма	20	13,66	13,66	13,66	8	8	8	8	14,64	14,64	14,64

Рассчитаем оценки коэффициентов уравнения регрессии, используя полученные значения в строках «Сумма» таблиц 3.5 и 3.6.

$$b_0 = 873,9 / 20 = 43,695, \quad (3.10)$$

$$b_1 = 64,04 / 13,66 = 4,688, \quad (3.11)$$

$$b_2 = 7,6 / 13,66 = 0,556, \quad (3.12)$$

$$b_3 = 0,54 / 13,66 = 0,04, \quad (3.13)$$

$$b_{12} = -0,4 / 8 = -0,05, \quad (3.14)$$

$$b_{13} = -0,2 / 8 = -0,025, \quad (3.15)$$

$$b_{23} = 0 / 8 = 0, \quad (3.16)$$

$$b_{123} = 0 / 8 = 0, \quad (3.17)$$

$$b_{11}' = 4,98 / 14,64 = 0,34, \quad (3.18)$$

$$b_{22}' = 3,01 / 14,64 = 0,206, \quad (3.19)$$

$$b_{33}' = 1,59 / 14,64 = 11,09. \quad (3.20)$$

Для оценки значимости коэффициентов воспользуемся критерием Стьюдента:

$$t_i = |b_i| / S_{bi}. \quad (3.21)$$

Найдем дисперсию воспроизводимости по шести параллельным опытам в центре плана:

$$S_{восн}^2 = \frac{\sum_{i=1}^6 (Y_{0i} - \bar{Y}_0)^2}{6-1} = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^6 Y_{0i}^2 - \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 Y_{0i} \right)^2 \right], \quad (3.22)$$

$$S_{восн}^2 = \frac{1}{5} \cdot \left[43,4^2 + 43,7^2 + 43,6^2 + 43,5^2 + 43,8^2 + 43,6^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{6} (43,4 + 43,7 + 43,6 + 43,5 + 43,8 + 43,6) \right] = 0,02$$

Следующим шагом рассчитаем дисперсии и средние квадратичные отклонения для каждого из коэффициентов:

$$S_{b0}^2 = 0,02 / 20 = 0,001, \quad (3.23)$$

$$S_{b0} = \sqrt{0,001} = 0,0316. \quad (3.24)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Величины дисперсий и среднеквадратичных отклонений

Дисперсии	Значения	Среднеквадратичные отклонения	Значения
S_{b0}^2	0,001	S_{b0}	0,0316
S_{b1}^2	0,0015	S_{b1}	0,0383
S_{b2}^2	0,0015	S_{b2}	0,0383
S_{b3}^2	0,0015	S_{b3}	0,0383
S_{b12}^2	0,0025	S_{b12}	0,05
S_{b13}^2	0,0025	S_{b13}	0,05
S_{b23}^2	0,0025	S_{b23}	0,05
S_{b123}^2	0,0025	S_{b123}	0,05
$S_{b11'}^2$	0,0014	$S_{b11'}$	0,037
$S_{b22'}^2$	0,0014	$S_{b22'}$	0,037
$S_{b33'}^2$	0,0014	$S_{b33'}$	0,037

Рассчитаем для каждого из коэффициентов критерий Стьюдента по формуле (3.20). Полученные значения сведем в таблицу 3.8.

Таблица 3.8 – Значения критериев Стьюдента

Критерии Стьюдента	Значения
t_{b0}	1381,76
t_{b1}	122,52
t_{b2}	14,53
t_{b3}	1,05
t_{b12}	1,0
t_{b13}	0,5
t_{b23}	0,0
t_{b123}	0,0
$t_{b11'}$	9,2

$t_{b22'}$	5,57
$t_{b33'}$	2,95

Число степеней свободы в рассматриваемом случае равно 5. Зададимся уровнем значимости, равным 0,05. Таким образом, критическое значение t -критерия Стьюдента составляет 2,57. После сопоставления его со значениями, приведенными в таблице 3.8, было выявлено, что значимыми коэффициентами уравнения регрессии являются $b_0, b_1, b_2, b_{11'}, b_{22'}, b_{33'}$.

Полученная регрессионная зависимость выглядит следующим образом:
 $Y' = 43,695 + 4,688 \cdot X_1 + 0,556 \cdot X_2 + 0,34 \cdot X_{11}' + 0,206 \cdot X_{22}' + 0,109 \cdot X_{33}'$. (3.25)

Значения отклика, рассчитанные с помощью данной зависимости Y'_j , внесены в таблицу 3.2. Поскольку количество значимых коэффициентов уравнения регрессии равно шести, то для расчета дисперсии адекватности воспользуемся следующим выражением:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{20} (Y_j - Y_j')^2}{20 - 6}, \quad (3.26)$$

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{14} [(49 - 49,15)^2 + (39,7 - 39,77)^2 + (48 - 48,04)^2 + (38,5 - 38,66)^2 + \\ + (49 - 49,15)^2 + (39,6 - 39,77)^2 + (48 - 48,04)^2 + (38,4 - 38,66)^2 + \\ + (51,8 - 52,1)^2 + (44,6 - 44,77)^2 + (43,5 - 43,56)^2 + (36,2 - 36,33)^2 + \\ + (42,7 - 42,9)^2 + (43,3 - 43,56)^2 + (43,4 - 43,25)^2 + (43,7 - 43,25)^2 + \\ + (43,6 - 43,25)^2 + (43,5 - 43,25)^2 + (43,8 - 43,25)^2 + (43,6 - 43,25)^2] = 0,0898$$

Адекватность уравнения регрессии проверим по критерию Фишера:

$$F = S_{ad}^2 / S_{восн}^2 = 0,0898 / 0,02 = 4,49. \quad (3.27)$$

Теоретическое значение критерия Фишера для вероятности 0,05 составляет $F_{теор} = 4,64$. Расчетное значение критерия оказалось меньше, поэтому полученное регрессионное уравнение является адекватным и путем замены ранее введенных соотношений для $X_{11}' \approx X_1^2 - 0,68$, $X_{22}' \approx X_2^2 - 0,68$ и $X_{33}' \approx X_3^2 - 0,68$ принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
Y' &= 43,695 + 4,688 \cdot X_1 + 0,556 \cdot X_2 + 0,34 \cdot (X_1^2 - 0,68) + 0,206 \cdot (X_2^2 - 0,68) + \\
&+ 0,109 \cdot (X_3^2 - 0,68) = (43,695 - 0,34 \cdot 0,68 - 0,206 \cdot 0,68 - 0,109 \cdot 0,68) + \\
&+ 4,688 \cdot X_1 + 0,556 \cdot X_2 + 0,34 \cdot X_1^2 + 0,206 \cdot X_2^2 + 0,109 \cdot X_3^2 = \\
&= 43,25 + 4,688 \cdot X_1 + 0,556 \cdot X_2 + 0,34 \cdot X_1^2 + 0,206 \cdot X_2^2 + 0,109 \cdot X_3^2 \\
Y' &= 43,25 + 4,688 \cdot X_1 + 0,556 \cdot X_2 + 0,34 \cdot X_1^2 + 0,206 \cdot X_2^2 + 0,109 \cdot X_3^2. \quad (3.28)
\end{aligned}$$

Подставим в полученное уравнение (3.28) натуральные величины.
Регрессионное уравнение примет следующий вид:

$$t_{\text{вых}} = 43,25 + 4,688 \cdot t'_{\text{вх}} + 0,556 \cdot G' + 0,34 \cdot t'^2_{\text{вх}} + 0,206 \cdot G'^2 + 0,109 \cdot d'^2, \quad (3.29)$$

где $t'_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя на входе в блок в долях от исследуемого диапазона;

G' – массовый расход теплоносителя в долях от исследуемого диапазона;

d' – диаметр капиллярных трубок в долях от исследуемого диапазона.

Для перевода дольного выражения величин температуры теплоносителя на входе в блок, массового расхода теплоносителя и диаметра капиллярных трубок в натуральные величины и наоборот представлены соответствующие диаграммы на рисунках 3.8-3.10.

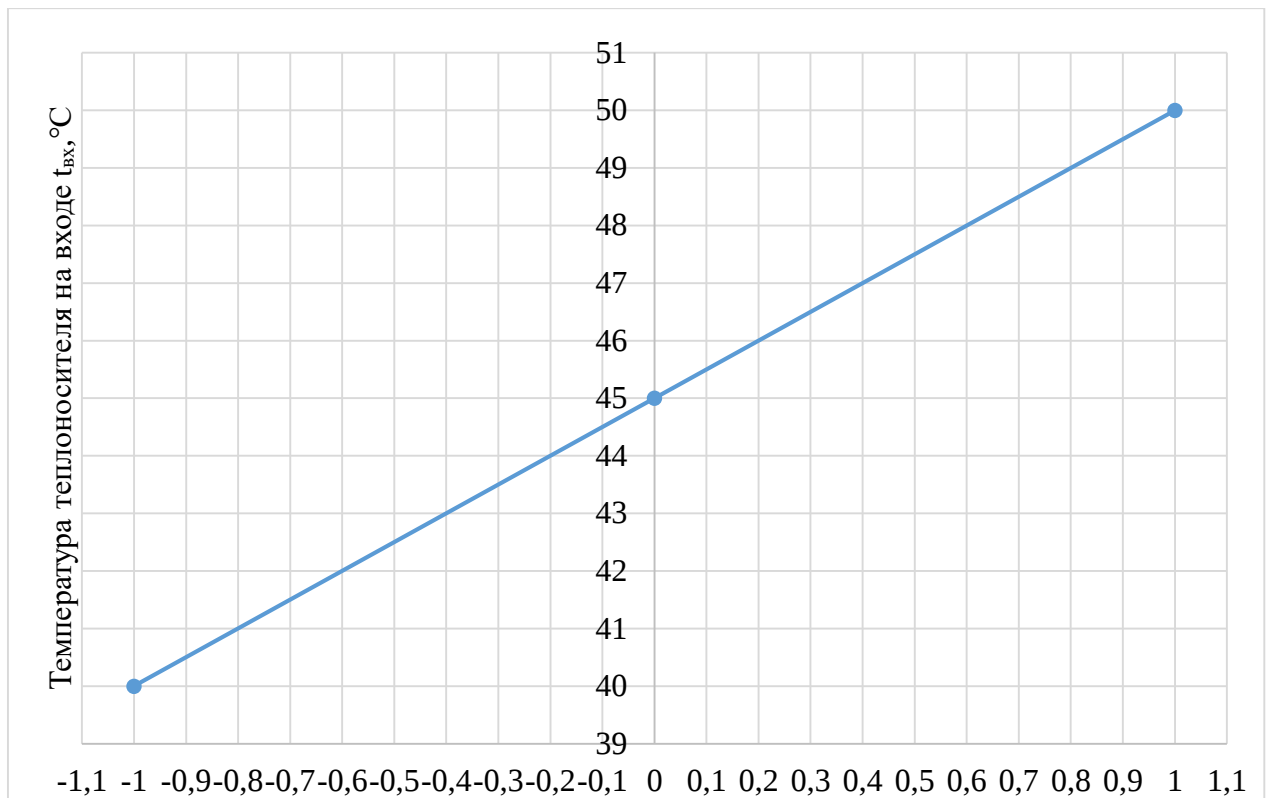


Рисунок 3.8 – Определение дольного выражения величины температуры теплоносителя на входе $t'_{вх}$

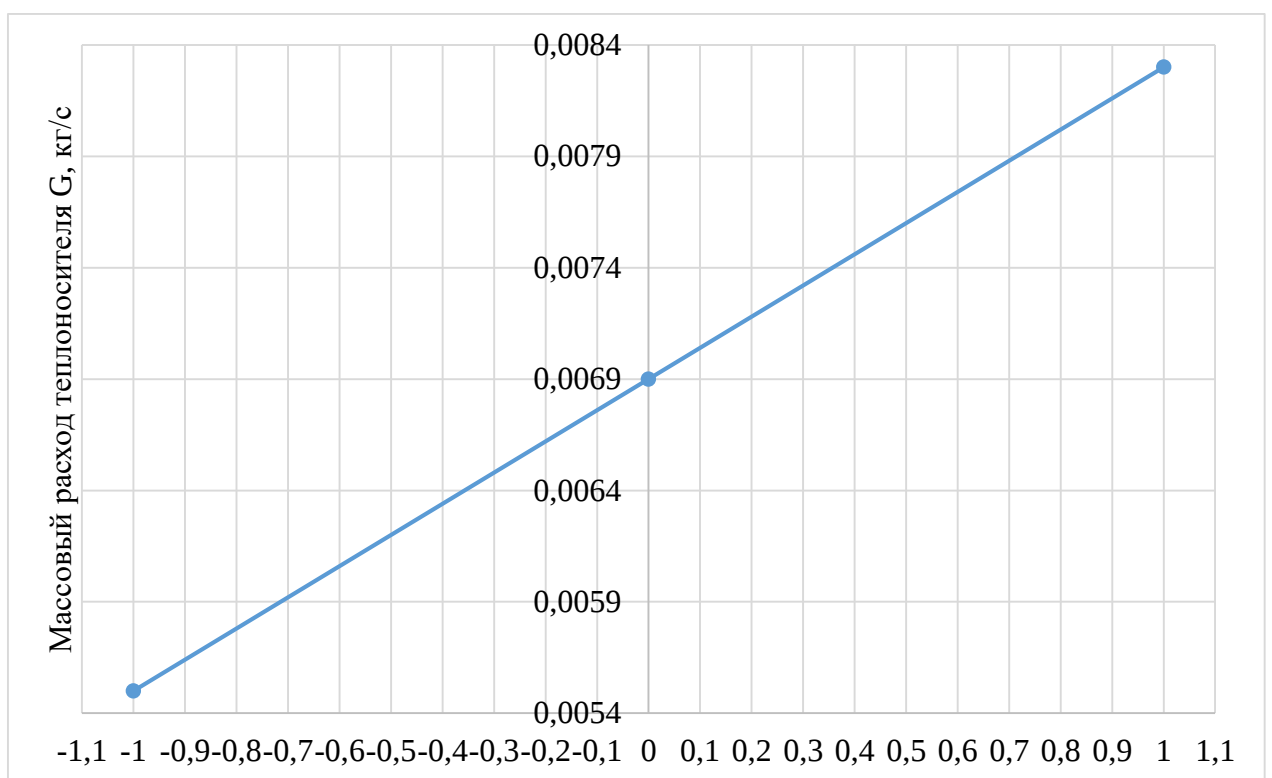


Рисунок 3.9 – Определение дольного выражения величины массового расхода теплоносителя G'

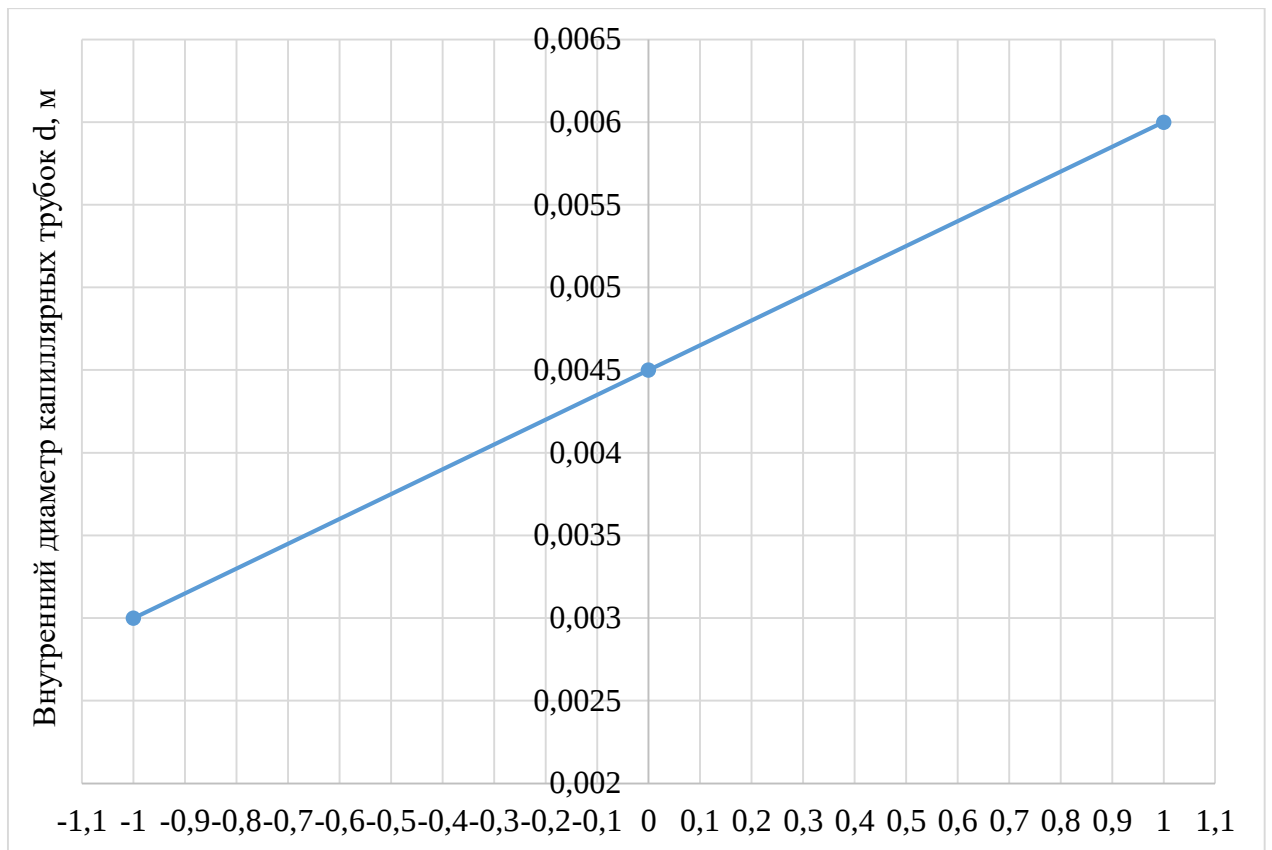


Рисунок 3.10 – Определение долевого выражения величины внутреннего диаметра капиллярных трубок d'

По полученному уравнению регрессии (3.29) построим графики зависимости температуры теплоносителя на выходе из блока с капиллярными трубками $t_{вых}$ от температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$, массового расхода теплоносителя G и диаметра капиллярных трубок d . Графики построим в относительных единицах. В качестве базисных величин для температуры, массового расхода и диаметра капиллярных трубок примем средние значения исследуемых диапазонов $t_0 = 45\text{ °C}$; $G_0 = 0,0069\text{ кг/с}$; $d_0 = 0,0045\text{ м}$. На рисунке 3.11 представлены графики зависимости температуры теплоносителя на выходе $t_{вых}$ от температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ при диаметре капиллярных трубок $d = 0,0045\text{ м}$.

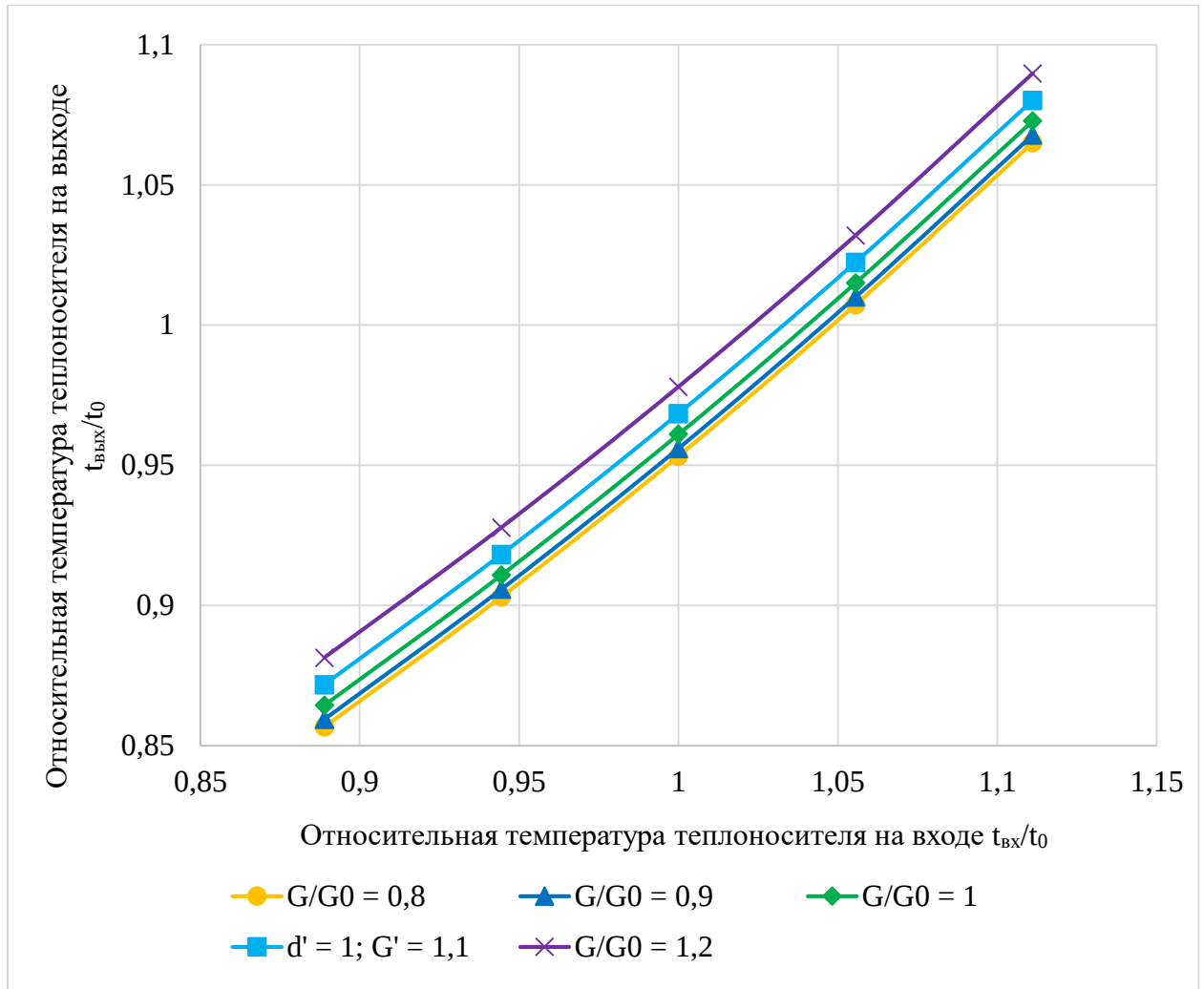


Рисунок 3.11 – График температуры теплоносителя на выходе из блока с капиллярными трубками $t_{\text{вых}}$ в зависимости от температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ при диаметре капиллярных трубок $d = 0,0045$ м в относительных единицах

На рисунке 3.12 представлены совмещенные графики зависимости температуры теплоносителя на выходе $t_{\text{вых}}$ от температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ при различных значениях G и d в относительных единицах.

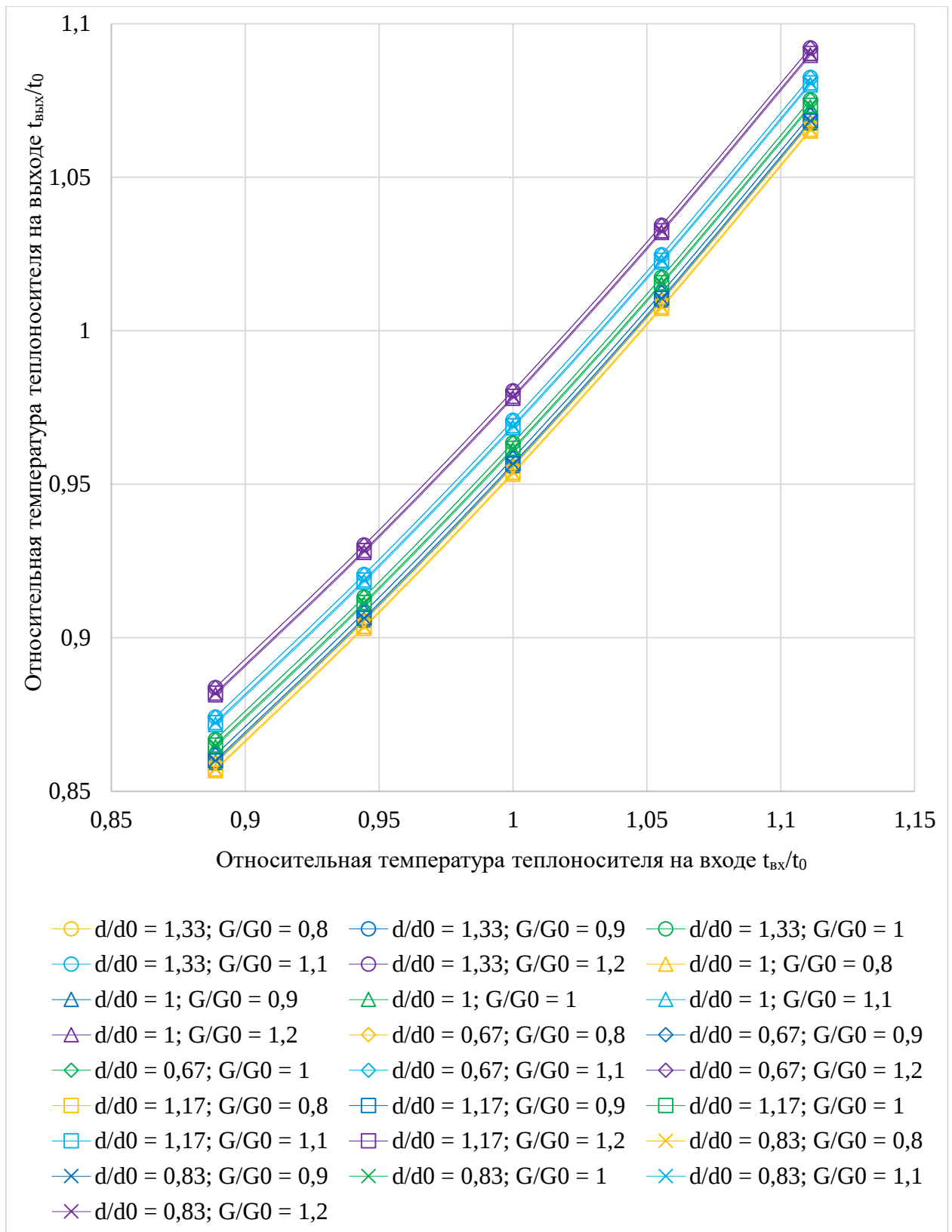


Рисунок 3.12 – График температуры теплоносителя на выходе из блока с капиллярными трубками $t_{\text{вых}}$ в зависимости от температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ в относительных единицах

Полученные графики показывают, что с увеличением температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ происходит интенсивное увеличение температуры теплоносителя на выходе $t_{\text{вых}}$. При этом изменение диаметра капиллярных трубок d оказывает незначительное влияние на температуру теплоносителя на выходе $t_{\text{вых}}$ [108].

Для более полного анализа полученного уравнения регрессии (3.29) построим графики зависимости температуры теплоносителя на выходе $t_{\text{вых}}$ от массового расхода теплоносителя G при различных значениях $t_{\text{вх}}$ и d в относительных величинах. На рисунке 3.13 представлены графики зависимости при постоянном значении $d = 0,0045$ м. На рисунке 3.14 представлены совмещенные графики при различных значениях $t_{\text{вх}}$ и d .

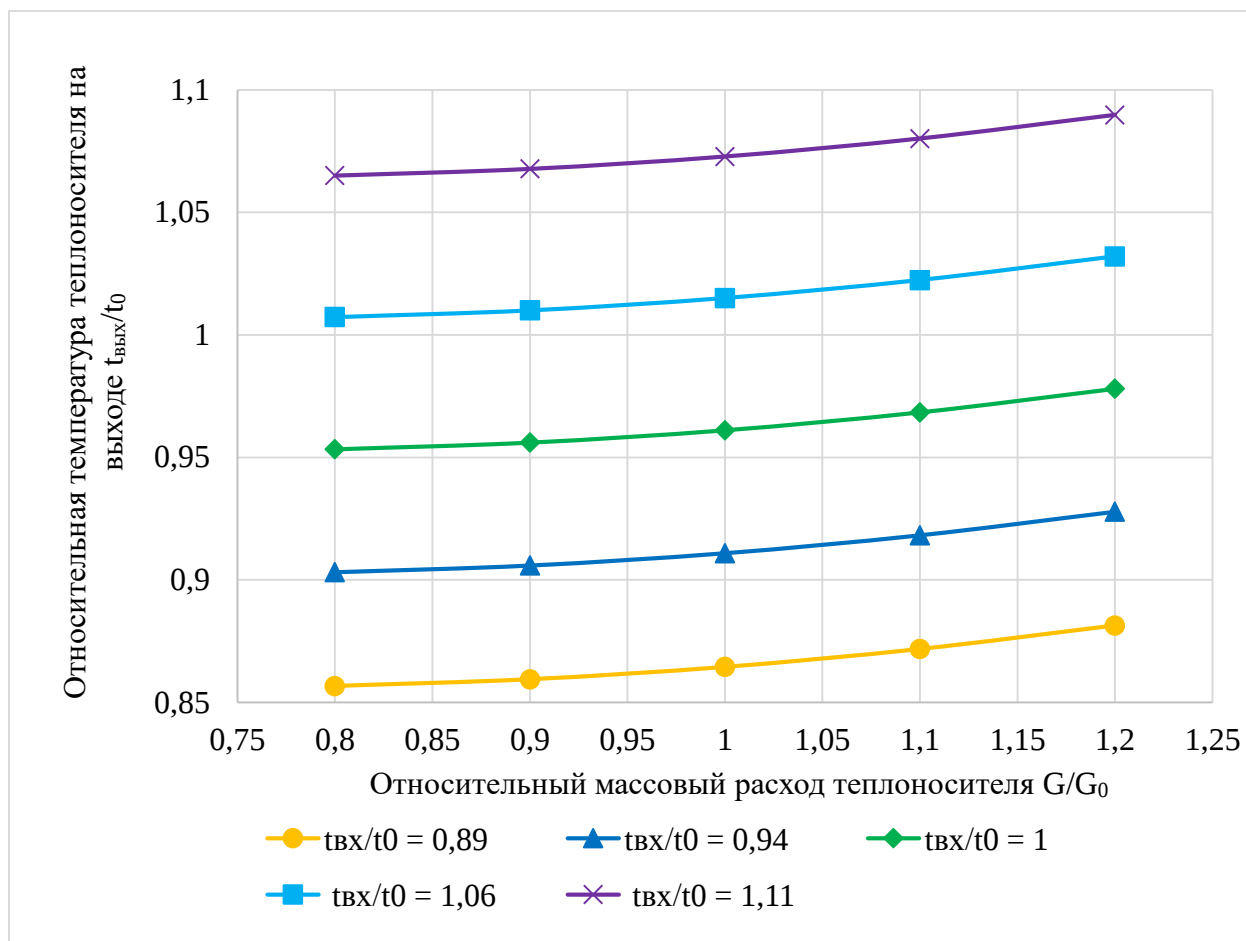


Рисунок 3.13 – График температуры теплоносителя на выходе из блока с капиллярными трубками $t_{\text{вых}}$ в зависимости от массового расхода теплоносителя G' при диаметре капиллярных трубок $d = 0,0045$ м в относительных единицах

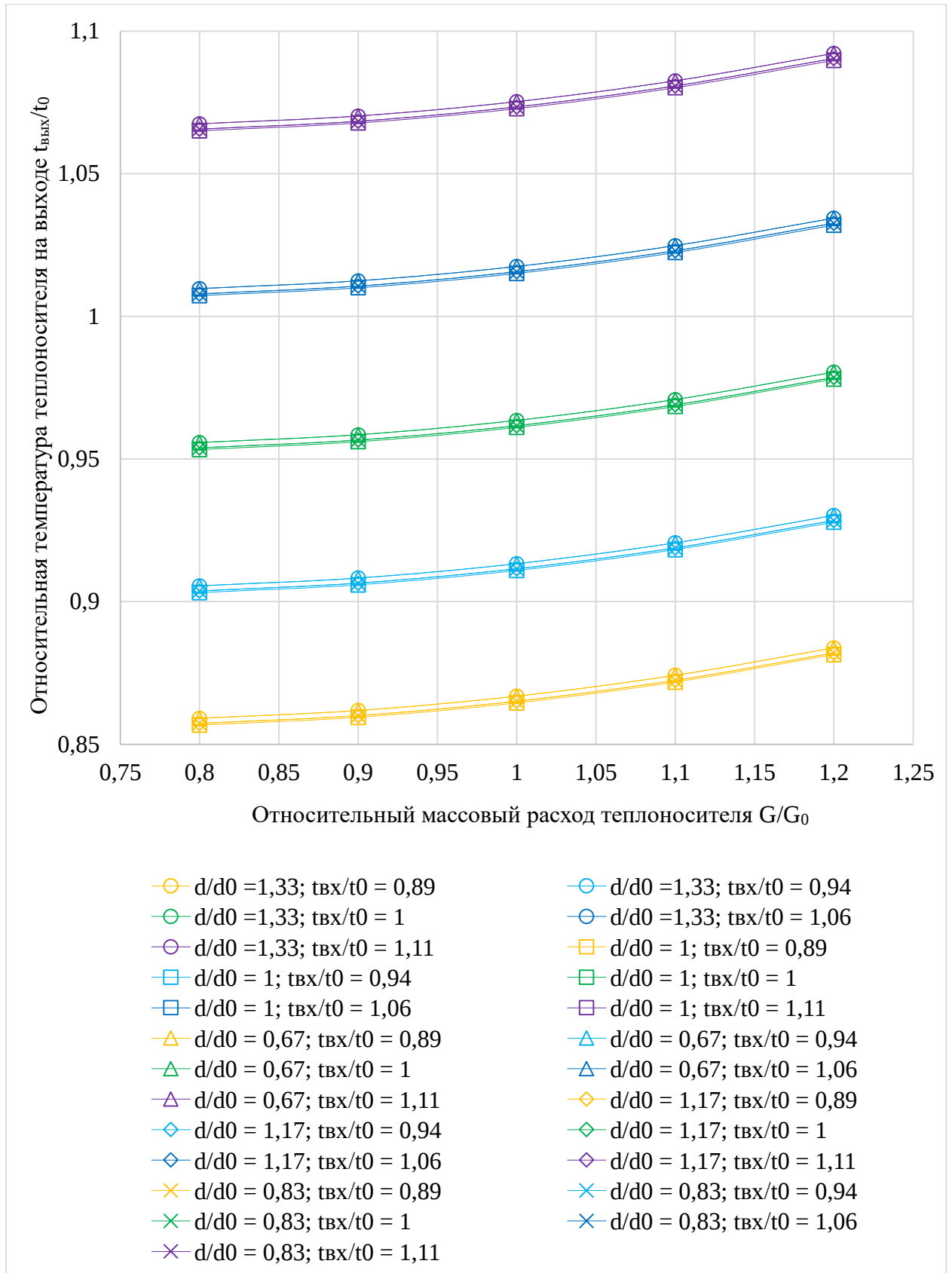


Рисунок 3.14 – График температуры теплоносителя на выходе из блока с капиллярными трубками $t_{\text{вых}}$ в зависимости от массового расхода теплоносителя G в относительных величинах

Анализируя данные графики, можно заметить, что увеличение массового расхода теплоносителя G также приводит к росту температуры теплоносителя на выходе $t_{вых}$. Изменение нелинейное, однако функция однозначна для всего измеряемого диапазона. Интенсивность увеличения возрастает по мере повышения массового расхода G . Данное увеличение менее интенсивно по сравнению с ростом температуры теплоносителя на выходе $t_{вых}$ с повышением температуры на входе $t_{вх}$, однако сохраняется параболическая зависимость. При этом сгруппированность графиков по диаметрам объясняется изменением температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$. Также подтверждается вывод, сделанный ранее, о том, что изменение диаметра капиллярных трубок d практически не влияет на температуру теплоносителя на выходе $t_{вых}$ [108].

Используя полученное регрессионное уравнение, построим графики зависимости снижения температуры теплоносителя Δt от температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ и массового расхода теплоносителя G . Полученные графики представлены на рисунках 3.15 и 3.16.

После анализа данных зависимостей был сделан вывод, что максимальное снижение температуры теплоносителя, а, следовательно, максимальная теплоотдача, происходит при входном значении температуры $t_{вх}$ равном 1,05, что соответствует 47 °С. Увеличение массового расхода теплоносителя G приводит к снижению разницы температур на входе и выходе. При этом можно заметить увеличение разрыва между группами графиков с увеличением массового расхода теплоносителя. Это объясняется тем, что при увеличении массового расхода теплоносителя происходит его «проскок» через экспериментальный блок и теплоноситель не успевает отдать свое тепло [108].

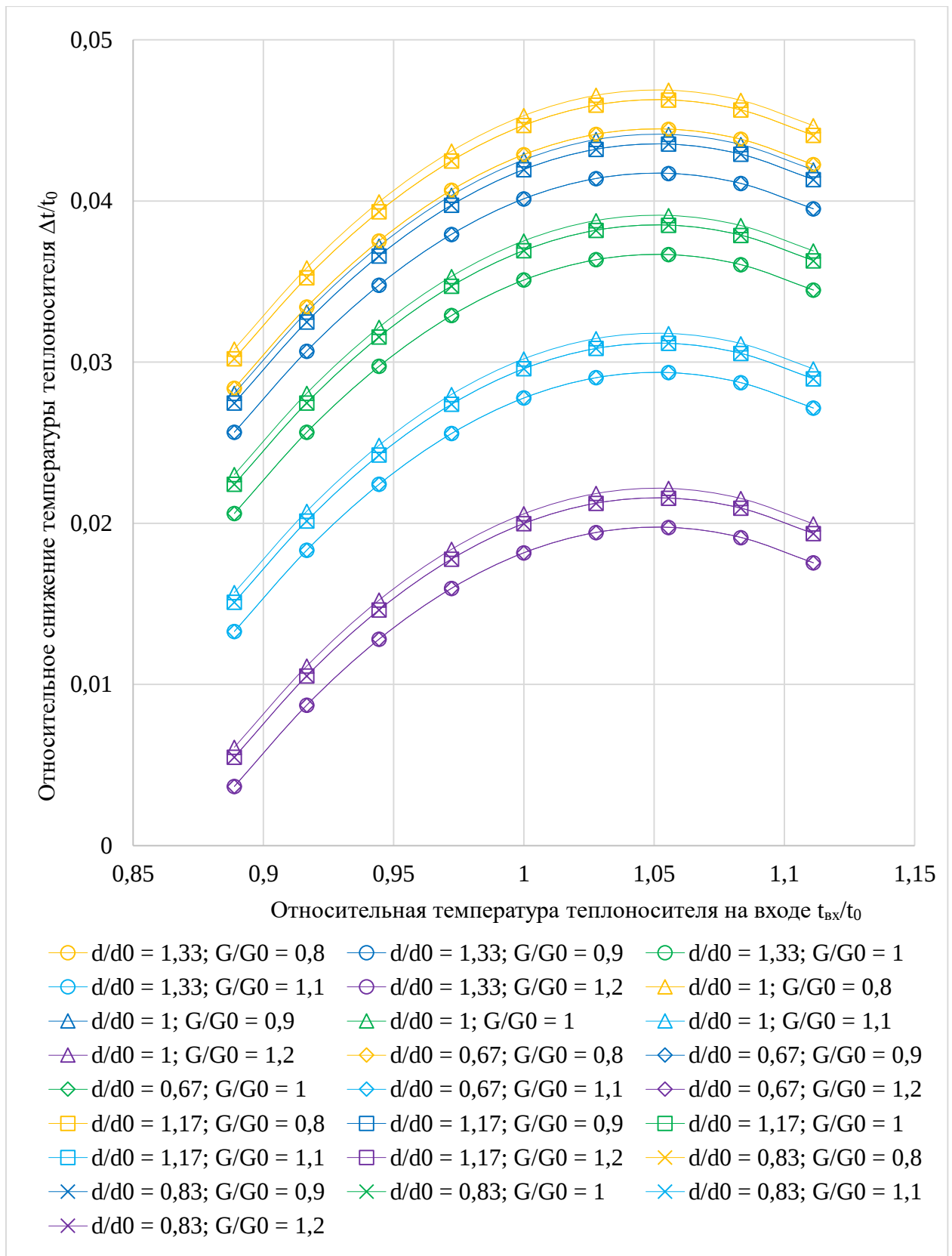


Рисунок 3.15 – График изменения температуры теплоносителя Δt в зависимости от температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$, массового расхода теплоносителя G и диаметра капиллярных трубок d в относительных единицах

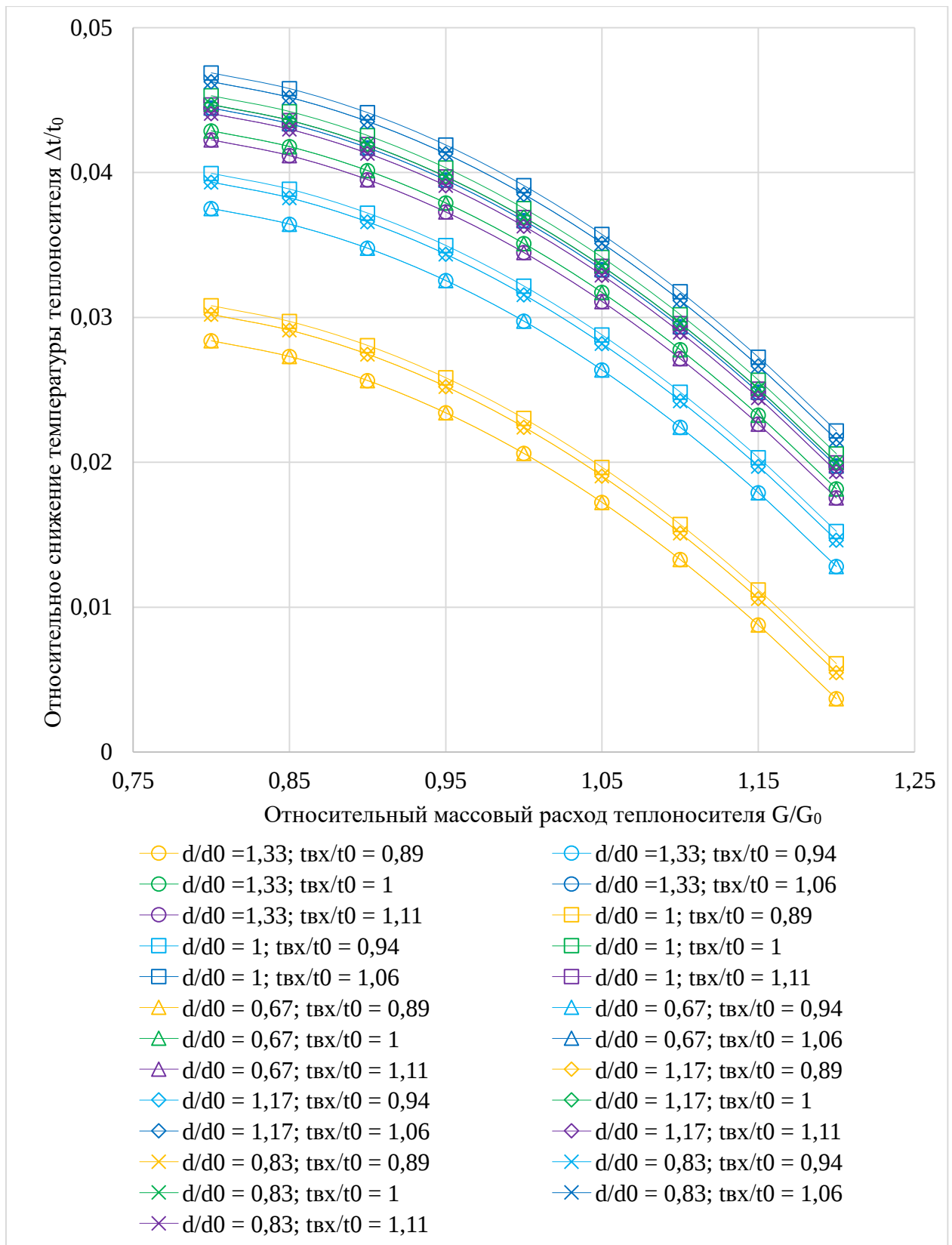


Рисунок 3.16 – График изменения температуры теплоносителя Δt в зависимости от массового расхода теплоносителя G , температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ и диаметра капиллярных трубок d в относительных единицах

3.3 Экспериментальное исследование изменения средней температуры поверхности блока предложенной конструкции

Целью исследования является получение с помощью теории планирования эксперимента зависимости изменения средней температуры на поверхности экспериментального блока при изменении температуры теплоносителя на входе, массового расхода теплоносителя и диаметра капиллярных трубок.

Постоянные и варьируемые параметры приняты аналогично исследованию изменения температуры теплоносителя на выходе, описанному в пункте 3.2 [109].

В таблице 3.9 приведены результаты измерений температуры на поверхности блока с помощью выносных датчиков температуры, схема расположения которых показана на рисунке 3.4.

Таблица 3.9 – Значения температуры на поверхности блока

№ опыта	Измеренные значения температуры									$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{max}, ^\circ\text{C}$
	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$t_5, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$t_7, ^\circ\text{C}$	$t_8, ^\circ\text{C}$	$t_9, ^\circ\text{C}$		
1	27,3	27,5	26,9	27,6	29,1	27,6	26,9	27,4	27,2	27,5	2,2
2	25,7	26	25,5	26,2	27,2	26,2	25,4	26	25,7	26	1,8
3	26,7	26,8	26,5	26,9	28,6	26,9	26,5	26,7	26,6	26,9	2,1
4	25,2	25,5	24,9	25,7	26,8	25,5	25	25,5	25,2	25,5	1,9
5	27,3	27,6	26,8	27,6	29,2	27,6	26,8	27,5	27,2	27,5	2,4
6	25,8	26	25,6	26,2	27,3	26,2	25,5	26	25,7	26	1,8
7	26,8	26,8	26,5	26,8	28,6	27	26,5	26,7	26,6	26,9	2,1
8	25,3	25,4	24,9	25,6	26,9	25,6	25	25,4	25,2	25,5	2
9	27,9	28,7	27,7	28,8	29,8	28,8	27,5	28,6	27,8	28,4	2,3
10	26,8	27,2	26,7	27,3	28,7	27,3	26,6	27,1	26,9	27,2	2,1

11	26	26,4	25,7	26,5	27,5	26,5	25,8	26,3	25,9	26,3	1,8
12	24,5	25	24,5	25,5	26,3	25,5	24,4	25,1	24,6	25	1,9
13	25,1	25,4	25	25,8	26,8	25,7	25	25,6	25	25,5	1,8
14	25,9	26,2	25,7	26,4	27,6	26,3	25,7	26,3	25,9	26,2	1,9
15	26,1	26,6	25,9	26,8	27,9	26,7	25,8	26,5	26,1	26,5	2,1
16	26,1	26,4	25,8	26,7	27,8	26,6	25,9	26,3	26	26,4	2
17	26,2	26,4	25,9	26,7	27,9	26,7	26	26,5	26,1	26,5	2
18	26,3	26,3	25,8	26,6	27,8	26,5	25,7	26,4	26,1	26,4	2,1
19	26	26,4	25,8	26,5	27,6	26,6	25,7	26,3	25,9	26,3	1,9
20	25,9	26,1	25,8	26,4	27,6	26,3	25,7	26	25,9	26,2	1,9

Для планирования эксперимента был составлен ротатабельный план второго порядка [110, 111, 112]. Число варьируемых факторов составляет $k = 3$. Величина звездного плеча определяется соотношением (3.30):

$$\alpha = 2^{\frac{k-p}{4}} = 2^{\frac{3-0}{4}} = 1,682, \quad (3.30)$$

где $k = 3$ – количество варьируемых факторов;

$p = 0$ – дробная реплика для полного факторного эксперимента.

Полученная матрица ротатабельного планирования второго порядка приведена в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Матрица ротатабельного плана второго порядка

	№ опыта	Факторы (кодированные значения)			Факторы (натуральные значения)			Отклик
		X_1	X_2	X_3	$X_1 (t_{ex}),$ °C	$X_2 (G),$ кг/с	$X_3 (d),$ м	
Ядро плана	1	1	1	1	50	0,0083	0,006	27,5
	2	-1	1	1	40	0,0083	0,006	26
	3	1	-1	1	50	0,0055	0,006	26,9

	4	-1	-1	1	40	0,0055	0,006	25,5
	5	1	1	-1	50	0,0083	0,003	27,5
	6	-1	1	-1	40	0,0083	0,003	26
	7	1	-1	-1	50	0,0055	0,003	26,9
	8	-1	-1	-1	40	0,0055	0,003	25,5
Звездные точки	9	$\alpha=+1,682$	0	0	53,41	0,0069	0,0045	28,4
	10	0	$\alpha=+1,682$	0	45	0,0093	0,0045	27,2
	11	0	0	$\alpha=+1,682$	45	0,0069	0,007	26,3
	12	$\alpha=-1,682$	0	0	36,59	0,0069	0,0045	25
	13	0	$\alpha=-1,682$	0	45	0,0045	0,0045	25,5
	14	0	0	$\alpha=-1,682$	45	0,0069	0,002	26,2
Центр плана	15	0	0	0	45	0,0069	0,0045	26,5
	16	0	0	0	45	0,0069	0,0045	26,4
	17	0	0	0	45	0,0069	0,0045	26,5
	18	0	0	0	45	0,0069	0,0045	26,4
	19	0	0	0	45	0,0069	0,0045	26,3
	20	0	0	0	45	0,0069	0,0045	26,2

Для получения регрессионной зависимости воспользуемся методикой, приведенной в [110, 111, 113, 114].

Добавим фиктивный столбец $X_0 = 1$, а также дополнительные столбцы $X_{12} = X_1 \cdot X_2$, $X_{13} = X_1 \cdot X_3$, $X_{23} = X_2 \cdot X_3$, $X_{123} = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ в исходную матрицу (таблица 3.10) плана.

$$X_{1j}' = X_{1j}^2 - \frac{\sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2}{20}, \quad (3.31)$$

$$X_{2j}' = X_{2j}^2 - \frac{\sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2}{20}, \quad (3.32)$$

$$X_{3j}' = X_{3j}^2 - \frac{\sum_{j=1}^{20} X_{3j}^2}{20}, \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 = \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2 = \sum_{j=1}^{20} X_{3j}^2 = & (+1)^2 + (-1)^2 + (+1)^2 + (-1)^2 + \\ & + (+1)^2 + (-1)^2 + (+1)^2 + (-1)^2 + (+1,682)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (-1,682)^2 +, \\ & + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0)^2 = 13,66 \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$X_{1j}' = X_{1j}^2 - \frac{13,66}{20} \approx X_{1j}^2 - 0,68, \quad (3.35)$$

$$X_{2j}' = X_{2j}^2 - \frac{13,66}{20} \approx X_{2j}^2 - 0,68, \quad (3.36)$$

$$X_{3j}' = X_{3j}^2 - \frac{13,66}{20} \approx X_{3j}^2 - 0,68. \quad (3.37)$$

Дополним начальную матрицу вновь принятыми и рассчитанными значениями. Также добавим в нее значения отклика Y'_j , °C, рассчитанные с помощью выведенной регрессионной зависимости. Ход ее получения приведен ниже. Преобразованная матрица плана эксперимента представлена в таблицах 3.11 и 3.12.

Таблица 3.11 – Матрица ротатабельного плана второго порядка в кодированных значениях (начало)

	№ опыта	Факторы							
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_{12}	X_{13}	X_{23}	X_{123}
Ядро плана	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
	3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
	4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
	5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
	6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
	7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
	8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1

Звездные точки	9	1	$\alpha=+1,682$	0	0	0	0	0	0
	10	1	0	$\alpha=+1,682$	0	0	0	0	0
	11	1	0	0	$\alpha=+1,682$	0	0	0	0
	12	1	$\alpha=-1,682$	0	0	0	0	0	0
	13	1	0	$\alpha=-1,682$	0	0	0	0	0
	14	1	0	0	$\alpha=-1,682$	0	0	0	0
Центр плана	15	1	0	0	0	0	0	0	0
	16	1	0	0	0	0	0	0	0
	17	1	0	0	0	0	0	0	0
	18	1	0	0	0	0	0	0	0
	19	1	0	0	0	0	0	0	0
	20	1	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3.12 – Матрица ротатабельного плана второго порядка в кодированных значениях (окончание)

	№ опыта	Факторы			Отклик	
		X_{11}	X_{22}	X_{33}	$Y_j, ^\circ\text{C}$	$Y_j, ^\circ\text{C}$
Ядро плана	1	0,32	0,32	0,32	27,5	27,75
	2	0,32	0,32	0,32	26	26,07
	3	0,32	0,32	0,32	26,9	27,01
	4	0,32	0,32	0,32	25,5	25,33
	5	0,32	0,32	0,32	27,5	27,75
	6	0,32	0,32	0,32	26	26,07
	7	0,32	0,32	0,32	26,9	27,01
	8	0,32	0,32	0,32	25,5	25,33
Звездные точки	9	2,15	-0,68	-0,68	28,4	28,29
	10	-0,68	2,15	-0,68	27,2	27,11

	11	-0,68	-0,68	2,15	26,3	26,21
	12	2,15	-0,68	-0,68	25	25,45
	13	-0,68	2,15	-0,68	25,5	25,86
	14	-0,68	-0,68	2,15	26,2	26,21
Центр плана	15	-0,68	-0,68	-0,68	26,5	26,21
	16	-0,68	-0,68	-0,68	26,4	26,21
	17	-0,68	-0,68	-0,68	26,5	26,21
	18	-0,68	-0,68	-0,68	26,4	26,21
	19	-0,68	-0,68	-0,68	26,3	26,21
	20	-0,68	-0,68	-0,68	26,2	26,21

Произведем промежуточные преобразования полученной матрицы для определения коэффициентов уравнения регрессии (3.8). В результате получим матрицу, представленную в таблицах 3.13 и 3.14.

$$Y_j' = b_0' + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_{12} + b_{13} \cdot X_{13} + b_{23} \cdot X_{23} + b_{123} \cdot X_{123} + b_{11}' \cdot X_{11}' + b_{22}' \cdot X_{22}' + b_{33}' \cdot X_{33}' \quad (3.38)$$

Таблица 3.13 – Произведение кодированных значений факторов на значения отклика

№ опыта	Факторы										
	$X_0 \cdot Y$	$X_1 \cdot Y$	$X_2 \cdot Y$	$X_3 \cdot Y$	$X_{12} \cdot Y$	$X_{13} \cdot Y$	$X_{23} \cdot Y$	$X_{123} \cdot Y$	$X_{11}' \cdot Y$	$X_{22}' \cdot Y$	$X_{33}' \cdot Y$
1	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	8,8	8,8	8,8
2	26	-26	26	26	-26	-26	26	-26	8,32	8,32	8,32
3	26,9	26,9	-26,9	26,9	-26,9	26,9	-26,9	-26,9	8,61	8,61	8,61
4	25,5	-25,5	-25,5	25,5	25,5	-25,5	-25,5	25,5	8,16	8,16	8,16
5	27,5	27,5	27,5	-27,5	27,5	-27,5	-27,5	-27,5	8,8	8,8	8,8
6	26	-26	26	-26	-26	26	-26	26	8,32	8,32	8,32
7	26,9	26,9	-26,9	-26,9	-26,9	-26,9	26,9	26,9	8,61	8,61	8,61

8	25,5	-25,5	-25,5	-25,5	25,5	25,5	25,5	-25,5	8,16	8,16	8,16
9	28,4	47,77	0	0	0	0	0	0	61,06	-19,31	-19,31
10	27,2	0	45,75	0	0	0	0	0	-18,5	58,48	-18,5
11	26,3	0	0	44,24	0	0	0	0	-17,88	-17,88	56,55
12	25	-42,05	0	0	0	0	0	0	53,75	-17	-17
13	25,5	0	-42,89	0	0	0	0	0	-17,34	54,83	-17,34
14	26,2	0	0	-44,07	0	0	0	0	-17,82	-17,82	56,33
15	26,5	0	0	0	0	0	0	0	-18,02	-18,02	-18,02
16	26,4	0	0	0	0	0	0	0	-17,95	-17,95	-17,95
17	26,5	0	0	0	0	0	0	0	-18,02	-18,02	-18,02
18	26,4	0	0	0	0	0	0	0	-17,95	-17,95	-17,95
19	26,3	0	0	0	0	0	0	0	-17,88	-17,88	-17,88
20	26,2	0	0	0	0	0	0	0	-17,82	-17,82	-17,82
Сумма	528,7	11,52	5,06	0,17	0,2	0	0	0	3,41	1,44	0,87

Таблица 3.14 – Величина квадратов кодированных значений факторов

№ опыта	Квадраты факторов										
	$(X_0)^2$	$(X_1)^2$	$(X_2)^2$	$(X_3)^2$	$(X_{12})^2$	$(X_{13})^2$	$(X_{23})^2$	$(X_{123})^2$	$(X'_{11})^2$	$(X'_{22})^2$	$(X'_{33})^2$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
9	1	2,83	0	0	0	0	0	0	4,62	0,46	0,46

10	1	0	2,83	0	0	0	0	0	0,46	4,62	0,46
11	1	0	0	2,83	0	0	0	0	0,46	0,46	4,62
12	1	2,83	0	0	0	0	0	0	4,62	0,46	0,46
13	1	0	2,83	0	0	0	0	0	0,46	4,62	0,46
14	1	0	0	2,83	0	0	0	0	0,46	0,46	4,62
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,46	0,46
Сумма	20	13,66	13,66	13,66	8	8	8	8	14,64	14,64	14,64

Рассчитаем оценки коэффициентов уравнения регрессии, используя полученные значения в строках «Сумма» таблиц 3.13 и 3.14.

$$b_0 = 528,7 / 20 = 26,435, \quad (3.39)$$

$$b_1 = 11,52 / 13,66 = 0,843, \quad (3.40)$$

$$b_2 = 5,06 / 13,66 = 0,37, \quad (3.41)$$

$$b_3 = 0,17 / 13,66 = 0,012, \quad (3.42)$$

$$b_{12} = 0,2 / 8 = 0,025, \quad (3.43)$$

$$b_{13} = 0 / 8 = 0, \quad (3.44)$$

$$b_{23} = 0 / 8 = 0, \quad (3.45)$$

$$b_{123} = 0 / 8 = 0, \quad (3.46)$$

$$b_{11}' = 3,41 / 14,64 = 0,233, \quad (3.47)$$

$$b_{22}' = 1,44 / 14,64 = 0,098, \quad (3.48)$$

$$b_{33}' = 0,87 / 14,64 = 0,059. \quad (3.49)$$

Для оценки значимости коэффициентов воспользуемся критерием Стьюдента (3.21).

Найдем дисперсию воспроизводимости по шести параллельным опытам в центре плана:

$$S_{\text{восн}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^6 (Y_{0i} - \bar{Y}_0)^2}{6-1} = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^6 Y_{0i}^2 - \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 Y_{0i} \right)^2 \right], \quad (3.50)$$

$$S_{\text{восн}}^2 = \frac{1}{5} \cdot \left[26,5^2 + 26,4^2 + 26,5^2 + 26,4^2 + 26,3^2 + 26,2^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{6} (26,5 + 26,4 + 26,5 + 26,4 + 26,3 + 26,2) \right] = 0,0137$$

Рассчитаем дисперсии и средние квадратичные отклонения для каждого из коэффициентов. Результаты расчетов представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Величины дисперсий и среднеквадратичных отклонений

Дисперсии	Значения	Среднеквадратичные отклонения	Значения
$S_{b_0}^2$	0,0007	S_{b_0}	0,0261
$S_{b_1}^2$	0,001	S_{b_1}	0,0316
$S_{b_2}^2$	0,001	S_{b_2}	0,0316
$S_{b_3}^2$	0,001	S_{b_3}	0,0316
$S_{b_{12}}^2$	0,0017	$S_{b_{12}}$	0,0413
$S_{b_{13}}^2$	0,0017	$S_{b_{13}}$	0,0413
$S_{b_{23}}^2$	0,0017	$S_{b_{23}}$	0,0413
$S_{b_{123}}^2$	0,0017	$S_{b_{123}}$	0,0413
$S_{b_{11'}}^2$	0,0009	$S_{b_{11'}}$	0,0306
$S_{b_{22'}}^2$	0,0009	$S_{b_{22'}}$	0,0306
$S_{b_{33'}}^2$	0,0009	$S_{b_{33'}}$	0,0306

Рассчитаем для каждого из коэффициентов критерий Стьюдента по формуле (3.21). Полученные значения сведем в таблицу 3.16.

Таблица 3.16 – Значения критериев Стьюдента

Критерии Стьюдента	Значения
t_{b0}	1011,26
t_{b1}	26,65
t_{b2}	11,7
t_{b3}	0,38
t_{b12}	0,6
t_{b13}	0,0
t_{b23}	0,0
t_{b123}	0,0
$t_{b11'}$	7,63
$t_{b22'}$	3,21
$t_{b33'}$	1,93

Число степеней свободы в рассматриваемом случае равно 5. Зададимся уровнем значимости, равным 0,05. Таким образом, критическое значение t -критерия Стьюдента составляет 2,57. После сопоставления его со значениями, приведенными в таблице 3.12, было выявлено, что значимыми коэффициентами уравнения регрессии являются $b_0, b_1, b_2, b_{11'}, b_{22'}$.

Полученная регрессионная зависимость выглядит следующим образом:

$$Y' = 26,435 + 0,843 \cdot X_1 + 0,37 \cdot X_2 + 0,233 \cdot X_{11'} + 0,098 \cdot X_{22'}. \quad (3.51)$$

Значения отклика, рассчитанные с помощью данной зависимости Y'_j , внесены в таблицу 3.12. Поскольку количество значимых коэффициентов уравнения регрессии равно пяти, то для расчета дисперсии адекватности воспользуемся следующим выражением:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{20} (Y_j - Y_j')^2}{20 - 5}, \quad (3.52)$$

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{15} [(27,5 - 27,75)^2 + (26 - 26,07)^2 + (26,9 - 27,01)^2 + (25,5 - 25,33)^2 + \\ + (27,5 - 27,75)^2 + (26 - 26,07)^2 + (26,9 - 27,01)^2 + (25,5 - 25,33)^2 + \\ + (28,4 - 28,29)^2 + (27,2 - 27,11)^2 + (26,3 - 26,21)^2 + (25 - 25,45)^2 + \\ + (25,5 - 25,86)^2 + (26,2 - 26,21)^2 + (26,5 - 26,21)^2 + (26,4 - 26,21)^2 + \\ + (26,5 - 26,21)^2 + (26,4 - 26,21)^2 + (26,3 - 26,21)^2 + (26,2 - 26,21)^2] = 0,055$$

Адекватность уравнения регрессии проверим по критерию Фишера:

$$F = S_{ad}^2 / S_{бocн}^2 = 0,055 / 0,0137 = 4,029. \quad (3.53)$$

Теоретическое значение критерия Фишера для вероятности 0,05 составляет $F_{теор} = 4,62$. Расчетное значение критерия оказалось меньше, поэтому полученное регрессионное уравнение является адекватным и путем замены ранее введенных соотношений для $X_{11}' \approx X_1^2 - 0,68$, $X_{22}' \approx X_2^2 - 0,68$ и $X_{33}' \approx X_3^2 - 0,68$ принимает следующий вид:

$$Y' = 26,435 + 0,843 \cdot X_1 + 0,37 \cdot X_2 + 0,233 \cdot (X_1^2 - 0,68) + 0,098 \cdot (X_2^2 - 0,68) = \\ = (26,435 - 0,235 \cdot 0,68 - 0,098 \cdot 0,68) + 0,843 \cdot X_1 + 0,37 \cdot X_2 + 0,233 \cdot X_1^2 + \\ + 0,098 \cdot X_2^2 = 26,21 + 0,843 \cdot X_1 + 0,37 \cdot X_2 + 0,233 \cdot X_1^2 + 0,098 \cdot X_2^2 \\ Y' = 26,21 + 0,843 \cdot X_1 + 0,37 \cdot X_2 + 0,233 \cdot X_1^2 + 0,098 \cdot X_2^2. \quad (3.54)$$

Подставим в полученное уравнение (3.54) натуральные величины. Регрессионное уравнение примет следующий вид:

$$t_{нов} = 29,21 + 0,843 \cdot t'_{вх} + 0,37 \cdot G' + 0,233 \cdot t'_{вх}{}^2 + 0,098 \cdot G'^2, \quad (3.55)$$

где $t'_{вх}$ – температура теплоносителя на входе в блок в долях от исследуемого диапазона;

G' – массовый расход теплоносителя в долях от исследуемого диапазона.

Полученное регрессионное уравнение (3.55) показывает, что диаметр капиллярных трубок d не оказывает влияния на среднюю температуру поверхности $t_{нов}$ исследуемого блока [109]. Построим графики зависимости

средней температуры поверхности блока с капиллярными трубками $t_{нов}$ от температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ и массового расхода теплоносителя G . Графики построим в относительных величинах. В качестве базисных величин для температуры и массового расхода примем средние значения исследуемых диапазонов $t_0 = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; $G_0 = 0,0069\text{ кг/с}$; $d_0 = 0,0045\text{ м}$. Полученные графики представлены на рисунках 3.17 и 3.18.

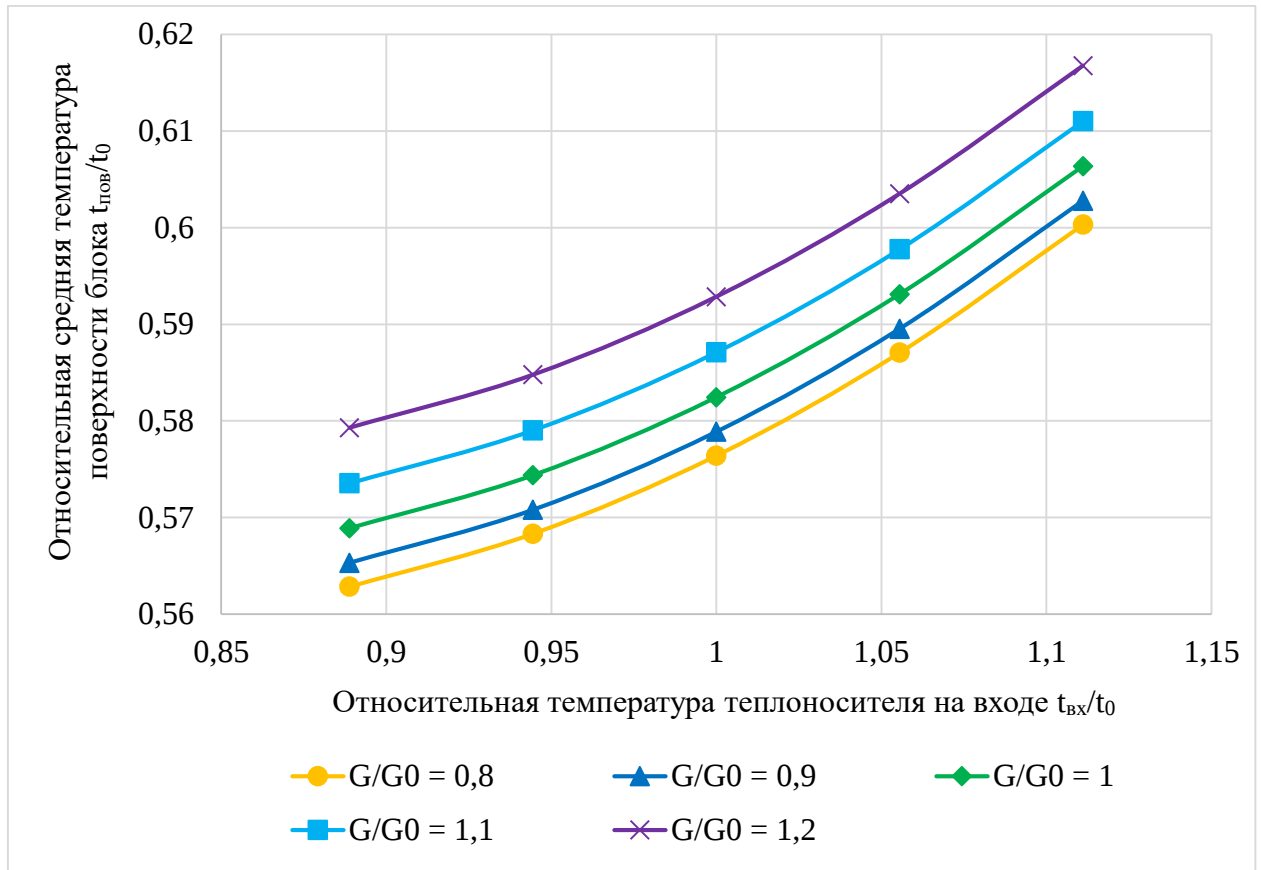


Рисунок 3.17 – График средней температуры поверхности блока с капиллярными трубками $t_{нов}$ в зависимости от температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ в относительных единицах

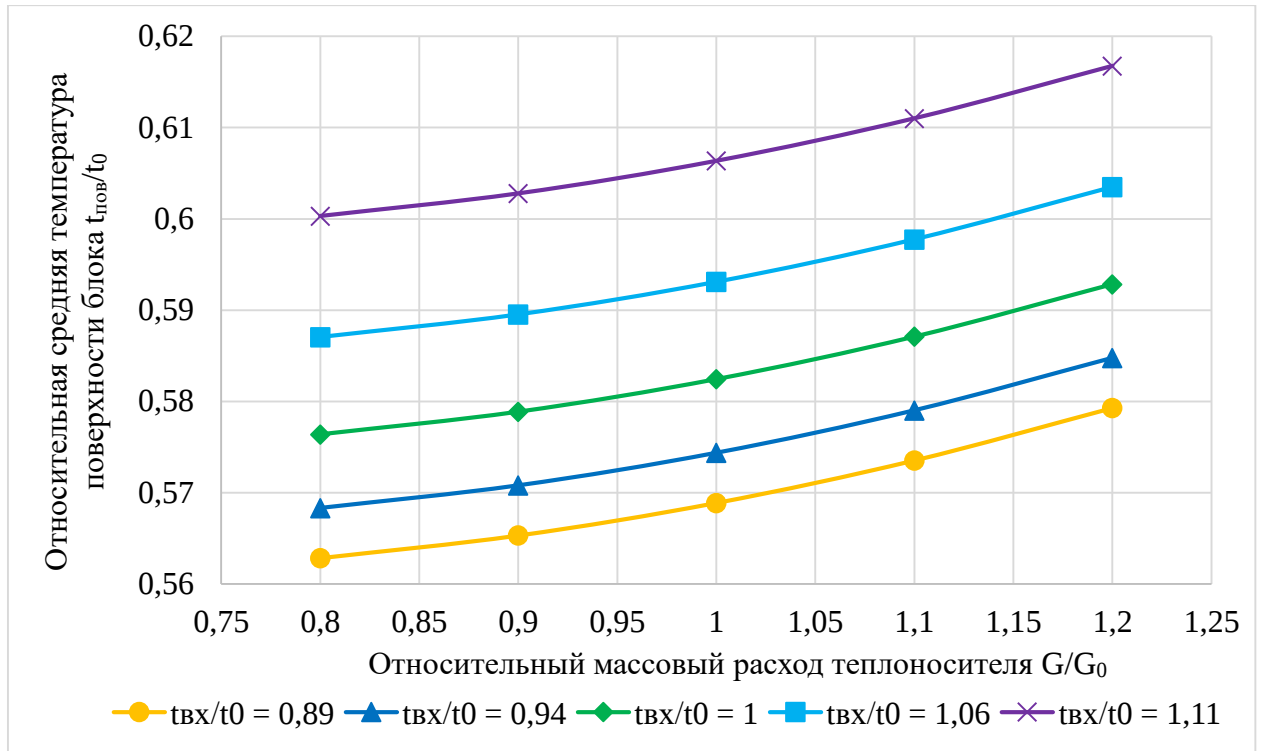


Рисунок 3.18 – График средней температуры поверхности блока с капиллярными трубками $t_{нов}$ в зависимости от относительного массового расхода теплоносителя G в относительных единицах

Полученные графики показывают, что на всем исследуемом диапазоне сохраняется тенденция увеличения средней температуры поверхности блока $t_{нов}$ с ростом температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ и относительного массового расхода теплоносителя G . Однако, более интенсивный рост наблюдается при увеличении температуры подаваемого теплоносителя $t_{вх}$ [109].

Поскольку диаметр капиллярных трубок практически не оказывает влияния на параметры системы, то было принято решение для дальнейших исследований выбрать среднее значение исследуемого диапазона $d = 0,0045$ м.

3.4 Тепловизионный анализ экспериментального блока

В ходе проведения экспериментов осуществлялась фиксация картин распределения температур на поверхности блоков и в системе капиллярных

трубок с помощью тепловизора. Целью данного исследования является анализ равномерности нагрева поверхности экспериментальных блоков, сравнение блоков с различным диаметром капиллярных трубок. В соответствии с рекомендациями по использованию тепловизора [115], были выбраны следующие параметры для проведения измерений:

- коэффициент излучения: 0,89;
- отраженная радиационная температура: 22 °С;
- влажность воздуха: 45 %;
- расстояние до измеряемого объекта: 1 м.

Исследование проводилось при следующих параметрах работы экспериментального блока:

- температура теплоносителя на входе $t_{\text{ex}} = 40$ °С;
- массовый расход теплоносителя $G = 0,0055$ кг/с;
- диаметр капиллярных трубок $d = 0,0045$ м.

На рисунке 3.19 представлена полученная термограмма поверхности экспериментального блока.

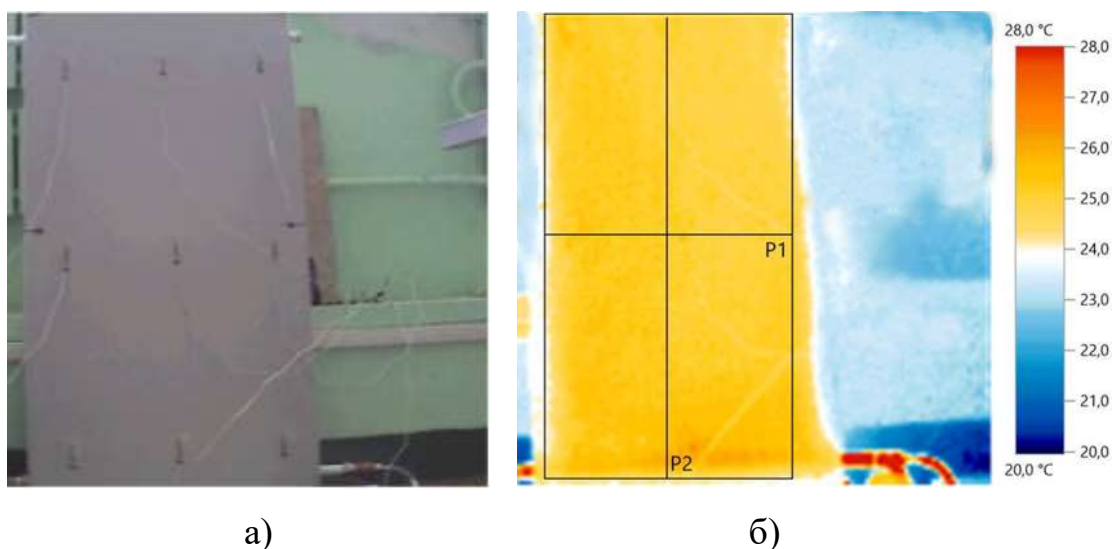


Рисунок 3.19 – Термограмма поверхности экспериментального блока (а – реальное изображение, б – термограмма)

На рисунках 3.20, 3.21 и 3.22 приведены температурные профили по горизонтальной (P1) и вертикальной (P2) осям, а также гистограмма температур на поверхности блока.

Средняя температура поверхности блока составляет 25,1 °С, что соотносится с результатами измерений с помощью выносных датчиков температуры, представленных в разделе 3.3. При этом можно заметить, что распределение температур по поверхности блока равномерное. Разница между максимальной и минимальной температурой на поверхности блока не превышает 2,6 °С [109]. Наиболее нагретой является зона коллектора.

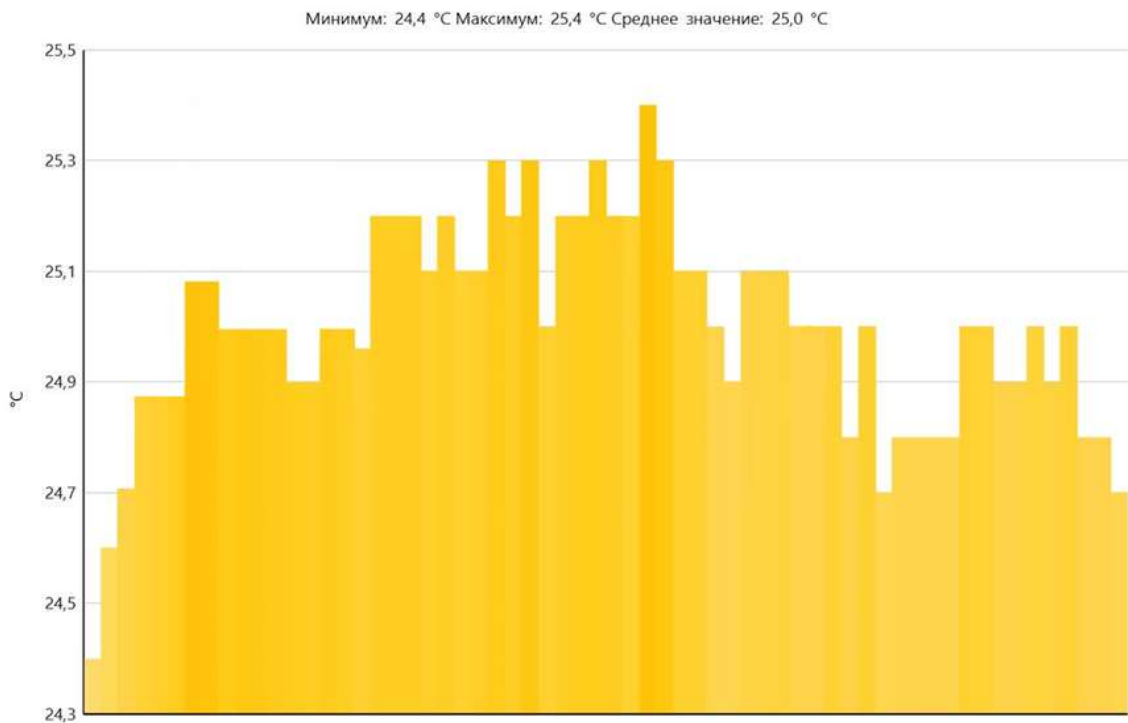


Рисунок 3.20 – Температурный профиль поверхности экспериментального блока по горизонтальной оси (P1)

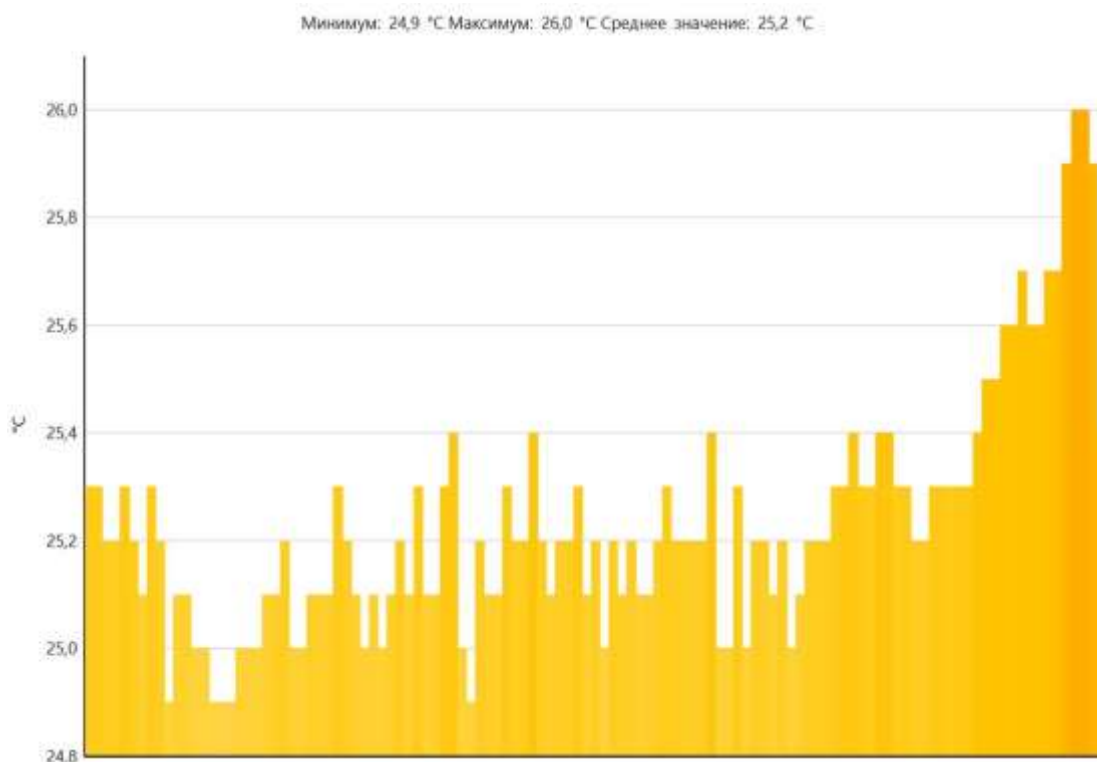


Рисунок 3.21 – Температурный профиль поверхности экспериментального блока по вертикальной оси (P2)

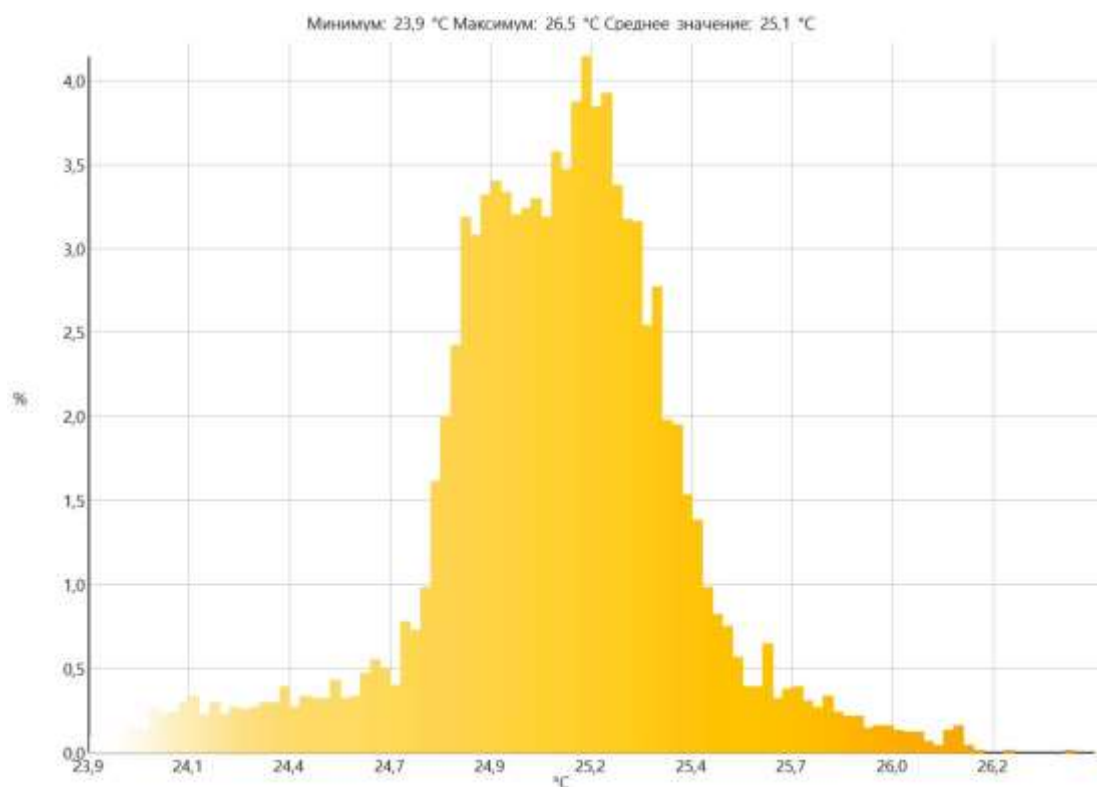


Рисунок 3.22 – Гистограмма температур поверхности экспериментального блока

На рисунке 3.23 представлена термограмма системы капиллярных трубок, находящихся внутри блока. Анализ показал, что все трубки равномерно заполнены теплоносителем. При этом температура коллектора на входе составляет $39,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура коллектора на выходе $38,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данные значения также соотносятся с результатами измерений температуры теплоносителя на входе и выходе из блока, выполненных с помощью выносных датчиков температуры и приведенных в разделе 3.2.

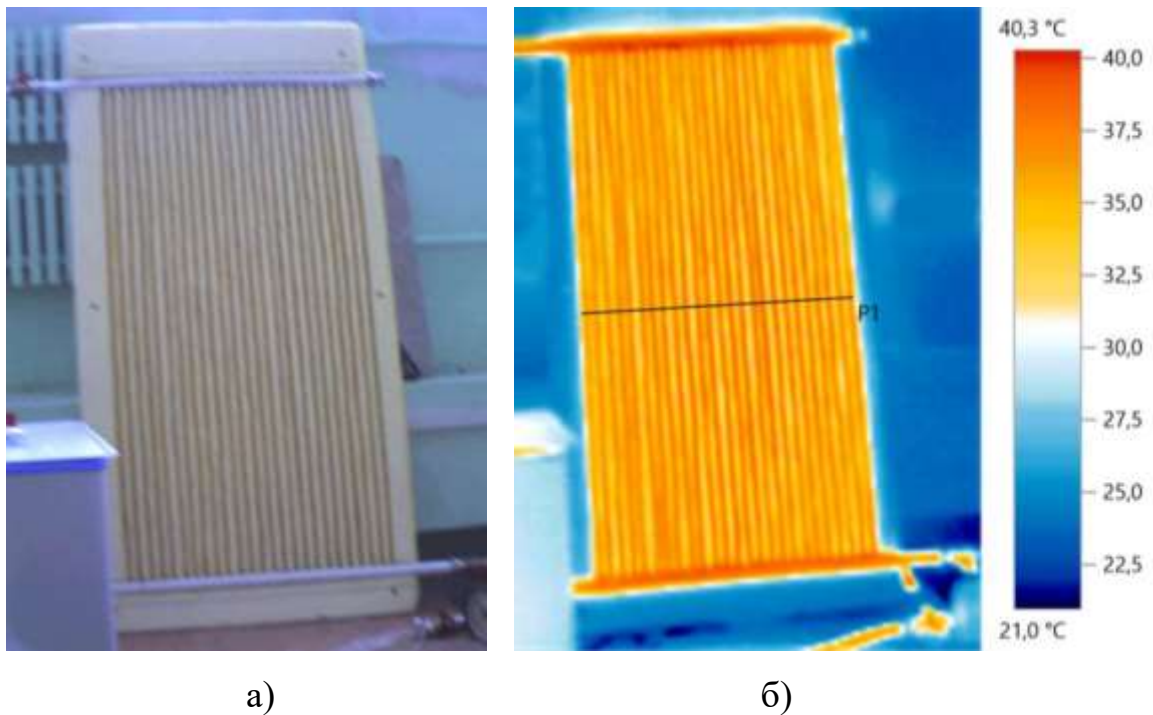


Рисунок 3.23 – Термограмма системы капиллярных трубок (а – реальное изображение, б – термограмма)

Далее выполнен анализ сходимости результатов тепловизионного исследования с данными, полученными в ходе численного моделирования в среде SolidWorks FlowSimulation. В таблице 3.17 приведена сходимость значений температуры в средней зоне системы капиллярных трубок.

Таблица 3.17 – Сходимость значений температуры в средней зоне системы капиллярных трубок

№ измерения	Ширина секции, м	Температура, °С		Абсолютная погрешность, °С	Относительная погрешность, %
		Численное моделирование	Тепловизионный анализ		
1	0	39,40	39,31	-0,09	-0,23
2	0,01	35,60	35,79	0,19	0,53
3	0,02	39,38	39,45	0,07	0,18
4	0,03	35,58	35,85	0,27	0,75
5	0,04	39,37	39,52	0,15	0,38
6	0,05	35,57	35,33	-0,24	-0,68
7	0,06	39,34	39,05	-0,29	-0,74
8	0,07	35,54	35,95	0,41	1,14
9	0,08	39,32	39,12	-0,20	-0,51
10	0,09	35,52	35,92	0,40	1,11
11	0,10	39,30	39,15	-0,15	-0,38
12	0,11	35,50	35,25	-0,25	-0,71
13	0,12	39,28	38,96	-0,32	-0,82
14	0,13	35,48	35,16	-0,32	-0,91
15	0,14	39,25	38,85	-0,40	-1,03
16	0,15	35,45	35,12	-0,33	-0,94
17	0,16	39,22	39,03	-0,19	-0,49
18	0,17	35,42	35,33	-0,09	-0,25
19	0,18	39,18	38,89	-0,29	-0,75
20	0,19	35,38	35,48	0,10	0,28
21	0,20	39,16	38,78	-0,38	-0,98
22	0,21	35,36	35,51	0,15	0,42
23	0,22	39,15	38,74	-0,41	-1,06
24	0,23	35,35	35,56	0,21	0,59
25	0,24	39,12	39,11	-0,01	-0,03

26	0,25	35,32	34,97	-0,35	-1,00
27	0,26	39,10	39,18	0,08	0,20
28	0,27	35,30	35,48	0,18	0,51
29	0,28	39,09	38,85	-0,24	-0,62
30	0,29	35,29	35,45	0,16	0,45
31	0,30	39,07	38,74	-0,33	-0,85
32	0,31	35,27	35,84	0,57	1,59
33	0,32	39,05	38,59	-0,46	-1,19
34	0,33	35,25	35,29	0,04	0,11
35	0,34	39,01	38,37	-0,64	-1,67
36	0,35	35,21	35,68	0,47	1,32
37	0,36	38,95	38,49	-0,46	-1,20
38	0,37	35,15	35,58	0,43	1,21
39	0,38	38,90	38,70	-0,20	-0,52

Выполненный статистический анализ полученных данных с помощью t-критерия Стьюдента показал, что численное моделирование адекватно описывает экспериментальные данные. Значение t-критерия Стьюдента, равное 1,458, оказалось ниже критического значения, равного 2,024, для 38 степеней свободы и уровня значимости 0,05. Следовательно, между значениями, полученными в результате численного моделирования и тепловизионного анализа, отсутствуют значимые различия.

На рисунке 3.24 приведены сравнительные графики распределения температур в средней зоне системы капиллярных трубок, полученные в результате численного моделирования и результатов тепловизионного анализа.

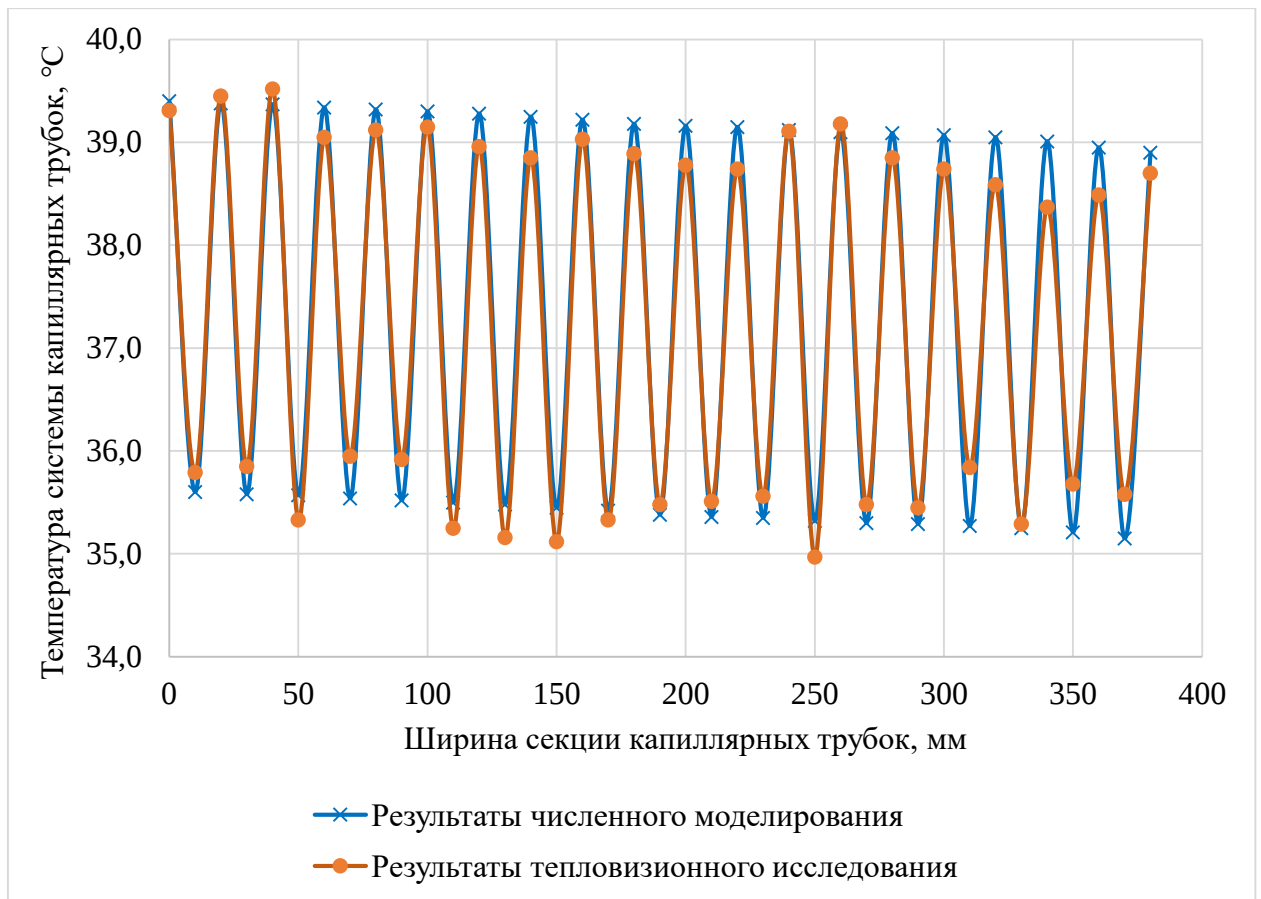


Рисунок 3.24 – Сравнение распределения температур в системе капиллярных трубок

Также был проведен тепловизионный анализ трех блоков с капиллярными трубками, соединенных последовательно, для сравнения картин температур на их поверхностях. На рисунке 3.25 приведена термограмма поверхностей экспериментальных блоков. В результате анализа средней температуры на поверхности блоков были получены следующие значения:

– AV1 (блок с капиллярными трубками диаметром 0,006 м) – $t_{нов} = 25,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

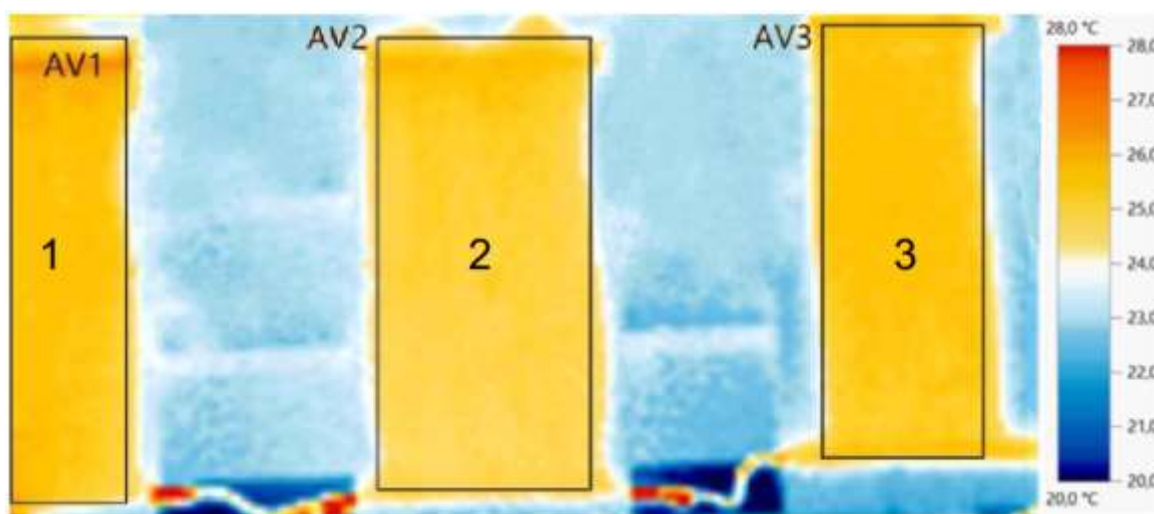
– AV2 (блок с капиллярными трубками диаметром 0,0045 м) – $t_{нов} = 25,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

– AV3 (блок с капиллярными трубками диаметром 0,003 м) – $t_{нов} = 25,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полученные результаты подтверждают ранее сделанный вывод о том, что средняя температура поверхности блоков практически не зависит от диаметра капиллярных трубок. При этом для всех блоков распределение температуры по поверхности является равномерным.



а)



б)

Рисунок 3.25 – Термограмма поверхностей экспериментальных блоков (а – реальное изображение, б – термограмма)

3.4 Метрологический анализ экспериментальных исследований

Оценка суммарной ошибки δ результатов измерений, полученных в ходе эксперимента, проводилась на основе правила сложения независимых ошибок. [94, 116, 117, 118]:

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_i^2}, \quad (3.56)$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_i$ – погрешности отдельных независимых измерений, %.

Составляющая погрешности измерительных приборов принята по паспортным данным средств измерений. Методическая погрешность, следуя рекомендациям [116, 117, 118] была принята равной 3 %.

Погрешность при исследовании изменения температуры теплоносителя на выходе при использовании блока предложенной конструкции

Суммарная ошибка исследования изменения температуры теплоносителя на выходе из экспериментального блока определяется по соотношению [116, 117, 118]:

$$\delta = \sqrt{\delta_G^2 + \delta_{ex}^2 + \delta_{вых}^2 + \delta_M^2}, \quad (3.57)$$

где δ_G – погрешность при измерении массового расхода теплоносителя,

$$\delta_G \leq 2\%;$$

δ_{ex} – погрешность при измерении температуры теплоносителя на входе,

$$\delta_{ex} \leq 1\%;$$

$\delta_{вых}$ – погрешность при измерении температуры теплоносителя на выходе,

$$\delta_{вых} \leq 1\%;$$

δ_M – методическая погрешность, $\delta_M \leq 3\%$.

Тогда суммарная ошибка составляет:

$$\delta = \sqrt{2^2 + 1^2 + 1^2 + 3^2} = 3,87\%.$$

Согласно [119, 120, 121] предельно допустимый уровень погрешности при экспериментальном изучении физических характеристик жидкостей составляет 5 %. Рассчитанное в работе значение ошибки оказалось ниже

данного значения, что свидетельствует о достоверности полученных данных об изменении температуры теплоносителя на выходе экспериментального блока.

Погрешность при исследовании изменения средней температуры поверхности блока предложенной конструкции

Суммарная ошибка исследования изменения средней температуры поверхности экспериментального блока определяется по соотношению [116, 117, 118]:

$$\delta = \sqrt{\delta_G^2 + \delta_{нов1}^2 + \dots + \delta_{нов9}^2 + \delta_m^2}, \quad (3.58)$$

где δ_G – погрешность при измерении массового расхода теплоносителя,

$$\delta_G \leq 2\%;$$

$\delta_{нов1} \dots \delta_{нов9}$ – погрешность при измерении температуры поверхности блока,

$$\delta_{нов} \leq 1\%;$$

δ_m – методическая погрешность, $\delta_m \leq 3\%$.

Тогда суммарная ошибка составляет:

$$\delta = \sqrt{2^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 3^2} = 4,69\%.$$

Рассчитанная погрешность оказалась ниже максимально допустимого уровня в 5%, следовательно, результаты экспериментального исследования обладают достаточным уровнем достоверности.

3.5 Выводы

1. В результате экспериментальных исследований на разработанном экспериментальном стенде получена регрессионная зависимость температуры теплоносителя на выходе из системы капиллярных трубок от температуры теплоносителя на входе, массового расхода теплоносителя и диаметра капиллярных трубок. В результате анализа полученной зависимости было выявлено, что увеличение как температуры теплоносителя на входе, так и

массового расхода ведет к увеличению температуры теплоносителя на выходе. В обоих случаях зависимость параболическая. При этом увеличение температуры теплоносителя на выходе за счет увеличения температуры на входе происходит более интенсивно, чем при увеличении массового расхода. Диаметр капиллярных трубок практически не влияет на температуру теплоносителя на выходе.

2. Получены графики изменения температуры теплоносителя в зависимости от температуры теплоносителя на входе, массового расхода теплоносителя и диаметра капиллярных трубок. В результате анализа была выявлена температура теплоносителя на входе, при которой наблюдается максимальная разница температур на входе и выходе, равная $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а, следовательно, максимальная теплоотдача. С увеличением массового расхода происходит «проскок» теплоносителя и разность температур уменьшается.

3. В результате экспериментальных исследований получена регрессионная зависимость изменения средней температуры поверхности экспериментального блока от температуры теплоносителя на входе и массового расхода теплоносителя. Анализ показывает, что на всем исследуемом диапазоне сохраняется тенденция увеличения средней температуры поверхности блока с увеличением температуры теплоносителя на входе и массового расхода.

4. Выполнен тепловизионный анализ трех экспериментальных блоков с разными диаметрами капиллярных трубок, показавший, что во всех трех блоках наблюдается равномерное заполнение капиллярных трубок теплоносителем и равномерный прогрев поверхности блоков. Выполненный статистический анализ полученных данных показал, что численное моделирование адекватно описывает экспериментальные данные. Таким образом, при температуре теплоносителя $40\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается равномерный прогрев всей поверхности блока, что должно способствовать равномерному прогреву всего объема отапливаемого помещения за счет большой теплопередающей поверхности.

5. Расчет погрешностей измерений в ходе экспериментальных исследований позволил сделать вывод о достаточной достоверности полученных данных (расхождение не превысило 5%).

**ГЛАВА 4. ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ.
АЛГОРИТМ ПОДБОРА ПРЕДЛОЖЕННОГО СТЕНОВОГО БЛОКА С
СИСТЕМОЙ КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБОК. ТЕХНИКО-
ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ
РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ**

4.1 Методика проведения промышленного испытания оборудования

Методика промышленного испытания стенового блока системы капиллярного водяного отопления разработана с учетом требований, описанных в [122, 123, 124].

Данная методика предназначена для определения характеристик конкретного стенового блока с системой капиллярных трубок и сопоставления полученных результатов с заявленными значениями.

В ходе проведения промышленного испытания требуется определить следующие параметры конкретного стенового блока:

- снижение температуры теплоносителя Δt_{Σ} после прохождения его через систему капиллярных трубок;
- температуру на поверхности стенового блока $t_{пов\Sigma}$.

Условия и порядок проведения испытания:

Промышленные испытания проводятся в помещении при температуре окружающей среды не менее 10 °С.

Принципиальная схема промышленного испытательного стенда представлена на рисунке 4.1.

Стенд состоит из следующих основных элементов:

- исследуемый стеновой блок с системой капиллярных трубок (1);
- котел отопительный водогрейный (2) [125];
- циркуляционный насос (3) [126];
- счетчик воды (4) [127];
- манометры (5, 6) [128];
- выносные датчики температуры (7-17) [129];

- шаровые краны (18, 19) [130];
- прибор для фиксации показаний с выносных датчиков температуры (20) [131].

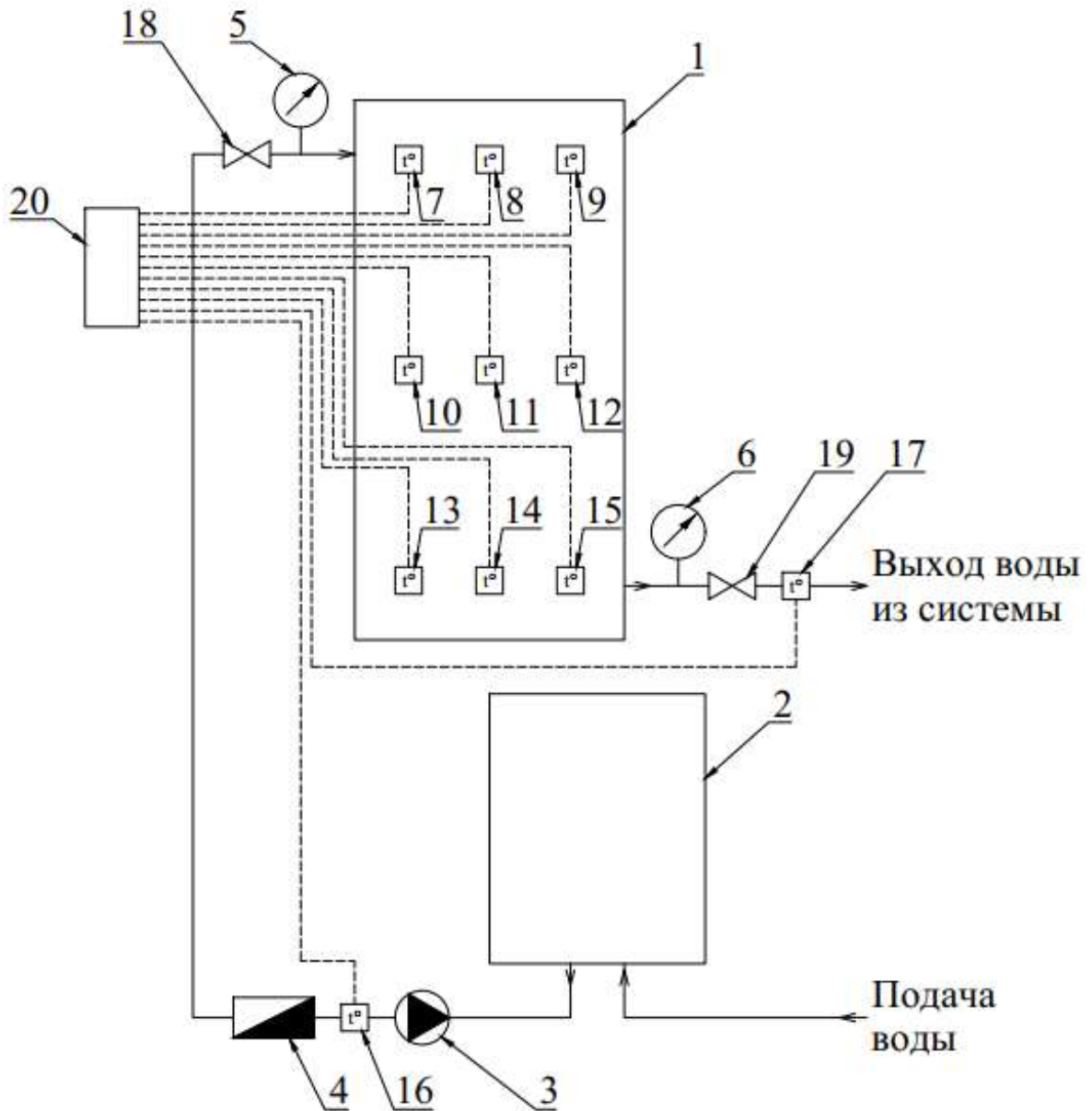


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема испытательного стенда для промышленного испытания стенового блока с системой капиллярных трубок

Перед началом испытаний задаются следующие параметры:

- температура теплоносителя на входе в стеновой блок в диапазоне $t_{ex} = 40...50^{\circ}\text{C}$;
- массовый расход теплоносителя в диапазоне $G = 0,0055...0,0083 \text{ кг/с}$.

Диаметр капиллярных трубок принимается равным $d = 0,0045 \text{ мм}$.

Порядок проведения испытания аналогичен порядку, описанному в разделе 3.1. Для каждого из вариантов начальных параметров испытания проводятся не менее трех раз. Для проведения испытаний должны использоваться поверенные средства измерения с максимальной погрешностью не более 5 % [122].

Обработка и анализ результатов испытаний

После завершения испытаний проводится проверка полученных результатов.

1. С помощью графиков, представленных на рисунке 4.2, определяется снижение температуры теплоносителя Δt для исследуемого блока в соответствии с величиной температуры теплоносителя на входе и его массовым расходом в относительных единицах. В качестве базисных величин приняты средние значения исследуемых диапазонов: $t_0 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; $G_0 = 0,0069 \text{ кг/с}$.

Далее выполняется оценка погрешности между значением, полученным в результате испытания $\Delta t_{\text{э}}$ и значением, определенным по графикам Δt , с помощью соотношения:

$$\delta_{\Delta t} = \frac{\Delta t - \Delta t_{\text{э}}}{\Delta t} \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

Величина погрешности должна составить не более 5%.

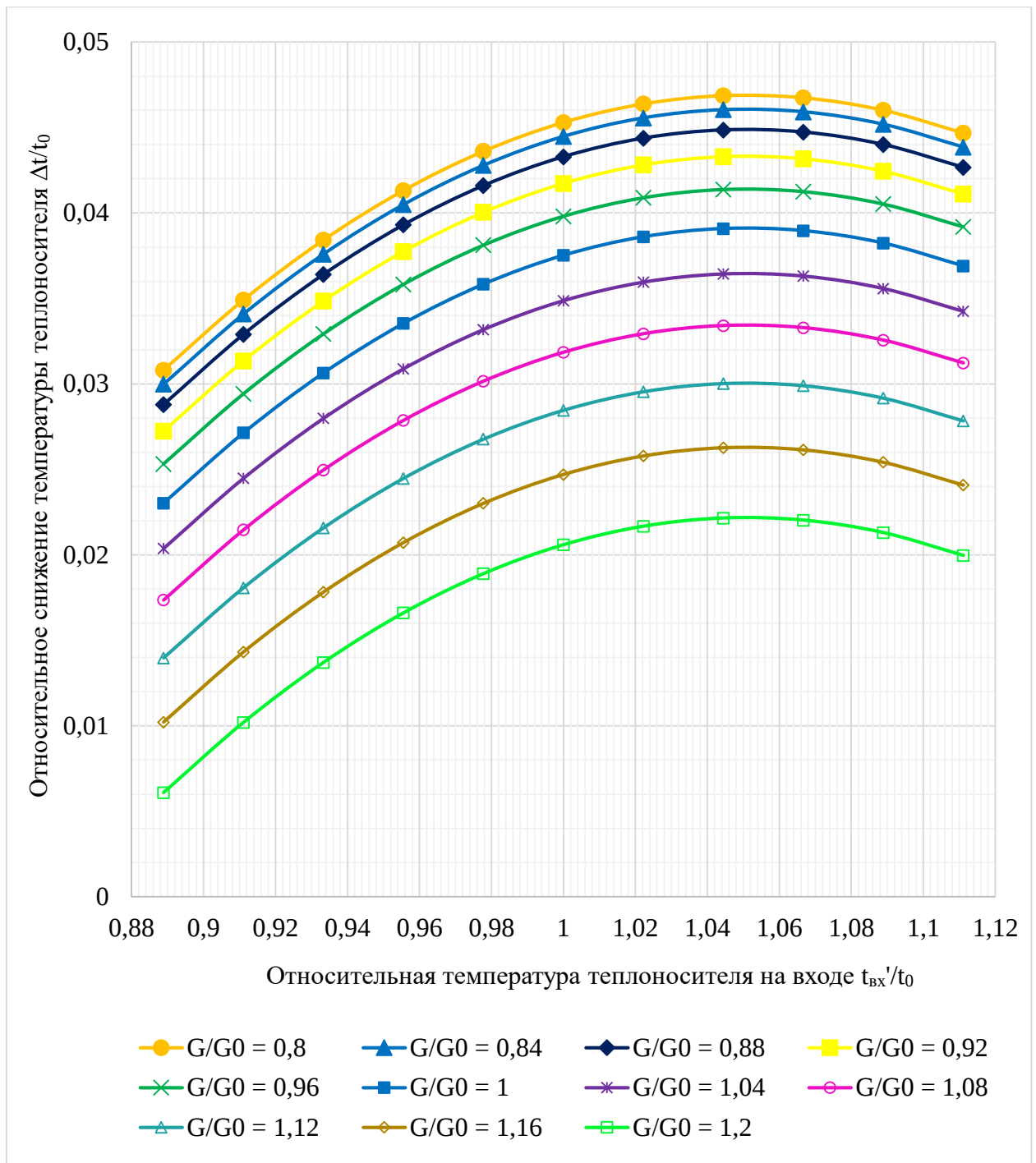


Рисунок 4.2 – График снижения температуры теплоносителя в исследуемом блоке Δt в относительных единицах

2. С помощью графиков, представленных на рисунке 4.3, определяется значение средней температуры поверхности блока $t_{нов}$ в зависимости от принятых величин температуры теплоносителя и его массового расхода в относительных единицах.

Далее выполняется оценка погрешности между значением, полученным в результате испытания $t_{новЭ}$ и значением, определенным по графикам $t_{нов}$, с помощью соотношения:

$$\delta_t = \frac{t_{нов} - t_{новЭ}}{t_{нов}} \cdot 100\% . \quad (4.2)$$

Величина погрешности должна составить не более 5%.

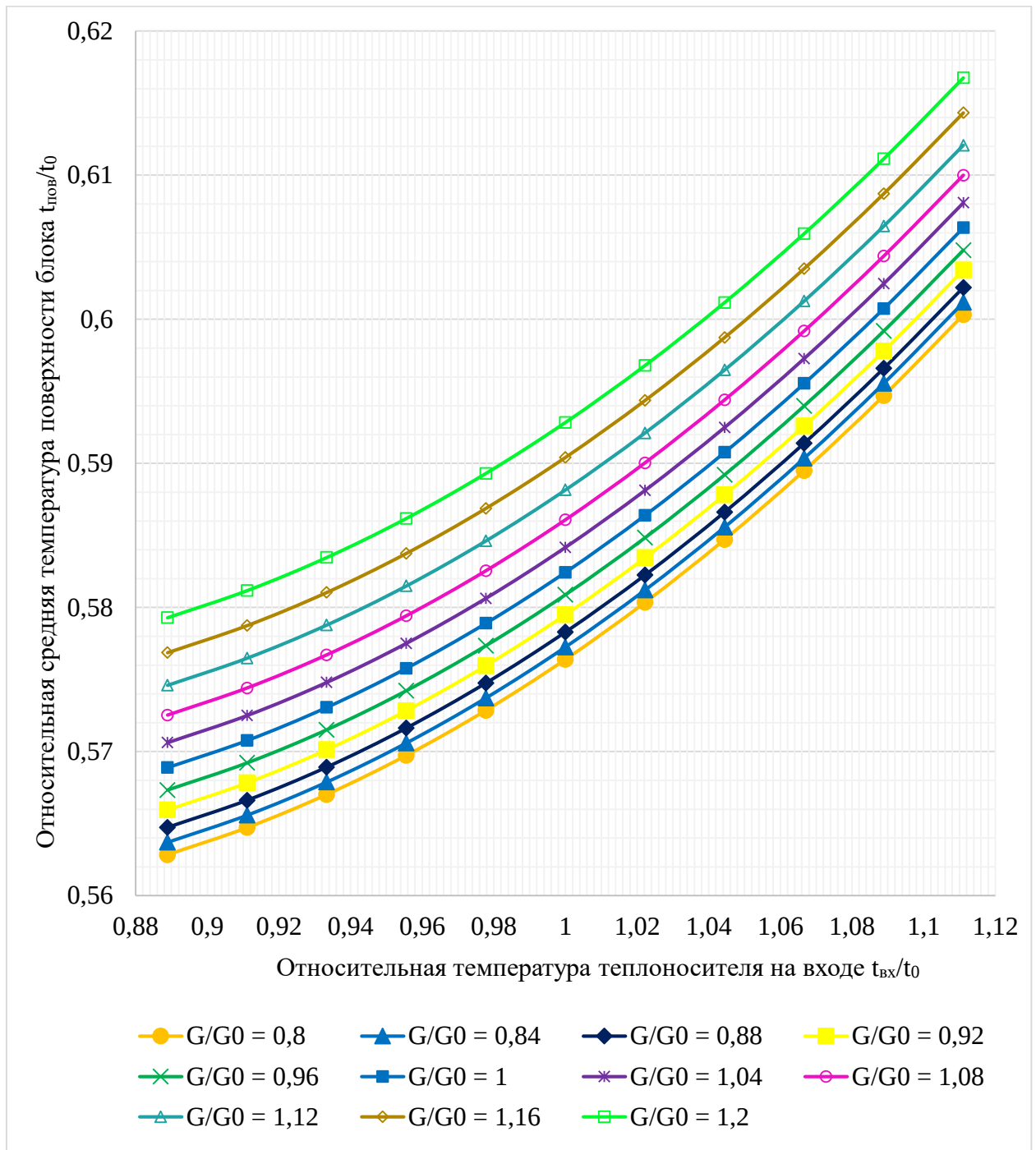


Рисунок 4.3 – График температуры на поверхности исследуемого блока $t_{нов}$ в относительных единицах

Результаты проведенных испытаний

После обработки результатов промышленных испытаний был сделан вывод о том, что отклонение от результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований, составляет не более 5%.

Для разработанного промышленного испытательного стенда также был выполнен тепловизионный анализ. Порядок проведения исследования был принят в соответствии с руководством по эксплуатации тепловизора марки Testo 868 [115].

Параметры проведения тепловизионного исследования:

- коэффициент излучения: 0,90;
- отраженная радиационная температура: 18 °C;
- влажность воздуха: 52 %;
- расстояние до измеряемого объекта: 1 м.

Исследование проводилось при следующих параметрах работы промышленного испытательного стенда:

- температура теплоносителя на входе $t_{\text{ex}} = 45$ °C;
- массовый расход теплоносителя $G = 0,0069$ кг/с;
- диаметр капиллярных трубок $d = 0,0045$ м.

На рисунке 4.4 представлена термограмма поверхности стенового блока во время проведения испытаний.

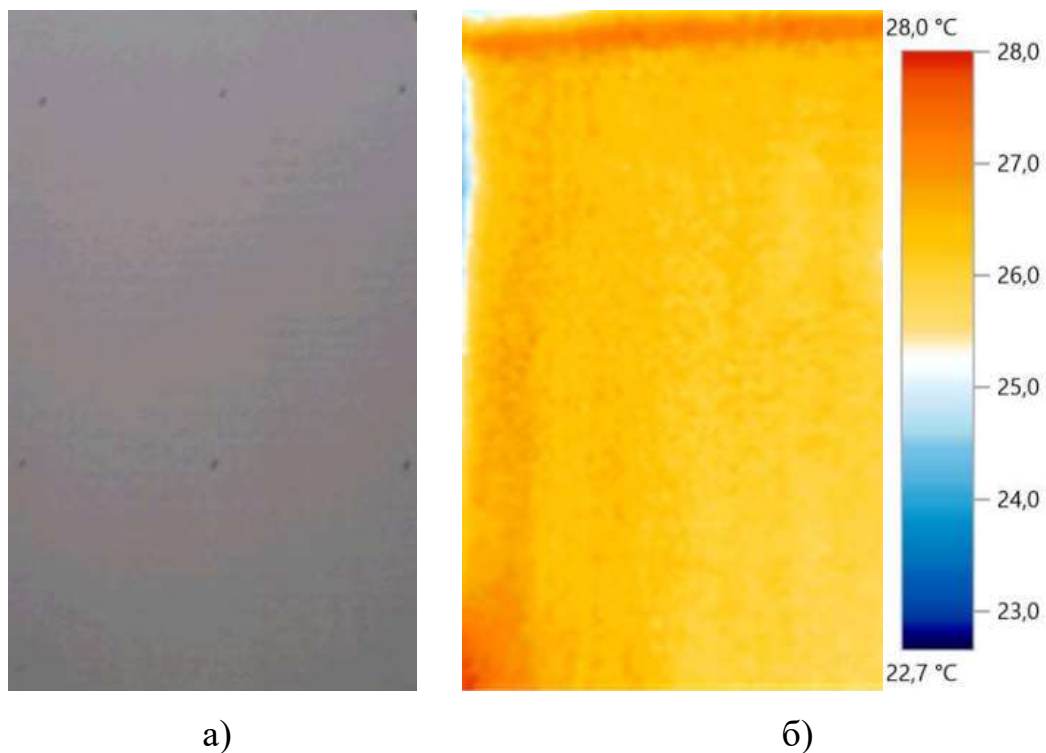


Рисунок 4.4 – Термограмма поверхности экспериментального образца (а – реальное изображение, б – термограмма)

На рисунках 4.5, 4.6 и 4.7 представлены термограммы системы капиллярных трубок в верхней, средней и нижней частях стенового блока.

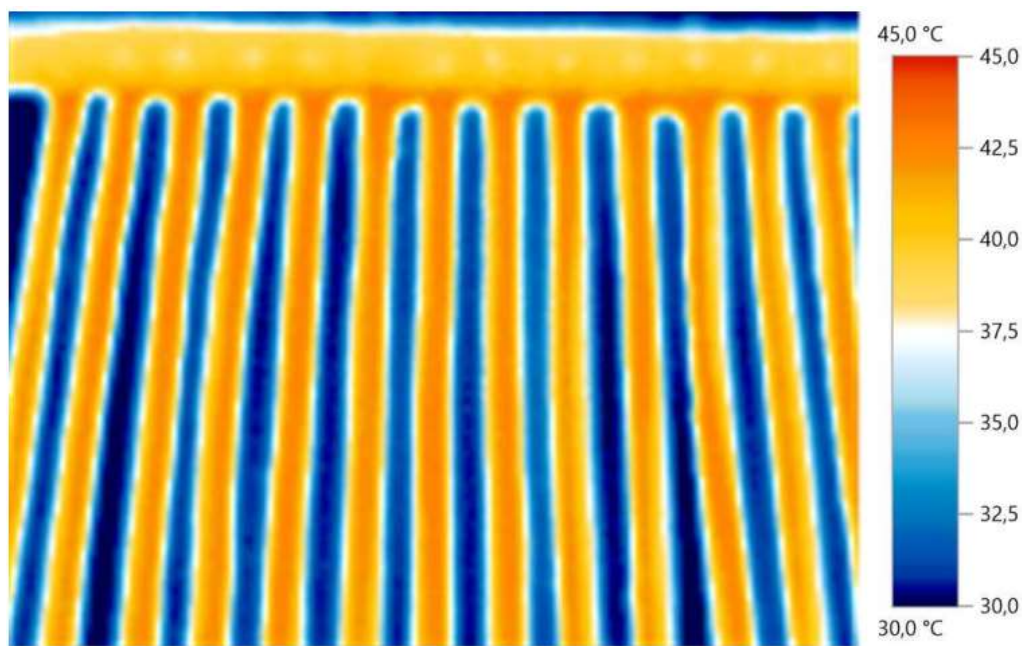


Рисунок 4.5 – Термограмма системы капиллярных трубок в верхней части стенового блока

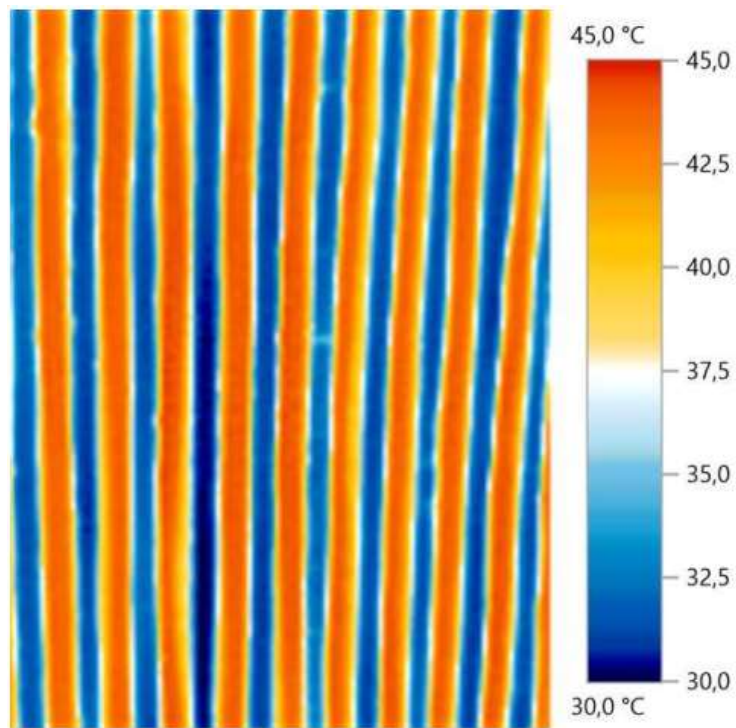


Рисунок 4.6 – Термограмма системы капиллярных трубок в средней части стенового блока

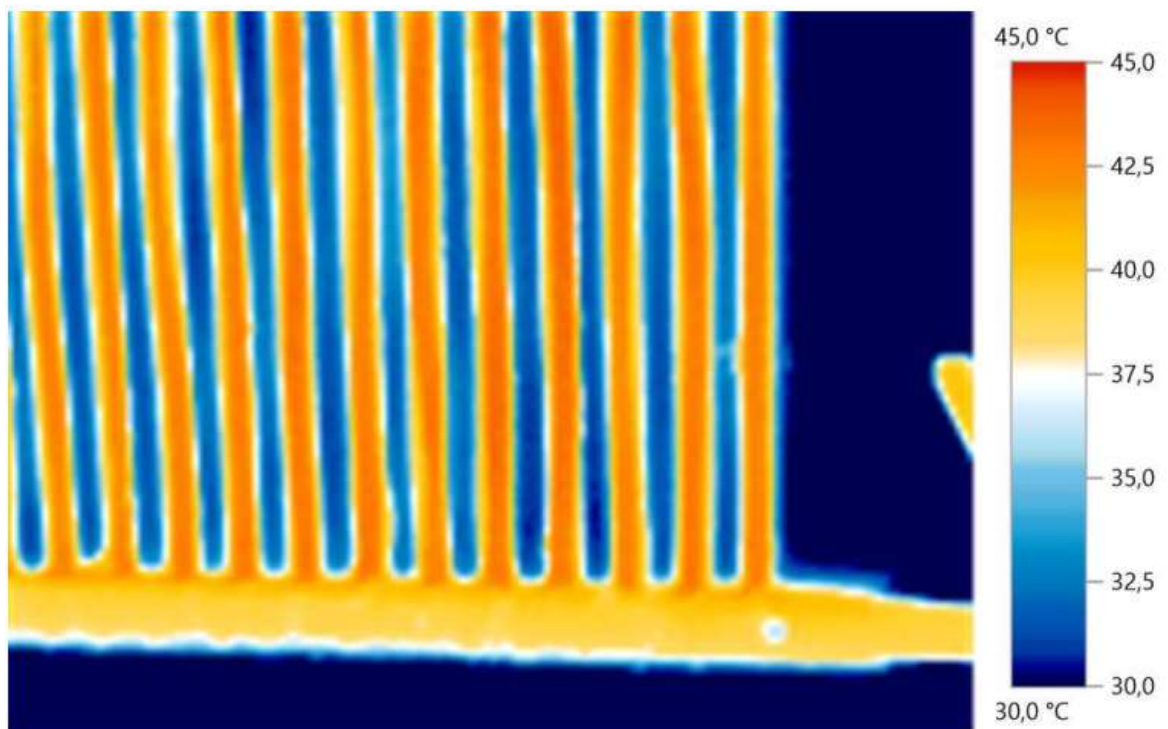


Рисунок 4.7 – Термограмма системы капиллярных трубок в нижней части стенового блока

Анализ данных термограмм подтверждает выводы, сделанные в результате проведения экспериментальных исследований. Поверхность стенового блока нагревается равномерно с незначительным снижением температуры от центральной зоны к краям. Заполнение капиллярных трубок теплоносителем также происходит равномерно, за счет чего и достигается равномерность температуры на поверхности блока.

4.2 Алгоритм подбора стенового блока с системой капиллярных трубок (инженерный расчет)

Для подбора конструкции стенового блока для отопления помещения рекомендуется использовать следующий алгоритм:

1. Произвести расчет теплотерь помещения ($Q_{ном}$, Вт) согласно методике, описанной в [2].

2. Определить стену для установки стенового блока и рассчитать его полезную поверхность по формуле (4.3):

$$S_n = A' \cdot B', м^2; \quad (4.3)$$

$$A' = A - 0,5, м; \quad (4.4)$$

$$B' = B - 0,6, м, \quad (4.5)$$

где A – высота стены для установки блока, м,

A' – высота системы капиллярных трубок, м,

B – ширина стены для установки блока, м,

B' – ширина системы капиллярных трубок, м.

3. Рассчитать длину капиллярных трубок:

$$l_{кан} = A' - 0,2, м. \quad (4.6)$$

4. Рассчитать количество секций системы капиллярных трубок по формуле (4.7), учитывая, что для установки 1 секции капиллярных трубок требуется пространство шириной не менее 0,58 м:

$$n_{секц} = \frac{B'}{0,58}, \text{шт.} \quad (4.7)$$

Полученное значение округлить в меньшую сторону.

5. Уточнить полезную площадь стенового блока по формуле (4.8):

$$S_n' = A' \cdot (n_{секц} \cdot 0,58), \text{м}^2. \quad (4.8)$$

6. Рассчитать требуемый удельный тепловой поток стенового блока в относительных единицах с учетом запаса 20% по формуле (4.9):

$$q' = \frac{1,2 \cdot Q_{ном}}{S_n' \cdot 100}. \quad (4.9)$$

7. По номограмме, представленной на рисунке 4.8, определить необходимое соотношение температуры теплоносителя и его массового расхода для требуемой величины удельного теплового потока.

8. По номограмме, представленной на рисунке 4.9, определить температуру поверхности стенового блока в относительных единицах.

Для перевода температуры, массового расхода и величины теплового потока в относительные единицы использовать следующие базисные величины: $t_0 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; $G_0 = 0,0069 \text{ кг/с}$, $q_0 = 100 \text{ Вт/м}^2$.

Полученные значения температуры теплоносителя $t_{вх}$ и его массового расхода G можно считать окончанием подбора характеристик стенового блока с системой капиллярных трубок.

Полученные данные используются для дальнейшего расчета системы отопления и подбора оборудования, в том числе циркуляционных насосов и котельного оборудования в зависимости от условий эксплуатации блока.

Расчеты проводятся аналогично методике подбора оборудования для организации систем радиаторного водяного отопления [132]. Для проектирования могут применяться современные программные комплексы, позволяющие оптимизировать и ускорить выполнение требуемых расчетов для правильного подбора оборудования и создания проектов отопительных систем [133, 134, 135].

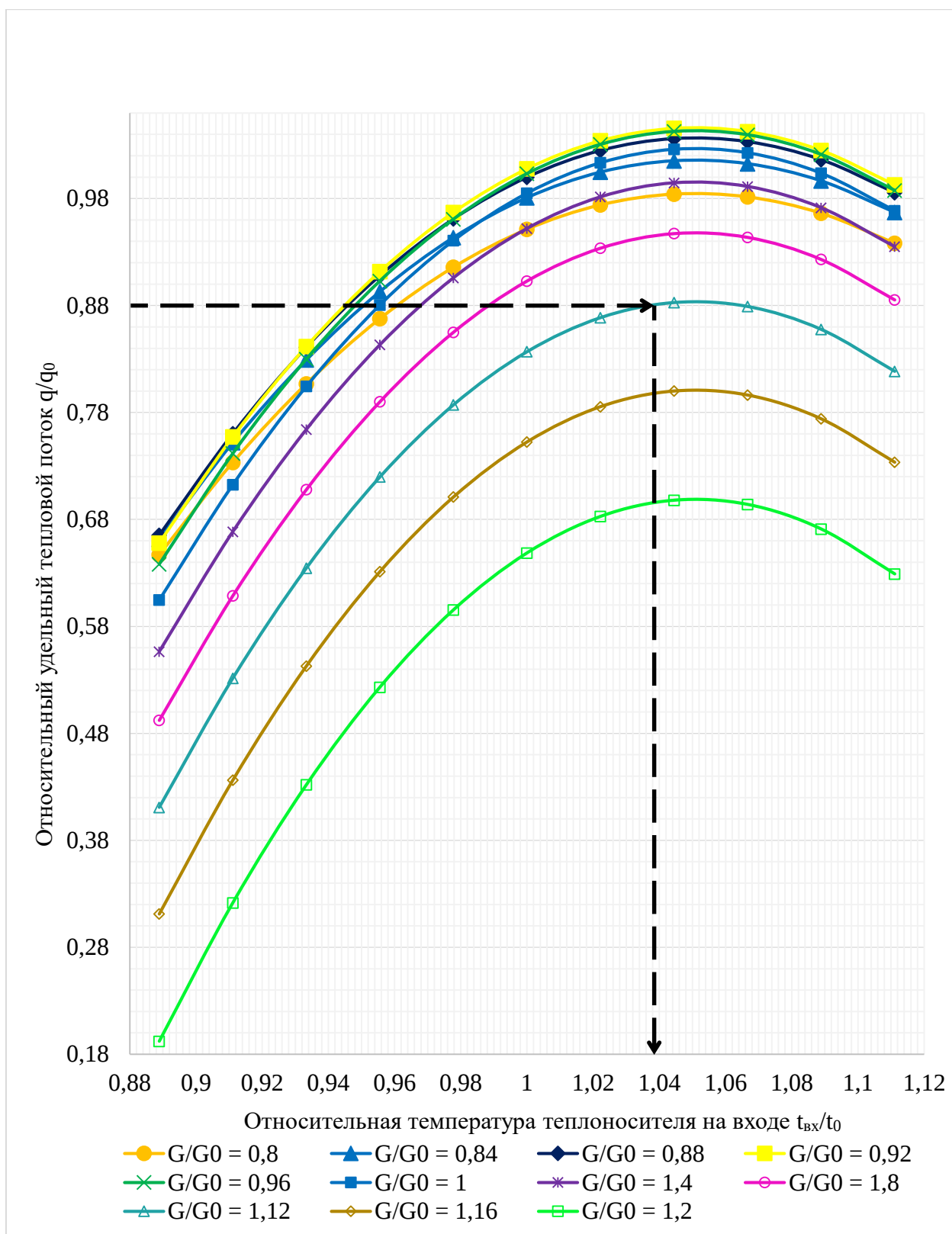


Рисунок 4.8 – Номограмма определения температуры теплоносителя на входе в стенной блок $t_{вх}$ и массового расхода теплоносителя G в относительных единицах

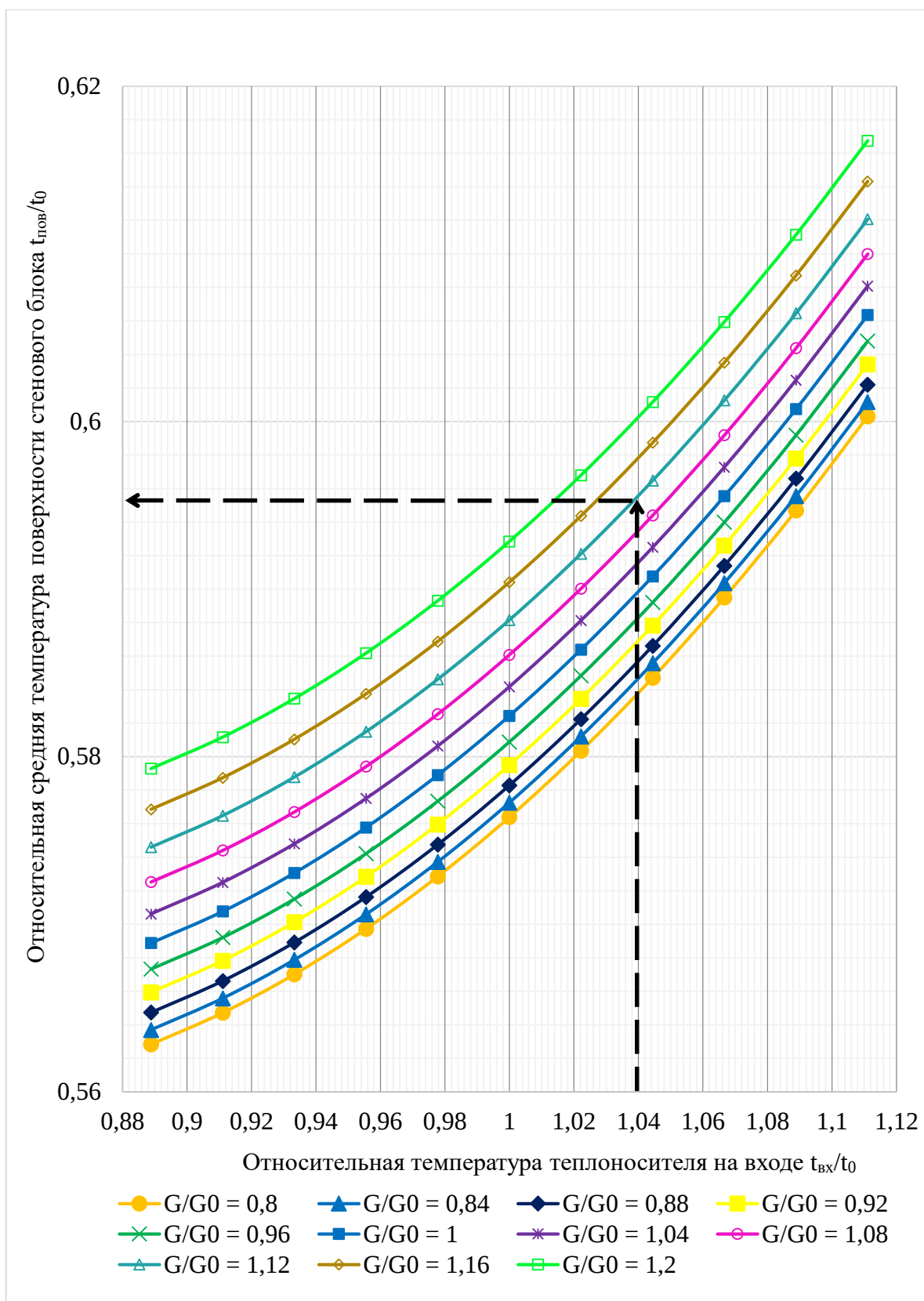


Рисунок 4.9 – Номограмма определения температуры поверхности стенового блока $t_{\text{пов}}$ в относительных единицах

4.3 Технико-экономическое обоснование применимости разработанных средств

Технико-экономическое обоснование внедрения системы водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками выполнялось на основании нормативной документации [11, 136, 137, 138], а также с учетом данных и рекомендаций, приведенных в работах [139, 140, 141, 142, 143, 144, 145].

Для определения показателей экономической эффективности внедрения стеновых блоков с капиллярными трубками в систему водяного отопления жилых и общественных зданий был сформирован методический подход, состоящий из следующих этапов:

- Этап 1 – определение исходных данных;
- Этап 2 – расчет затрат систем;
- Этап 3 – расчет простого и дисконтированного сроков окупаемости;
- Этап 4 – определение экономической эффективности;
- Этап 5 – визуализация результатов.

В рамках технико-экономического обоснования проведено сравнение нескольких вариантов систем отопления для жилой комнаты многоквартирного дома со следующими параметрами:

- размеры помещения (ДхШхВ) – 5х3х2,7(h) м;
- количество наружных стен – 1;
- количество окон – 1;
- размер окна – 1,5х1,5 м.

Сверху и снизу от рассматриваемой комнаты находятся отапливаемые помещения.

Сравниваемые варианты систем отопления:

- стеновой блок с системой капиллярных трубок;
- биметаллический радиатор;
- электрический конвектор;

- водяной теплый пол;
- электрический теплый пол.

Расчеты произведены для помещения, расположенного в г. Курск, Курская область.

Этап 1. Исходные данные для расчетов:

1.1 Технико-экономические характеристики систем:

- тариф на тепловую энергию, утверждённый Комитетом по тарифам и ценам Курской области $C_{тепл} = 2755,78$ руб./Гкал;
- тариф на электроэнергию для населения, установленный Комитетом по тарифам и ценам Курской области, составляет $C_{эл} = 5,87$ руб./кВт·ч.
- норма дисконта $p = 16,59\%$ определена в соответствии с рекомендациями, изложенными в [139].

Необходимая тепловая мощность для рассматриваемого помещения при использовании лучистых отопительных систем, рассчитанная по параметру Б [136] составляет $Q_{oml} = 1,2$ кВт. При применении в качестве отопительных приборов радиаторов данное значение возрастает $Q_{oml} = 1,45$ кВт [25, 140].

Годовое потребление тепловой энергии для данного помещения вычисляется по соотношению (4.10):

$$Q = \frac{Q_{om} \cdot 24 \cdot (t_{вн} - t_{ср}) \cdot n}{(t_{вн} - t_{ом})}, \quad (4.10)$$

где $t_{вн} = 22$ °С – средняя температура внутреннего воздуха в течение отопительного периода;

$t_{ср} = -1,8$ °С – средняя температура наружного воздуха за отопительный период;

$t_{ом} = -22$ °С – температура наружного воздуха по параметру Б;

$n = 191$ день – продолжительность отопительного периода.

Таким образом, годовая потребность в тепле при использовании лучистых систем отопления составляет:

$$Q_1 = \frac{1,2 \cdot 24 \cdot (22 - (-1,8)) \cdot 191}{(22 - (-22))} = 2975,43 \text{ кВт} = 2,558 \text{ Гкал}. \quad (4.11)$$

Для радиаторной системы отопления аналогичный показатель будет равен:

$$Q_1 = \frac{1,45 \cdot 24 \cdot (22 - (-1,8)) \cdot 191}{(22 - (-22))} = 3595,31 \text{ кВт} = 3,091 \text{ Гкал}. \quad (4.12)$$

1.2 Затраты на расходные материалы:

Стоимость расходных материалов конструкции рассчитывается по следующей формуле:

$$S_p = S_{p1} + S_{p2} + \dots + S_{pi}, \quad (4.13)$$

где S_{p1} , S_{p2} , S_{pi} – стоимость материалов на изготовление i -того элемента системы, руб.

Для стенового блока с системой капиллярных трубок данное выражение выглядит следующим образом:

$$S_{pCB} = S_{ск} + S_{np} + S_{от} + S_{тр} + S_{кан} + S_{отв} + S_{уг} + S_{загл} + S_{шк} + S_{м} + S_{кр}, \quad (4.14)$$

где $S_{ск} = 2251,8$ руб. – стоимость 16,2 м² гипсокартона для изготовления стенок блока;

$S_{np} = 3084,6$ руб. – стоимость 29,1 м стоечного профиля для изготовления каркаса блока;

$S_{от} = 524,9$ руб. – стоимость 8,1 м² отражающей теплоизоляции для укладки за системой капиллярных труб;

$S_{тр} = 615$ руб. – стоимость 10 м полипропиленовых труб диаметром 0,02 м для изготовления коллекторов;

$S_{кан} = 3870$ руб. – стоимость 300 м капиллярных труб диаметром 0,0045 м для 5 секций стенового блока;

$S_{отв} = 68,8$ руб. – стоимость 8 полипропиленовых тройников для труб диаметром 0,02 м;

$S_{уг} = 84$ руб. – стоимость 12 полипропиленовых уголков для труб диаметром 0,02 м;

$S_{загл} = 48$ руб. – стоимость 10 полипропиленовых заглушек для труб диаметром 0,02 м;

$S_{вент} = 2170$ руб. – стоимость 10 шаровых кранов для 5 секций стенового блока;

$S_m = 320$ руб. – стоимость 2 соединительных муфт для подключения стенового блока к подающему и обратному трубопроводу;

$S_{зк} = 500$ руб. – стоимость крепежа для сборки стенового блока.

Таким образом, стоимость расходных материалов для стенового блока с капиллярными трубками составляет $S_{pCB} = 13537$ руб.

1.3 Стоимость рабочих операций:

Стоимость рабочих операций на изготовление конструкции рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{раб} = S_{раб.1} + S_{раб.2} + \dots + S_{раб.i} + S_{мон}, \quad (4.15)$$

где $S_{раб.1}$, $S_{раб.2}$, $S_{раб.i}$ – стоимость рабочих операций на изготовление i -того элемента системы, руб. [138];

$S_{мон}$ – стоимость работ по монтажу системы, руб. [138].

Для стенового блока с системой капиллярных трубок данное выражение выглядит следующим образом:

$$S_{раб.СБ} = S_{раб.зк} + S_{раб.пай} + S_{раб.фит} + S_{мон}, \quad (4.16)$$

где $S_{раб.зк} = 3045,6$ руб. – стоимость работ по сборке каркаса из профилей и обшивке гипсокартоном;

$S_{раб.пай} = 2700$ руб. – стоимость работ по пайке труб;

$S_{раб.фит} = 378$ руб. – стоимость работ по установке фитингов;

$S_{мон} = 2000$ руб. – стоимость монтажа стенового блока.

Таким образом, стоимость рабочих операций для стенового блока с капиллярными трубками составляет $S_{раб.СБ} = 8123,6$ руб.

Этап 2. Затраты систем

2.1 Капитальные затраты на монтаж системы определяются как сумма стоимости расходных материалов и рабочих операций:

$$K = S_p + S_{раб}. \quad (4.17)$$

Для стенового блока с системой капиллярных трубок капитальные затраты составляют:

$$K = 13537 + 8123,6 = 21660,6 \text{ руб.}$$

2.2 Расчет эксплуатационных затрат для системы отопления выполняется по следующей формуле (4.18):

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{эн}} + \mathcal{E}_{\text{ам}}, \quad (4.18)$$

где $\mathcal{E}_{\text{эн}}$ – эксплуатационные затраты на тепловую, либо электрическую энергию в зависимости от используемой системы, руб;

$\mathcal{E}_{\text{ам}}$ – годовые амортизационные расходы системы, руб.

Для стенового блока с системой капиллярных трубок эксплуатационные затраты на тепловую энергию составляют:

$$\mathcal{E}_{\text{эн}} = Q_1 \cdot C_{\text{тепл}} = 2,558 \cdot 2755,78 = 7050,42 \text{ руб}, \quad (4.19)$$

где Q_1 – годовая потребность в тепле рассматриваемого помещения, Гкал;

$C_{\text{тепл}}$ – тариф на тепловую энергию, руб./Гкал.

Годовые амортизационные расходы для стенового блока определяются по формуле (4.20):

$$\mathcal{E}_{\text{ам}} = \frac{1,5 \cdot K}{T_{\text{ам}}} = \frac{1,5 \cdot 21660,6}{30} = 1083,03 \text{ руб}, \quad (4.20)$$

где K – капитальные затраты на строительство системы, руб;

$T_{\text{ам}}$ – расчетный срок эксплуатации системы, лет.

Таким образом, эксплуатационные затраты системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками составляют:

$$\mathcal{E} = 7050,42 + 1083,03 = 8133,45 \text{ руб}. \quad (4.21)$$

2.3 Сравнение затрат различных систем отопления.

Расчет затрат для сравниваемых видов отопительных систем проведен аналогичным способом. Полученные результаты сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Затраты различных систем отопления

№ варианта	Тип системы отопления	Капитальные затраты, руб	Эксплуатационные затраты, руб	Срок эксплуатации, лет
1	Стеновой блок	21660,6	8133,45	30
2	Биметаллический радиатор	16500	9509,26	25
3	Электрический конвектор	6000	22004,5	10
4	Водяной теплый пол	55000	9193,28	35
5	Электрический теплый пол	36000	19625,79	25

Из полученных данных видно, что система отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками дешевле, чем системы водяного и электрического теплого пола как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам. Водяная радиаторная система и система с использованием электрического конвектора дешевле по капитальным затратам, но имеет большие эксплуатационные расходы в сравнении со стеновым блоком. Таким образом, продолжим сравнение данных трех систем для определения сроков окупаемости и экономической эффективности системы на основе стенового блока с капиллярными трубками.

2.4 Совокупные дисконтируемые затраты для всех рассматриваемых вариантов отопительных систем определяются по формуле (4.22):

$$СДЗ = K \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right)^T + Э \cdot \left(\left(1 + \frac{p}{100}\right)^T - 1\right) \cdot \frac{100}{p}, \quad (4.22)$$

где K – капитальные затраты соответствующего варианта системы отопления, руб;

$Э$ – эксплуатационные расходы соответствующего варианта системы отопления, руб;

p – норма дисконта, %;

T – № по счету года эксплуатации, для которого определяются совокупные дисконтируемые затраты.

Полученные результаты расчета совокупных дисконтируемых затрат представлены в виде графиков на рисунке 4.10.

Точки пересечения графиков являются дисконтируемым сроком окупаемости $T_{0к}$ системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками по отношению к водяному радиаторному отоплению и электрическому конвектору.

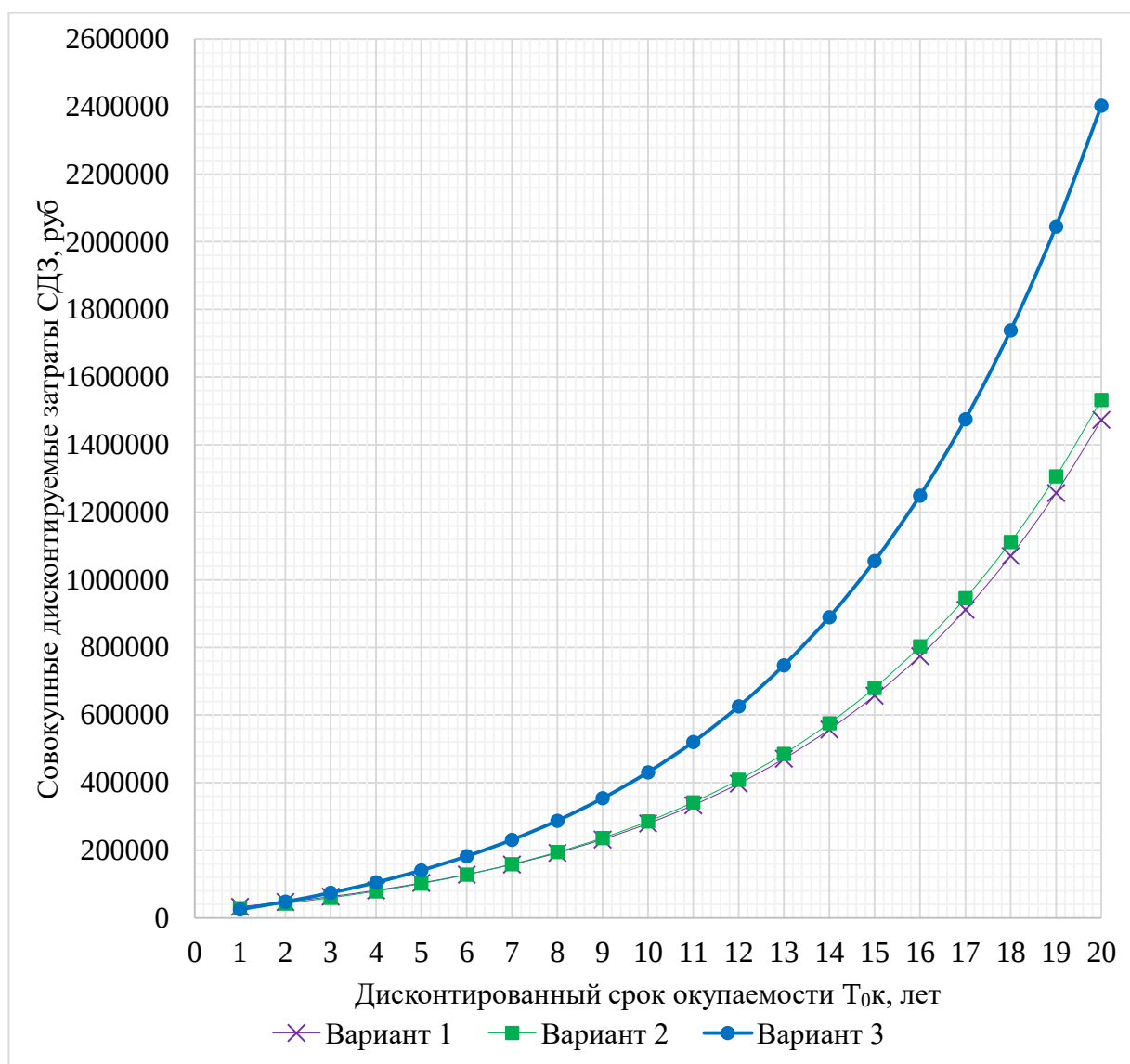


Рисунок 4.10 – График совокупных дисконтируемых затрат трех вариантов систем отопления: вариант 1 – система на основе стенового блока с капиллярными трубками; вариант 2 – радиаторная система; вариант 3 – электрический конвектор

Этап 3. Определение сроков окупаемости:

3.1 Простой срок окупаемости системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками определяется по формуле (4.23):

$$T_0 = \frac{K_1 - K_2}{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}, \quad (4.23)$$

где K_1 и K_2 – капитальные затраты 1-го и 2-го сравниваемых вариантов соответственно, руб;

$\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ – эксплуатационные расходы 1-го и 2-го сравниваемых вариантов соответственно, руб.

Таким образом, простой срок окупаемости системы на основе стенового блока с капиллярными трубками по отношению к водяной радиаторной системе составляет:

$$T_{01} = \frac{21660,6 - 16500}{9509,26 - 8133,45} = 3,75 \text{ года}. \quad (4.24)$$

В сравнении с электрическим конвектором простой срок окупаемости составит:

$$T_{02} = \frac{21660,6 - 6000}{22004,5 - 8133,45} = 1,13 \text{ года}. \quad (4.25)$$

3.2 Дисконтированный срок окупаемости сравниваемых систем определяется по формуле (4.26):

$$T_{0\kappa} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{p \cdot T_0}{100}\right)}{\ln\left(1 + \frac{p \cdot T_0}{100}\right)}, \quad (4.26)$$

где T_0 – простой срок окупаемости системы на основе стенового блока, лет;
 p – норма дисконта, %.

Таким образом, дисконтированный срок окупаемости системы на основе стенового блока с капиллярными трубками по отношению к водяной радиаторной системе равен:

$$T_{0к1} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{16,59 \cdot 3,75}{100}\right)}{\ln\left(1 + \frac{16,59 \cdot 3,75}{100}\right)} = 6,34 \text{ года}. \quad (4.27)$$

В сравнении с отоплением с помощью электрического конвектора дисконтированный срок окупаемости составит:

$$T_{0к2} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{16,59 \cdot 1,13}{100}\right)}{\ln\left(1 + \frac{16,59 \cdot 1,13}{100}\right)} = 1,35 \text{ года}. \quad (4.28)$$

Этап 4. Экономическая эффективность системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками.

4.1 Коэффициент экономической эффективности рассчитывается по формуле (4.29):

$$K_э = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{K_1 - K_2}, \quad (4.29)$$

где K_1 и K_2 – капитальные затраты 1-го и 2-го сравниваемых вариантов соответственно, руб;

$\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ – эксплуатационные расходы 1-го и 2-го сравниваемых вариантов соответственно, руб.

Таким образом, коэффициенты экономической эффективности системы на основе стенового блока с капиллярными трубками в сравнении с водяным радиаторным отоплением $K_{э1}$ и электрическим конвектором $K_{э2}$ имеют следующие значения:

$$K_{э1} = \frac{9509,26 - 8133,45}{21660,6 - 16500} = 0,27;$$

$$K_{э2} = \frac{22004,5 - 8133,45}{21660,6 - 6000} = 0,89.$$

Следовательно, система отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками на 27% более экономически эффективна, чем водяное

радиаторное отопление, и на 89% экономически эффективнее использования электрического конвектора.

4.2 Экономия годовых эксплуатационных затрат определяется по формуле (4.30):

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1, \quad (4.30)$$

где $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ – эксплуатационные расходы 1-го и 2-го сравниваемых вариантов соответственно, руб.

Относительно водяного радиаторного отопления экономия годовых эксплуатационных затрат при использовании стенового блока с капиллярными трубками составит:

$$\Delta \mathcal{E} = 9509,26 - 8133,45 = 1375,81 \text{ руб.}$$

При сравнении с электрическим конвектором данный показатель будет равен:

$$\Delta \mathcal{E} = 22004,5 - 8133,45 = 13871,05 \text{ руб.}$$

4.3 Коэффициент интенсивности использования определяется по выражению (4.31):

$$K_{\text{эн}} = 1 + \frac{T_{\text{ам}2} - T_{\text{ам}1}}{T_{\text{ам}1}}, \quad (4.31)$$

где $T_{\text{ам}1}$ и $T_{\text{ам}2}$ – срок эксплуатации 1-го и 2-го сравниваемых вариантов соответственно.

$$K_{\text{эн}1} = 1 + \frac{30 - 25}{25} = 1,2;$$

$$K_{\text{эн}2} = 1 + \frac{30 - 10}{10} = 3.$$

Следовательно, система отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками имеет в 1,2 раза больший срок эксплуатации, чем водяная радиаторная система, и в 3 раза больший срок эксплуатации, чем электрический конвектор.

Этап 5. Визуализация полученных результатов.

5.1 Используя приведенный выше алгоритм расчета, были определены сроки окупаемости для нескольких городов Российской Федерации, расположенных в разных климатических зонах. Полученные результаты представлены в виде диаграмм на рисунках 4.11, 4.12, 4.13, 4.14.

Для более удобного анализа города на диаграммах сгруппированы по климатическому признаку:

- города с умеренно-холодным климатом: Курск, Москва, Белгород, Тула, Калининград;
- города с холодным климатом: Иваново, Мурманск, Архангельск, Новосибирск, Хабаровск;
- города с теплым климатом: Ростов-на-Дону, Сочи, Астрахань, Волгоград, Ставрополь.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что наибольшая экономическая целесообразность использования системы отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками имеется в регионах с холодным климатом, где простой срок окупаемости относительно водяного радиаторного отопления находится в пределах 1,6-3,9 лет, а дисконтированный в пределах 2,1-4,8 лет. Однако, учитывая длительный срок эксплуатации данной системы в 30 лет, в регионах с умеренно-холодным и теплым климатом, где дисконтированный срок окупаемости составляет от 4,8 до 10,8 лет, ее использование позволит экономить еще минимум 20 лет.

Относительно использования электрических конвекторов во всех рассматриваемых городах, за исключением Мурманска (за счет низких тарифов на электроэнергию), дисконтированный срок окупаемости системы на основе стенового блока с капиллярными трубками не превышает 2,4 года.

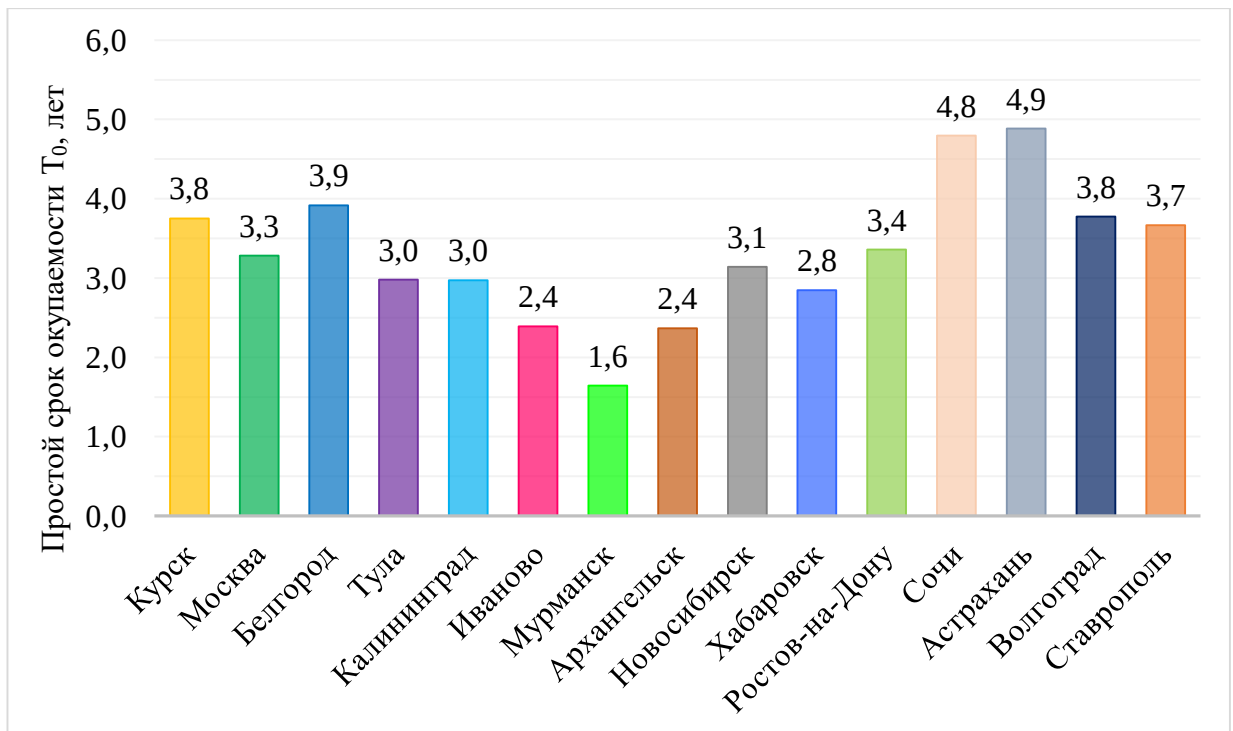


Рисунок 4.11 – Простой срок окупаемости системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками в сравнении с водяной радиаторной системой

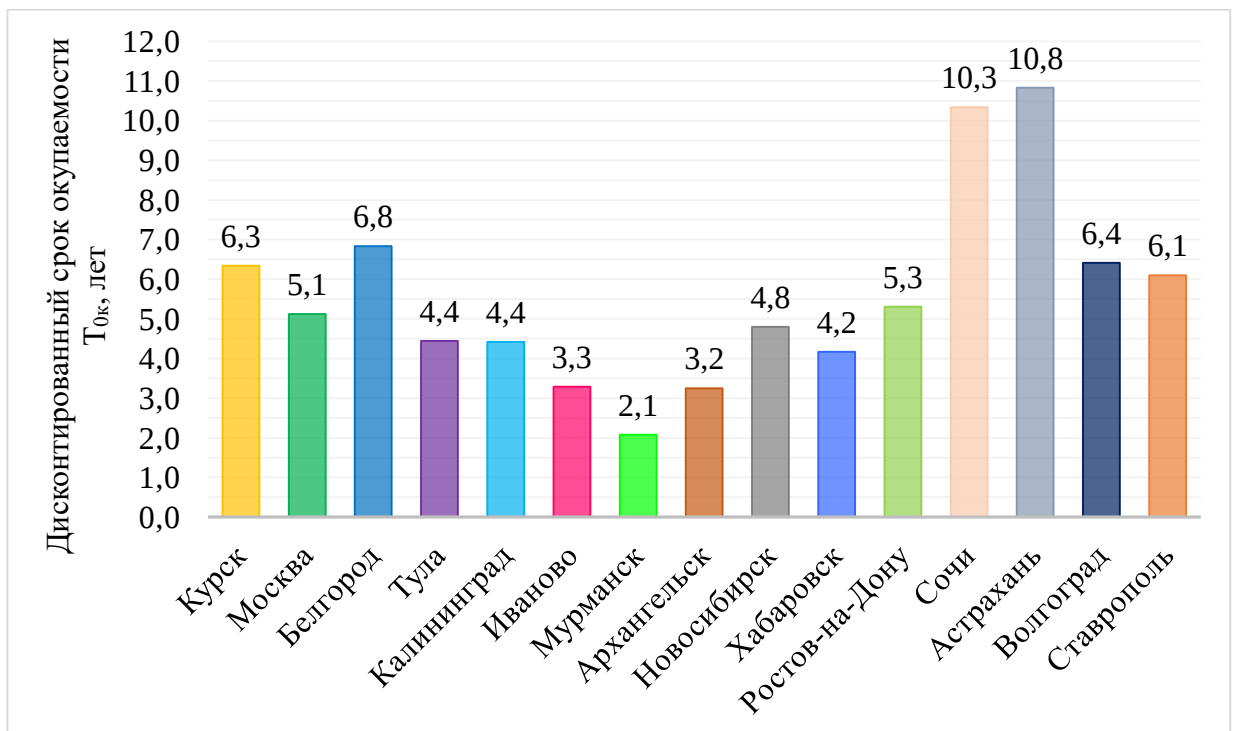


Рисунок 4.12 – Дисконтированный срок окупаемости системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками в сравнении с водяной радиаторной системой

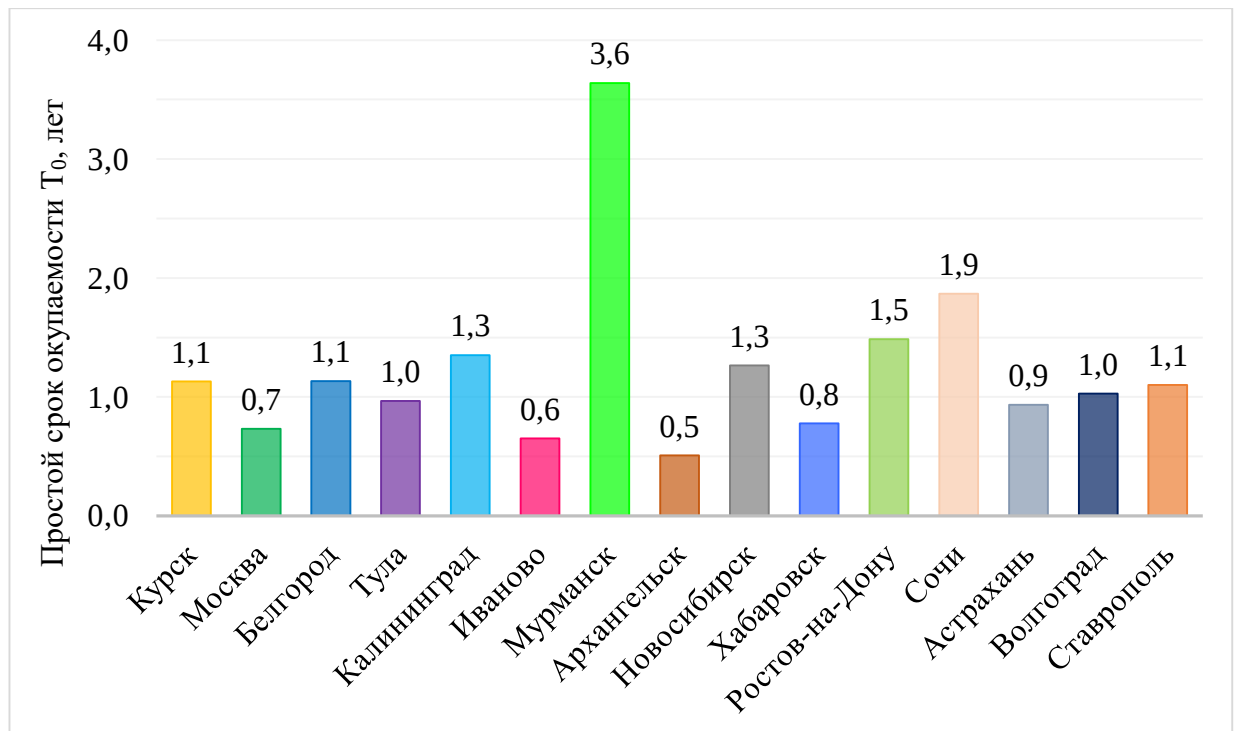


Рисунок 4.13 – Простой срок окупаемости системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками в сравнении с электрическим конвектором

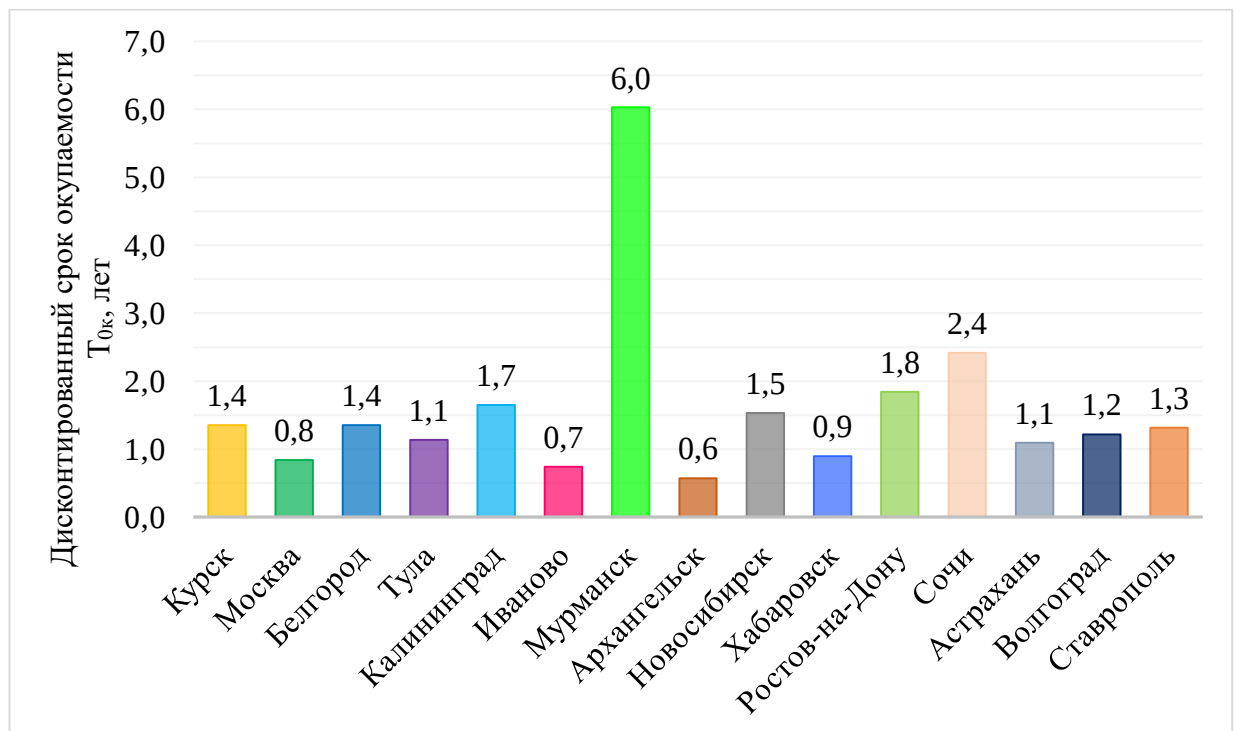


Рисунок 4.14 – Дисконтированный срок окупаемости системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками в сравнении с электрическим конвектором

5.2 Экономия денежных средств за срок эксплуатации сравниваемых систем на 1 м² отапливаемого помещения определяется по формуле (4.32):

$$\Delta S = \frac{CDZ_{2\Sigma} - CDZ_{1\Sigma}}{S_{ном}}, \quad (4.32)$$

где $CDZ_{1\Sigma}$, $CDZ_{2\Sigma}$ – сумма совокупных дисконтируемых затрат 1-го и 2-го сравниваемых вариантов соответственно за весь период эксплуатации систем, $S_{ном} = 15 \text{ м}^2$ – площадь рассматриваемого помещения.

Результаты расчетов представлены на рисунках 4.15 и 4.16.

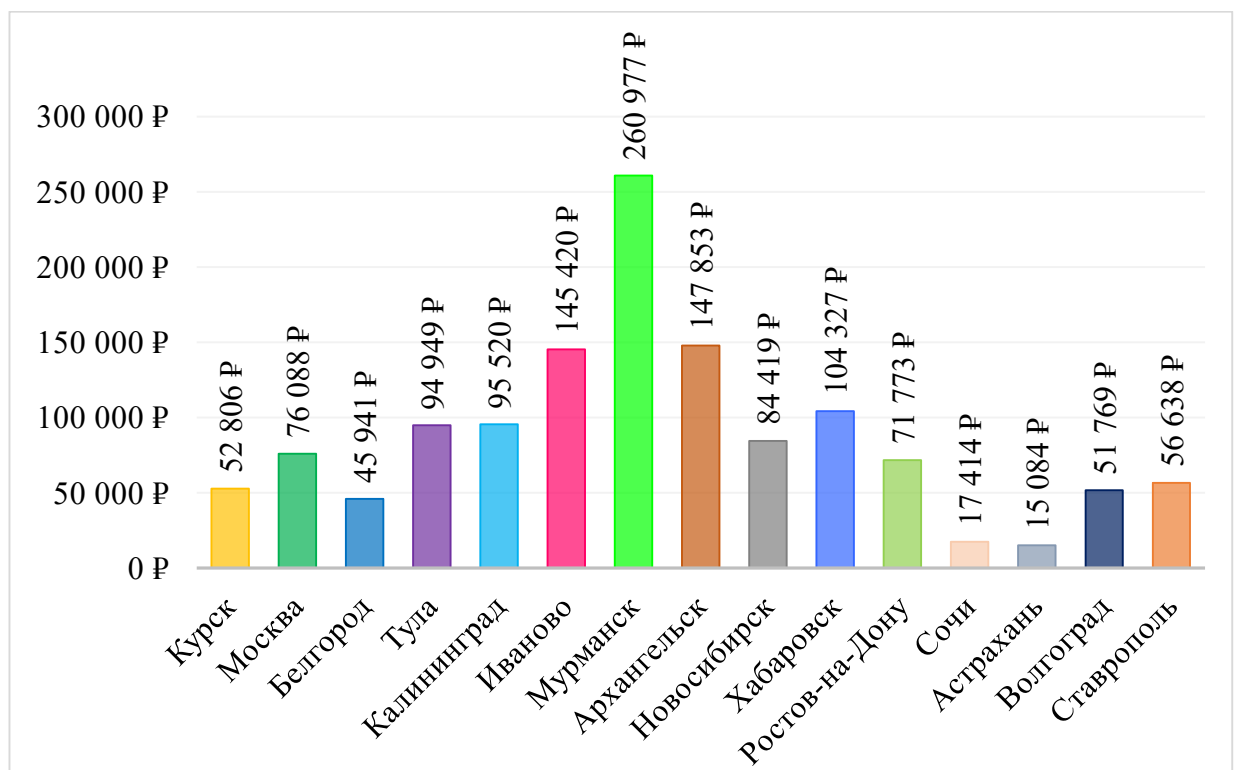


Рисунок 4.15 – Экономия денежных средств на 1 м² отапливаемого помещения в сравнении с водяной радиаторной системой

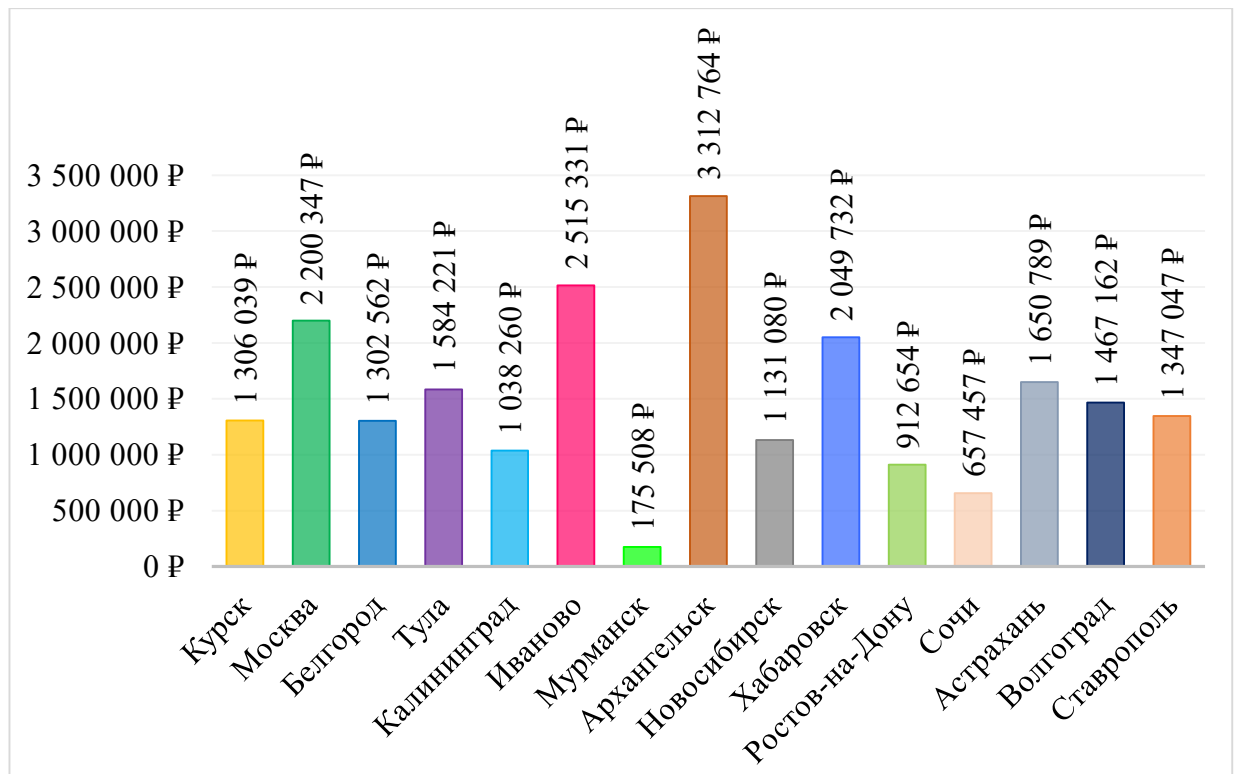


Рисунок 4.16 – Экономия денежных средств на 1 м² отапливаемого помещения в сравнении с электрическим конвектором

4.4 Выводы

1. Разработана методика проведения промышленного испытания стенового блока с системой капиллярных трубок, которая позволяет определить характеристики испытуемого образца для сравнения их с заявленными параметрами.
2. Предложен алгоритм инженерного подбора стенового блока, включающий выбор количества секций, длины капиллярных трубок, а также параметров температуры и расхода теплоносителя для получения наиболее эффективного соотношения параметров (количества секций, температуры и массового расхода теплоносителя), позволяющего обеспечить требуемый уровень теплового комфорта.
3. Представлен порядок расчета экономических показателей системы отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками, результаты которого говорят о том, что капитальные и эксплуатационные затраты в

сравнении данной системы ниже, чем у систем водяного и электрического теплого пола, а в сравнении с радиаторным отоплением и отоплением с помощью электрического конвектора сроки окупаемости составляют от 0,6 до 10,8 лет в зависимости от региона, что значительно меньше расчетного срока эксплуатации стенового блока, составляющего 30 лет. При этом наибольшая экономическая целесообразность использования системы на основе стенового блока имеется в регионах с холодным климатом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена конструкция стенового блока с системой капиллярных трубок, состоящая из листов внешнего покрытия, между которыми находятся секции капиллярных трубок, соединенные коллекторами, каждая из которых состоит из 30 капиллярных трубок, расположенных с интервалов 0,015 м, которая позволяет добиться равномерного прогрева поверхности блока, при котором наибольшая разность температур между наиболее и наименее нагретой зоной не превышает 2 °С, и равномерного распределения температуры в помещении, при котором максимальная разность температур по высоте составляет 3,8 °С, что значительно меньше, чем при использовании радиаторного водяного отопления. При этом потери давления в системе не превышают потерь давления, характерных для систем водяного радиаторного отопления и систем водяного теплого пола.

2. В результате численного моделирования в программной среде SolidWorks FlowSimulation получены термодинамические и гидродинамические характеристики стенового блока с системой капиллярных трубок, анализ которых говорит о равномерном заполнении системы капиллярных трубок теплоносителем при равномерном прогреве его поверхности. При температуре теплоносителя на входе 40 °С разность с температурой на выходе составила 4,5 °С, средняя температура поверхности стенового блока составила 29 °С. При этом воздух в помещении прогрелся в среднем до 23 °С. За счет того, что большая часть тепла при использовании данной системы передается радиационным путем, отсутствуют мощные конвективные потоки, а скорость движения воздуха в помещении не превышает нормативный показатель 0,15 м/с.

3. На основе полученной регрессионной зависимости температуры теплоносителя на выходе из стенового блока с системой капиллярных трубок от температуры теплоносителя на входе в диапазоне 40-50°С, массового расхода теплоносителя от 0,0055 до 0,0083 кг/с и диаметра капиллярных

трубок 0,003-0,006 м построены графики, анализ которых показывает, что как при повышении температуры теплоносителя на входе, так и при увеличении массового расхода теплоносителя наблюдается тенденция к росту температуры теплоносителя на выходе, а диаметр капиллярных трубок практически не оказывает влияния на данный параметр, поэтому было принято среднее значение исследуемого диапазона диаметров равное 0,0045 м. При этом было выявлено, что интенсивность роста температуры теплоносителя на выходе выше при увеличении температуры теплоносителя на входе, чем при увеличении массового расхода, а рост массового расхода приводит к снижению разницы температур теплоносителя на входе и выходе из системы, что свидетельствует о снижении теплоотдачи. Максимальное снижение температуры было выявлено при температуре теплоносителя на входе 47 °С и составило 2 °С.

4. Получена регрессионная зависимость средней температуры поверхности стенового блока с системой капиллярных трубок от температуры теплоносителя на входе и массового расхода теплоносителя, на основе которой были построены графики, анализ которых показывает, что интенсивность роста средней температуры поверхности блока выше при увеличении температуры теплоносителя, чем при увеличении массового расхода. Погрешность при выполнении экспериментальных исследований не превысила 5%.

5. Разработан алгоритм инженерного подбора стенового блока с системой капиллярных трубок, который позволяет определить требуемые характеристики блока для отопления жилых помещений с учетом их геометрии и условий окружающей среды, а также подобрать необходимые параметры теплоносителя для обеспечения требуемого значения температуры воздуха в помещении.

6. Выполнены расчеты экономической эффективности внедрения предложенной системы водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками, в результате которых было определено следующее:

– капитальные вложения на внедрение системы на основе стеновых блоков с капиллярными трубками ниже, чем при использовании систем водяного и электрического теплого пола на 33 тыс. руб. и 14 тыс. руб. соответственно;

– эксплуатационные расходы при использовании предлагаемой системы на основе стеновых блоков с капиллярными трубками за счет меньших амортизационных расходов ниже, чем у систем водяного радиаторного отопления на 1,4 тыс.руб/год и водяного теплого пола на 1 тыс.руб/год, при этом разница с системами электрического теплого пола и электрическим конвектором достигает 14 тыс.руб/год;

– расчет простого и дисконтированного сроков окупаемости системы говорит о том, что наибольшая экономическая целесообразность внедрения предлагаемой системы существует в регионах с холодным и умеренно-холодным климатом с температурой воздуха наиболее холодной пятидневки от -18°C до -24°C и продолжительностью отопительного сезона от 184 до 203 дней, где срок окупаемости составляет от 1,6 до 3,9 лет;

– экономия денежных средств за срок эксплуатации системы в сравнении с водяным радиаторным отоплением в указанных регионах составляет от 45 941 до 260 977 руб/м².

Рекомендации. Предложенная система отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками может применяться для отопления помещений с пониженными температурными графиками. Данная система позволяет использовать низкопотенциальные источники энергии. Применение стеновых блоков на внутренних стенах жилых помещений позволяет регулировать перетоки тепла между соседними помещениями с разным требуемым уровнем температуры воздуха и обеспечивает равномерное распределение тепла в помещении.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Аналитический обзор методов повышения энергоэффективности систем водяного отопления

t_{su} – результирующая температура помещения, °C

t_p – температура воздуха внутри помещения, °C

t_r – радиационная температура внутри помещения, °C

v_{θ} – скорость движения воздуха, м/с

φ – относительная влажность воздуха, %

φ_{q-i} – коэффициенты облученности с человека в сторону окружающих поверхностей с температурой t_i

t_i – температура внутренней поверхности ограждений помещения и отопительных приборов с площадью внутренней поверхности F_i , °C

ε_s – коэффициент излучения поверхности, на которой располагаются капиллярные трубки

ε_i – коэффициент излучения поверхности, теплообмен с которой необходимо рассчитать

S_s – площадь поверхности, на которой располагаются капиллярные трубки, м²

S_i – площадь поверхности, теплообмен с которой необходимо рассчитать, м²

F_{i-s} – угловой коэффициент лучистой составляющей теплообмена между поверхностью, на которой располагаются капиллярные трубки и поверхностью, теплообмен с которой необходимо рассчитать

q_{λ} – лучистая составляющая теплообмена, Вт

t_s – средняя температура поверхности, на которой располагаются капиллярные трубки, °C

t_i – средняя температура поверхности, теплообмен с которой необходимо рассчитать, °C

d_r – гидравлический диаметр нагреваемой поверхности, м

ΔT – разность температур между нагреваемой поверхностью и средней температурой воздуха в помещении, К

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴)

A_1 и A_2 – площади поверхностей, м²

T_1 и T_2 – температуры поверхностей, К.

t_m – средняя температура теплоносителя, °С

t_v – температура воздуха отапливаемого помещения, °С

t_n – температура поверхности греющей стены, °С

δ – толщина слоя материала, расположенного над системой капиллярных трубок, м

λ – теплопроводность слоя, Вт/(м·°С)

S – интервал между соседними капиллярными трубками, м

q – удельная тепловая мощность капиллярной системы отопления, Вт/м²

Теоретические исследования характеристик стенового блока с системой капиллярных трубок

t – время, с

u – скорость текучей среды, м/с

ρ – плотность текучей среды, кг/м³

P – давление текучей среды, Па

S_i – внешние массовые силы, действующие на единицу массы текучей среды, кг/м·с²

E – полная энергия единичной массы текучей среды, Дж

Q_H – количество тепла, выделяемого тепловым источником в единичном объеме среды, Вт·с

τ_i – тензор вязких сдвиговых напряжений, Па

q_i – диффузионный тепловой поток, Вт/м²

$S_{iporous}$ – массовая сила сопротивления пористого тела, кг/м·с²

$S_{igravity}$ – массовая сила гравитации, кг/м·с²

$S_{rotation}$ – массовая сила вращения системы координат, $\text{кг/м} \cdot \text{с}^2$

μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$

δ_{ij} – дельта-функция Кронекера

k – кинетическая энергия турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^2$

C_μ – расстояние от поверхности стенки, м

g_i – составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении x_i , м/с^2

P_B – дополнительный генерационный член, который учитывает влияние сил плавучести на турбулентность

Экспериментальные исследования характеристик стенового блока системы капиллярного водяного отопления

t_{cp} – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$

$P_{атм}$ – давление окружающей среды, Па

$t_{вх}$ – температура теплоносителя на входе в экспериментальный блок, $^\circ\text{C}$

$t_{вых}$ – температура теплоносителя на выходе из экспериментального блока, $^\circ\text{C}$

$t_{нов}$ – температура поверхности экспериментального блока, $^\circ\text{C}$

G – массовый расход теплоносителя через экспериментальный блок, кг/с

d – диаметр капиллярных трубок, м

k – количество факторов

n_0 – количество опытов в центре плана

α – величина звездного плеча

b_i – коэффициент регрессионного уравнения

S_{bi} – среднеквадратичное отклонение

$S_{восн}^2$ – дисперсия воспроизводимости

t_i – критерий Стьюдента

$S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности

δ – погрешность результатов измерений, %

δ_G – погрешность при измерении массового расхода теплоносителя, %

$\delta_{вх}$ – погрешность при измерении температуры теплоносителя на входе, %

$\delta_{вых}$ – погрешность при измерении температуры теплоносителя на выходе, %

$\delta_{повi}$ – погрешность при измерении температуры поверхности блока, %

δ_m – методическая погрешность, %

Промышленное испытание оборудования. Алгоритм подбора стенового блока с системой капиллярных трубок (инженерный расчет). Технико-экономическое обоснование применимости разработанных средств

Δt_{Δ} – снижение температуры теплоносителя после прохождения его через систему капиллярных трубок, °С

$t_{пов\Delta}$ – температура на поверхности стенового блока, °С

$\delta_{\Delta t}$ – расхождение между заявленным значением Δt и фактическим значением Δt_{Δ} , %

δ_t – расхождение между заявленной температурой на поверхности стенового блока $t_{пов}$ и фактической температурой $t_{пов\Delta}$, %

$Q_{ном}$ – тепловые потери помещения, Вт

S_n – полезная площадь стенового блока, м²

A – высота стены для установки блока, м,

B – ширина стены для установки блока, м

A' – полезная высота стены для установки блока, м,

B – полезная ширина стены для установки блока, м

$l_{кап}$ – длина капиллярных труб, м

$n_{секц}$ – количество секций капиллярных трубок, шт

S_n' – уточненная полезная площадь стенового блока, м²

q – требуемый удельный тепловой поток, Вт/м²

t – абсолютное значение температуры, °С

G – абсолютное значение массового расхода, кг/с

$C_{тепл}$ – тариф на тепловую энергию, руб./Гкал

$C_{эл}$ – тариф на электроэнергию для населения

p – норма дисконта, %

$Q_{от}$ – требуемая тепловая мощность отопительной системы, Вт

Q – годовая потребность в тепле, Вт

$t_{вн}$ – среднее значение температуры воздуха в помещении в отопительный период, °C

$t_{ср}$ – среднее значение температуры наружного воздуха в отопительный период, °C

$t_{от}$ – температура наружного воздуха по параметру Б, °C

n – продолжительность отопительного периода, день/год

S_{pi} – стоимость материалов на изготовление i -того элемента системы, руб

$S_{раб.i}$ – стоимость рабочих операций на изготовление i -того элемента системы, руб

$S_{мон}$ – стоимость работ по монтажу системы, руб

K – капитальные затраты на строительство системы, руб

$\mathcal{E}$ – эксплуатационные затраты системы, руб.

$\mathcal{E}_{эн}$ – эксплуатационные затраты на тепловую, либо электрическую энергию в зависимости от используемой системы, руб

$\mathcal{E}_{ам}$ – годовые амортизационные расходы системы, руб.

$T_{ам}$ – расчетный срок эксплуатации системы, лет

T – № по счету года эксплуатации, для которого определяются совокупные дисконтируемые затраты

T_0 – простой срок окупаемости, лет

$T_{0к}$ – дисконтируемый срок окупаемости, лет

$K_э$ – коэффициент экономической эффективности

$\Delta \mathcal{E}$ – экономия годовых эксплуатационных затрат, руб.

$K_{эн}$ – коэффициент интенсивности использования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменев, П. Н. Отопление и вентиляция: учебник для вузов. В 2-х ч., ч. 1. Отопление. Изд. 3-е, перераб. и доп. / П. Н. Каменев, А. Н. Сканави, В. Н. Богословский и др. – Москва : Стройиздат, 1975. – 483 с. – Текст : непосредственный.
2. Сканави А. Н. Отопление : учебник для вузов. / А. Н. Сканави, Л. М. Махов – Москва : АСВ, 2008. – 576 с. – Текст : непосредственный.
3. Крафт, А.Г. Системы низкотемпературного отопления: Перевод с немецкого С.Г. Булкина. – Москва: Стройиздат, 1983. – 108 с. – Текст : непосредственный.
4. Усадский, Д.Г. Совершенствование схем автономных источников теплоты в системах отопления и горячего водоснабжения: специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Усадский Денис Геннадиевич; Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. – Волгоград, 2011. – 197 с. : ил. – Место защиты: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. – Текст : непосредственный.
5. Зайцев, О. Н. Проектирование систем водяного отопления: пособие для проектировщиков, инженеров и студентов технических ВУЗов / О. Н. Зайцев, А.П. Любарец. – Вена-Киев-Одесса : Herz, 2008. – 201 с.: ил. – Текст : непосредственный.
6. Солнышкова, Ю.С. Совершенствование систем радиационного отопления зданий с целью сбережения энергетических ресурсов: специальность 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Солнышкова Юлия Сергеевна; Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2012. – 165 с. : ил. – Место защиты: Ивановский

государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Текст : непосредственный.

7. Зайцев, О.Н. Совершенствование систем низкотемпературного водяного отопления при количественно-качественном регулировании теплоносителя / О. Н. Зайцев, Л. В. Петрекевич, Д. М. Лукьянченко – Текст : непосредственный. // Строительство и техногенная безопасность. – 2014. – № 51. – С. 109-112. – EDN VMKEWF.

8. Зайцев, О.Н. Низкотемпературные системы отопления жилых зданий / О.Н. Зайцев, И.П. Ангелюк. – Текст : непосредственный // Строительство и техногенная безопасность. – 2011. – № 37. – С. 118-122.

9. Ангелюк, И.П. Теплоисточники низкотемпературных систем отопления жилых зданий / И.П. Ангелюк – Текст : непосредственный // Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Современные экологически безопасные и энергосберегающие технологии в природопользовании». – Киев: Изд-во КНУСА, 2011. – Часть.1. – С. 171-174.

10. Российская Федерация. Законы. О теплоснабжении : Федеральный закон от 27.07.2010 г. №190-ФЗ (ред. от 08.08.2024) – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2010. – №31. – Ст. 4159.

11. Российская Федерация. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003. (ред. от 17.05.25) : утвержден Приказом Минстроя России от 30.12.2020 №921/пр : введен в действие с 01.06.2021. – Москва: Минстрой России, 2025. – 141 с. – Текст : непосредственный.

12. Российская Федерация. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях (ред. от 20.12.2022) : утвержден Приказом Росстандарта от 12.07.2012 №191-ст : введен в действие

с 01.01.2013 – Москва: Стандартинформ, 2023. – 16 с. – Текст : непосредственный.

13. Российская Федерация. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 07.12.2009 №573-ст : введен в действие с 01.07.2019 – Москва: Стандартинформ, 2019. – 43 с. – Текст : непосредственный.

14. Российская Федерация. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. СП 510.1325800.2022. Тепловые пункты и системы внутреннего теплоснабжения : свод правил : утвержден Приказом Минстроя России от 25.01.2022 №42/пр : введен в действие с 26.02.2022. – Москва: Минстрой России, 2022. – 77 с. – Текст : непосредственный.

15. Российская Федерация. Законы. О внесении изменений в Федеральный закон «О теплоснабжении». Федеральный закон от 30.12.2021 № 438-ФЗ – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2021. – №27. – Ст. 5176.

16. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. Федеральный закон от 23.10.2009 № 261-ФЗ (ред. от 31.07.2025) – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – №48. – Ст. 5711.

17. Кузьмин А. В. Теплоснабжение : учебное пособие / А. В. Кузьмин, М. Р. Феткуллов. – Ульяновск : УлГТУ, 2022. – 206 с. – Текст : непосредственный.

18. Панферов, С. В. К выводу уравнений регулирования и анализу особенностей гидравлических режимов открытых систем теплоснабжения без регуляторов расхода на абонентских вводах / С. В. Панферов, В. И. Панферов

– Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 47-56. – DOI 10.14529/build230306. – EDN PSIPTG.

19. Блинов А. В. Способы повышения эффективности работы открытой сети систем отопления и горячего водоснабжения в нормальных и экстремальных ситуациях / А. В. Блинов, А. Н. Корпусов, В. А. Валуйский, Д. В. Горелов – Текст : непосредственный. // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2021. – № 1(13). – С. 405-413. – EDN MCAHEJ.

20. Карпова, Ю. А. Методика теплового расчета систем водяного отопления / Ю. А. Карпова – Текст : непосредственный // Символ науки: международный научный журнал. – 2023. – № 5-1. – С. 20-26. – EDN BMLGGW.

21. Усиков, С. М. Изменение характеристики сопротивления контура системы водяного отопления в процессе эксплуатации / С. М. Усиков – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : Сборник докладов Первой Национальной конференции, Москва, 30 сентября 2020 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – С. 902-907. – EDN JCFVGY.

22. Синиченко, А. С. Системы водяного обогрева индивидуальных домов, тенденции развития обогрева помещений / А. С. Синиченко, К. Е. Бубликов, Д. Ю. Соколов – Текст : непосредственный // Студенческая наука - взгляд в будущее: материалы XV Всероссийской студенческой научной конференции, Красноярск, 26–27 марта 2020 года. Том Часть 2. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2020. – С. 111-113. – EDN RJVVZE.

23. Лушин, К. И. Об изменении промышленных и потребительских требований к отопительным приборам систем водяного отопления / К. И. Лушин – Текст : непосредственный // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2021. – № 4(232). – С. 54-56. – EDN PKTTLH.

24. Усиков, С. М. Оценка необходимости установки автоматических регуляторов перепада давления на двухтрубных стояках системы водяного отопления с точки зрения возникновения шума / С. М. Усиков, В. В. Дютин – Текст : непосредственный // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 2(48). – С. 197-203. – EDN CXYTIZ.

25. Элесханов Р. Р. Теплотери с перегретой части стены под радиатором / Р. Р. Элесханов, Э. М. Муратбеков – Текст : непосредственный // Экология и строительство. – 2018. – № 1. – С. 27–32.

26. Ульянов, А. Д. Система автоматического регулирования температуры в системе отопления школы города Братска / А. Д. Ульянов, А. Ю. Баева – Текст : непосредственный // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2022. – Т. 1. – С. 24-27. – EDN RSNAYV.

27. Середа, С. Н. Дистанционное управление системой автономного отопления / С. Н. Середа – Текст : непосредственный // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 6-2. – С. 283-287. – DOI 10.17513/snt.38102. – EDN QWSLZZ.

28. Олжабаева, Н. С. Разработка гелиоколлектора для обеспечения горячей водой коттеджных домов / Н. С. Олжабаева, Е. Б. Жаркенов – Текст : непосредственный // Universum: технические науки. – 2021. – № 12-6(93). – С. 29-31. – EDN OVFDQE.

29. Иванченко, В. В. Эффективное использование гелиоколлекторов в системах теплоснабжения в Сибирском регионе / В. В. Иванченко, В. А. Баранов, Н. В. Вяткина, Н. М. Дорохова – Текст : непосредственный // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 8, № 2. – С. 133-137. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-8-2-133-137. – EDN TTAYWL.

30. Долгов, Н. В. Экспериментальные исследования потокораспределения в комбинированной системе горячего водоснабжения с гелиоколлектором / Н. В. Долгов – Текст : непосредственный // Вестник

Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2022. – № 5(157). – С. 98-108. – EDN RTTOPW.

31. Рыбак, В. А. Автоматизированный комплекс обеспечения тепловой энергией загородного дома с использованием гелиоколлекторов / В. А. Рыбак, И. М. Римарев – Текст : непосредственный // Проблемы инфокоммуникаций. – 2023. – № 2(18). – С. 24-30. – EDN IEZJAS.

32. Кувшинов, В. В. Экспериментальные исследования плоских солнечных коллекторов, используемых для нужд автономных потребителей в южных регионах Российской Федерации / В. В. Кувшинов, Е. Г. Какушина, А. П. Кулемина [и др.] – Текст : непосредственный // Энергетические установки и технологии. – 2020. – Т. 6, № 2. – С. 51-57. – EDN HQXVXJ.

33. Жабборов, Ф. Б. Газовый котел отопления - плюсы и минусы / Ф. Б. Жабборов – Текст : непосредственный // Аллея науки. – 2022. – Т. 1, № 4(67). – С. 62-64. – EDN JLFXOD.

34. Хилов, И. В. Анализ эффективности эксплуатации двухконтурных настенных бытовых газовых котлов / И. В. Хилов, А. Ш. Акулова – Текст : непосредственный // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 23. – С. 148-151. – EDN AIWFSE.

35. Торопов, А. Л. Настенный газовый конвекционный котел с атмосферной горелкой двойной модуляции / А. Л. Торопов – Текст : непосредственный // Строительство: наука и образование. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 50-61. – DOI 10.22227/2305-5502.2022.2.4. – EDN TZWLYM.

36. Пазушкина, О. В. Проектирование поквартирной системы отопления / О. В. Пазушкина, А. А. Воронина, К. А. Кольцова – Текст : непосредственный // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2022. – Т. 2, № 3(7). – С. 29-32. – DOI 10.51639/2713-0576_2022_2_3_29. – EDN RLSHOU.

37. Торопов, А. Л. К вопросу о перспективах развития электрического поквартирного теплоснабжения / А. Л. Торопов – Текст : непосредственный //

Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2022. – Т. 8, № 2. – С. 9-18. – EDN WPIUJE.

38. Имашов, М. Б. Особенности теплового режима многоквартирных жилых зданий с поквартирной системой отопления на базе индивидуальных газовых теплогенераторов / М. Б. Имашов, С. М. Рахманова, Д. К. Мукарапова, А. Р. Рахатбеков – Текст : непосредственный // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2023. – № 1(65). – С. 730-736. – DOI 10.56634/16948335.2023.1.730-536. – EDN OESHLJ.

39. Торопов, А. Л. Применение электрических котлов для водяного поквартирного теплоснабжения / А. Л. Торопов – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 9. – С. 1451-1465. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.9.1451-1465. – EDN OLBEDO.

40. Торопов, А. Л. Использование электрических котлов с иерархическим управлением нагрузкой для поквартирного теплоснабжения / А. Л. Торопов – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 11. – С. 1488-1498. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.11.1488-1498. – EDN ANDYIY.

41. Торопов, А. Л. Гидравлическая и тепловая устойчивость работы автономных систем поквартирного теплоснабжения / А. Л. Торопов – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 7. – С. 944-953. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953. – EDN QWQWXX.

42. Тренин, А. А. Преимущественные аспекты принципа работы конденсационных газовых котлов в сравнении с традиционными газовыми котлами / А. А. Тренин – Текст : непосредственный // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2019. – № 2(40). – С. 64-68. – EDN GOMPDY.

43. Шелепова, Р. С. Сравнение эффективности применения конвекционного котла и конденсационного котла в низкотемпературной системе отопления жилого дома / Р. С. Шелепова – Текст : непосредственный // Современные проблемы науки и образования : Материалы XI

Международной студенческой научной конференции, Москва, 01 декабря 2018 года – 23 2019 года. Том XIV. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Евразийская научно-промышленная палата", 2019. – С. 46-47. – EDN AIURZK.

44. Зинов, И. А. Сравнительный анализ отопительных систем на базе электрокотла, газового котла и теплового насоса для климатических условий Г. Ижевск / И. А. Зинов, А. И. Зинова – Текст : непосредственный // Технологическое и художественное образование учащейся молодежи: проблемы и перспективы : Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, Бирск, 21 мая 2020 года. – Уфа: Восточная печать, 2020. – С. 186-194. – EDN AVLLAX.

45. Маханбетали, Ж. Н. Анализ эффективности отопления частных домов с применением тепловых насосов / Ж. Н. Маханбетали, А. Е. Дулатбаев – Текст : непосредственный // Вестник науки. – 2024. – Т. 1, № 9(78). – С. 217-225. – EDN BITDQF.

46. Меладзе, В. Энергоэффективность стальных панельных радиаторов в низкотемпературных системах отопления / В. Меладзе – Текст : непосредственный // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2015. – № 9(165). – С. 44-45. – EDN XCOFCX.

47. Ищенко, А. В. Водяные теплые полы, как альтернативная система отопления в многоквартирном строительстве / А. В. Ищенко, Д. В. Шишкунова, Т. М. Юн – Текст : непосредственный // Строительное производство. – 2020. – № 1. – С. 60-64. – DOI 10.54950/26585340_2020_1_60. – EDN NMQYMX.

48. Никитин, Г. Д. Анализ энергосбережения при применении напольного водяного отопления / Г. Д. Никитин – Текст : непосредственный // Наука и современное общество: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 ноября 2021 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2021. – С. 35-38. – EDN AITKRN.

49. Кудрявцева, А. И. Влияние конструктивных параметров системы водяного теплого пола на тепловые характеристики / А. И. Кудрявцева, О. В. Аверьянова // Неделя науки ИСИ : Сборник материалов всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 01–04 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – С. 186-189. – EDN ZJTWPP.

50. Грималовская, И. П. Особенности применения водяного «теплого пола» в качестве самостоятельной системы отопления индивидуального жилого дома / И. П. Грималовская, М. С. Морозов, А. В. Бешляга, В. А. Гавай – Текст : непосредственный // Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий : Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 25–27 апреля 2023 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 219-222. – EDN APBEVM.

51. Аверина, Н. М. Сравнительный анализ эффективности водяного и электрического теплых полов: экономические и технические аспекты / Н. М. Аверина Текст : непосредственный // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года : Материалы докладов научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 12–16 февраля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2024. – С. 142-146. – EDN PZOKZK.

52. Базунов, Е. П. Экономическое сравнение электрических и водяных теплых полов / Е. П. Базунов, В. Ю. Кравчук – Текст : непосредственный // Строительство: наука и образование. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 15-23. – DOI 10.22227/2305-5502.2021.1.2. – EDN ZAJHIA.

53. Абдуллина, А. А. Сравнение электрического и водяного теплого пола / А. А. Абдуллина, А. А. Чуксеева // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика : материалы

докладов : в 3 т., Казань, 06–07 декабря 2022 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 426-428. – EDN YJRBIG.

54. Суханов, К. О. Обеспечение теплового режима отапливаемых помещений плинтусными системами водяного отопления: Специальность 2.1.3. «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Суханов Кирилл Олегович; Санкт-Петербургский Государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург, 2021. – 135 с. : ил. – Место защиты: Санкт-Петербургский Государственный архитектурно-строительный университет. – Текст : непосредственный.

55. Миллер, В. В. Плинтусная система отопления / В. В. Миллер, Т. В. Федюнина – Текст : непосредственный // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения : Материалы X Национальной конференции с международным участием, Саратов, 23–24 апреля 2020 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2020. – С. 130-132. – EDN JEYUER.

56. Богословский, В.Н. Тепловой режим здания. / В.Н. Богословский – Москва: Стройиздат, 1979. – 248 с. – Текст : непосредственный.

57. Короянов, А.В. Водяное отопление жилых помещений на основе стеновых блоков с капиллярными трубками / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев – Текст : непосредственный // Инженерные системы зданий и сооружений : Материалы I Международной научно-технической конференции, Уфа. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2026. – С. 122-125.

58. Короянов, А.В. Система капиллярного водяного отопления в стеновых блоках / А. В. Короянов – Текст : непосредственный // Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды : Материалы XIII Международной научно-технической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых , Уфа, 10–12 апреля 2024 года. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. – С. 128-133.

59. Волошин, С. А. Лучистые климатические системы. Особенности проектирования / С. А. Волошин – Текст : непосредственный // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2013. – № 2. – С. 88-92. – EDN PYISFJ.

60. Захаров, Н. И. Исследование теплообмена в помещении при использовании капиллярных матов в качестве отопительной системы / Н. И. Захаров, Г. Н. Афонина – Текст : непосредственный // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов, Москва, 12–13 марта 2020 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2020. – С. 659. – EDN UJIRMP.

61. Zmrhal, V. Hydraulic properties of capillary mats used for low-energy cooling and heating of buildings / V. Zmrhal, T. Matuška – Text : unmediated // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 61. – P. 105232. – DOI 10.1016/j.jobbe.2022.105232. – EDN WDETEM.

62. Шишкин, А. В. Исследование работы потолочно-капиллярной системы отопления / А. В. Шишкин, С. А. Зенин, П. В. Мешалова, Н. А. Белехова – Текст : непосредственный // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тезисы докладов Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 17–19 марта 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2022. – С. 546. – EDN CKKEQX.

63. Бодров, М. В. Системы лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей для текстильной промышленности / М. В. Бодров, М. С. Морозов, А. А. Смыков – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 6(390). – С. 168-174. – EDN TCJBBW.

64. Khrestianovskaia, M. V. Radiant heating and cooling systems based on capillary micro tubes / M. V. Khrestianovskaia, M. A. Rodionova, G. A. Gabitova – Text : unmediated // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2017. – No. 9(60). – P. 31-43. – EDN YMHFKE.

65. A new high temperature, high heating rate, low axial gradient capillary heater / K. P. Marshall, H. Emerich, Ch. J. Mcmonagle [et al.] – Text : unmediated // Journal of Synchrotron Radiation. – 2023. – Vol. 30, No. 1. – P. 267-272. – DOI 10.1107/s1600577522009845. – EDN OKGFSJ.

66. Жгун, Ю. В. Опыт применения капиллярных матов в Германии для повышения энергетической эффективности и обеспечения необходимого микроклимата зданий / Ю. В. Жгун – Текст : непосредственный // Студенческий вестник. – 2020. – № 3-5(101). – С. 59-61. – EDN KAGIJA.

67. Макунина, К. В. Потолочные водяные панели лучистого отопления / К. В. Макунина – Текст : непосредственный // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. – 2022. – Т. 1, № 1(47). – С. 98-102. – EDN RLZXKI.

68. Руин, А. Е. Исследование характеристик различных потолочных излучателей в системах лучистого отопления / А. Е. Руин, А. А. Смыков, М. В. Бодров – Текст : непосредственный // Строительство - формирование среды жизнедеятельности : Сборник материалов семинара молодых учёных XXIV Международной научной конференции, Москва, 22–24 апреля 2021 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2021. – С. 173-179. – EDN KOWWSV.

69. Бодров, М. В. Исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей для энергоэффективных систем лучистого отопления / М. В. Бодров, Д. А. Кузнецов, А. А. Смыков, А. Е. Руин – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 2. – С. 160-167. – DOI 10.22337/2077-9038-2023-2-160-167. – EDN UDCIRF.

70. Широков, В. А. Энергоэффективные системы обеспечения микроклимата зданий на основе использования холодных потолков /

В. А. Широков, А. В. Исанова, Н. Ю. Авдеева – Текст : непосредственный // Студент и наука. – 2023. – № 1(24). – С. 113-117. – EDN KMYWIR.

71. Попова, А. Ю. Особенности системы кондиционирования холодный потолок / А. Ю. Попова, С. А. Попов – Текст : непосредственный // Образование. Наука. Производство : Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 155-157. – EDN NSXMTF.

72. Жуликов, А. А. Принцип работы и виды монтажа холодных потолков / А. А. Жуликов, В. В. Мартынов – Текст : непосредственный– Текст : непосредственный // Интернаука. – 2022. – № 47-4(270). – С. 9-11. – EDN VBEDTC.

73. Трошкин, К. А. Система «холодные потолки» для кондиционирования частного дома / К. А. Трошкин, Е. В. Драбкина – Текст : непосредственный // Поколение будущего : сборник избранных статей Международной студенческой научной конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября 2021 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2021. – С. 74-79. – EDN MFSAWL.

74. Numerical Simulation of Heat Transfer Characteristics of Capillary Radiant Heating Floor / Sh. Fu, Ya. Pan, X. Wan [et al.] – Text : unmediated // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2024. – Vol. 28, No. 2. – P. 546-556. – DOI 10.1007/s12205-024-1518-1. – EDN LKZYGA.

75. Distribution characteristics of particles in room with capillary radiant floor heating system / X. Luo, F. Ren, H. Ma [et al.] – Text : unmediated // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 65. – P. 105731. – DOI 10.1016/j.jobbe.2022.105731. – EDN VUNKTE.

76. Bolotin, K. Model of radiant capillary heating and cooling system / K. Bolotin, A. Jakovics, J. Telicko – Text : unmediated // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2423, No. 1. – P. 012013. – DOI 10.1088/1742-6596/2423/1/012013. – EDN IXBJCK.

77. Шишкин, А. В. Разработка методики для расчета теплопередачи потолочных водяных капиллярных систем низкотемпературного отопления / А. В. Шишкин, П. В. Мешалова, Ю. В. Яворовский, Е. В. Жигулина – Текст : непосредственный // Энергетические системы. – 2022. – № 2. – С. 29-40. – DOI 10.34031/ES.2022.2.004. – EDN DHSVLG.

78. Incropera, F. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer/ F. P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine – 8th Edition. – N.Y.: Wiley, 2019. – 992 p. – Text : unmediated.

79. Howell, J. R. Thermal Radiation Heat Transfer / J. R. Howell, M. P. Mengüç, K. J. Daun, R. Siegel – 7th ed. Boca Raton – Oxon: CRC Press, 2020. – 1040 p. – Text : unmediated.

80. Owen, M.S. ASHRAE Handbook-HVAC Systems and Equipment (SI Edition) / Owen M.S. – ASHRAE, 2016. – 1000 p. – Text : unmediated.

81. Zhang, L. Experimental evaluation of a suspended metal ceiling radiant panel with inclined fins / L. Zhang, X. H. Liu, Y. Jiang – Text : unmediated // Energy and Buildings. – 2013. Vol. 62. – P. 522-529. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.03.044.

82. Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room / F. Causone, S.P. Corgnati, M. Filippi, B.W. Olesen – Text : unmediated // Energy and Buildings. 2009. № 6 (41). С. 622-628. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.01.004.

83. Peeters, L. Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations / L. Peeters, I. Beausoleil-Morrison, A. Novoselac – Text : unmediated // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43, No. 9. – P. 2227-2239. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.002.

84. Awbi, H. B. Natural convection from heated room surfaces / H. B. Awbi, A. Hatton – Text : unmediated // Energy and Buildings. – 1999. – Vol. 30. No 3. – P. 233-244. – DOI: 10.1016/s0378-7788(99)00004-3.

85. REHAU. Системы обогрева и охлаждения поверхностей. Техническая информация 850.660 RU 05.05 – Москва: ООО «REHAU», 2021. – 140 с. – Текст : непосредственный.

86. Radiant capillary heat exchangers – power calculation for optimal heating and cooling / S. Gendelis, J. Teličko, A. Jakovičs, I. Bukans – Text : unmediated // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2423, No. 1. – P. 012011. – DOI 10.1088/1742-6596/2423/1/012011. – EDN NTCDAP.

87. Аверкова, О.А. Математическое моделирование течения вблизи экранированного бортового отсоса / О. А. Аверкова, Д. Н. Крутикова, И. Н. Логачев [и др.] – Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 9. – С. 96-102. – EDN WLSVED.

88. Мелькумов, В. Н. Математическое моделирование воздушных потоков в помещениях больших объемов / В. Н. Мелькумов, А. В. Лобода, С. В. Чуйкин – Текст : непосредственный // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2(34). – С. 11-18. – EDN SEFJRB.

89. Кобелев, Н. С. Математическое моделирование ресурсосберегающего оборудования при выполнении проектирования и реконструкции технологических систем производства, транспортирования и потребления энергоресурсов предприятиями и жилыми зданиями : (по выполнению кандидатских и магистерских диссертаций) / Н. С. Кобелев, С. Г. Емельянов, В. Н. Кобелев [и др.]. – Курск : Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2018. – 231 с. – ISBN 978-5-907049-06-2. – EDN XMTRQD. – Текст : непосредственный.

90. Щукина, Т. В. Моделирование и выбор рациональных способов интенсификации тепломассообмена в регенеративных теплообменниках:

специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Щукина Татьяна Васильевна; Воронежская государственная архитектурно-строительная академия. – Воронеж, 1994. – 153 с. – Место защиты: Воронежская государственная архитектурно-строительная академия. – Текст : непосредственный.

91. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов [и др.]. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с. : ил. – Текст : непосредственный.

92. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. / А.А Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2015. – 562 с. – Текст : непосредственный.

93. Алямовский, А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 464 с. – Текст : непосредственный.

94. Ангелюк, И. П. Совершенствование низкотемпературных систем отопления жилых зданий на основе рекуперативных теплообменных аппаратов: специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ангелюк Илья Павлович; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2021. – 198 с. : ил. – Место защиты: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Текст : непосредственный.

95. Крутов, В. И. Основы научных исследований / В. И. Крутов, И. М. Грушко, В. В. Попов и др.; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – Москва: Высшая школа, 1989. – 400 с. : ил. – ISBN 5-06-000043-5 – Текст : непосредственный.

96. Короянов, А.В. Система водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев – Текст : непосредственный // Вопросы эффективности в различных отраслях : Материалы международного научного семинара , Брест, БрГТУ 17 апреля 2025 года. / Под ред. В. Г. Новосельцева, Д. В. Новосельцевой, П. В. Северянина – Брест : УП «Брестоблгаз», 2025. – С. 85-86.

97. Короянов, А.В. Совершенствование системы водяного капиллярного отопления / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев, А. П. Бурцев, А. П. Бурцев – Текст : непосредственный // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 24-36. – DOI 10.21869/2223-1560-2025-29-2-24-36. – EDN HBGNVN.

98. Короянов, А. В. Исследование системы отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев – Текст : непосредственный // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – № 2(72). – С. 46-54. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/72.4. – EDN CINWYZ.

99. Xuelai, L. Simulation study on capillary asymmetric radiant heating system / Xuelai Liua, Lina Shia, Yongan Li – Text : unmediated // Procedia Engineering – 2017. – Vol. 205 – P. 2215–2222. – DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.051.

100. Chen, J. Comparative experimental analysis of capillary radiant heating on indoor environment / J. Chen, Q. Liang, N. Li, Y. Gao – Text : unmediated // Tumu Jianzhu yu Huanjing Gongcheng/Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering – 2018. – Vol. 40, No. 2. – P. 88-94. – DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.02.014.

101. Weibin, K. Experimental investigation on a ceiling capillary radiant heating system / K. Weibin, M. Zhao, L. Xing, M. Xiangzhao, Z. Lianying, H. Wangyyang – Text : unmediated // Energy Procedia – 2015. – Vol. 75. – P. 1380-1386. – DOI:10.1016/j.egypro.2015.07.220.

102. Weng, W. B. Characteristic Analysis of Ceiling Radiant Heating of Capillary Tube / W. B. Weng, J. Yu, T. K. Zhang – Text : unmediated // Advanced Materials Research. – 2011. – Vols. 389-390. – P. 6042-6047. – DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.6042.

103. Feng G. Capillary network low-temperature wall radiant heating system based on solar water / G. Feng, J. Cui, K. Huang, H. Li / Shenyang Jianzhu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) – Text : unmediated / Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science). – 2013. – Vol. 29, No. 2. – P. 320-326.

104. Chuck, Yu Performance comparison of capillary mat radiant and floor radiant heating systems assisted by an air source heat pump in a residential building / Yu Chuck, Z. Min, K. Weibin, L. Xilian – Text : unmediated // Indoor and Built Environment 26(9). – 2016. – Vol. 26, No. 9. – P. 1292-1304. – DOI:10.1177/1420326X16674517.

105. Российская Федерация. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения : утвержден Постановлением Госстандарта России от 23.04.2002 №161-ст : введен в действие с 01.11.2002 – Москва: Стандартинформ, 2009. – 32 с. – Текст : непосредственный.

106. Российская Федерация. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ГОСТ Р 53583-2009 Приборы отопительные. Методы испытаний : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15.12.2009 №893-ст: введен в действие с 01.06.2010 – Москва: Стандартинформ, 2010. – 11 с. – Текст : непосредственный.

107. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон от 26.06.2008 г. №102-ФЗ – Текст : непосредственный // – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2010. – №26. – Ст. 3021.

108. Короянов, А. В. Экспериментальное исследование стенового блока с капиллярными трубками для системы водяного отопления / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев – Текст : непосредственный // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2026. – № 3(38). – С. 38-46.

109. Короянов, А. В. Экспериментальное исследование температуры поверхности стенового блока с системой капиллярных трубок / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев – Текст : непосредственный // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2026. – Т. 30, № 2. – С. 67-78. – DOI 10.21869/2223-1560-2026-30-2-67-78. – EDN YRQQED.

110. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по программам бакалавриата 22.03.02 и магистратуры 22.04.02 направления «Металлургия» / Н. А. Спирин, В. В. Лавров, Л. А. Зайнуллин [и др.] ; Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Издание 2-е переработанное и дополненное. – Екатеринбург : ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с. – ISBN 978-5-9904848-4-9. – EDN WCTGGT. – Текст : непосредственный.

111. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва: Издательство «Наука», 1976. – 279 с. – Текст : непосредственный.

112. Koroyanov, A. V. Application of the eddy current method for flaw detection of conductive tracks of printed circuit boards / V. Malikov, P. Shmykova, A. Koroyanov [et al.] – Text : unmediated // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2697, No. 1. – P. 012073. – DOI 10.1088/1742-6596/2697/1/012073. – EDN SLFCMF.

113. Ваулин, С. Д. Теория инженерного теплофизического эксперимента : учебное пособие / С. Д. Ваулин, И. А. Волошина ; С. Д. Ваулин, И. А. Волошина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Южно-Уральский государственный университет, Кафедра "Двигатели летательных аппаратов". – Челябинск : Изд-

во ЮУрГУ, 2005. – ISBN 5-696-02967-1. – EDN QJOFEВ. – Текст : непосредственный.

114. Тюрин, Ю.Н. Статистический анализ данных на компьютере : учебное пособие / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров. – Москва: Издательство МЦНМО, 2016. – 268 с., ил. – ISBN 978-5-4439-1011-6 – Текст : непосредственный.

115. Тепловизор Testo 868: Руководство по эксплуатации. – Москва: ООО «ТэстоРус», 2019. – 54 с. – Текст : непосредственный.

116. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий., И. А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с., ил. – ISBN 5-283-04513-7 – Текст : непосредственный.

117. Зайдель, А.Н. Погрешности измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Ленинград: Наука, 1985. – 112 с., ил. – Текст : непосредственный.

118. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений / С.Г . Рабинович. – Ленинград: Энергия, 1978. – 258 с., ил. – Текст : непосредственный.

119. Аленкова, И. В. Основы инженерного эксперимента в инновационной сфере / И. В. Аленкова. – Москва : Компания КноРус, 2018. – 74 с. – ISBN 978-5-4365-2531-0. – EDN YYEVWP. – Текст : непосредственный.

120. Холян, А. М. Введение в инженерное исследование: учебное пособие / А. М. Холян, М. П. Рудницкий. – Свердловск: УПИ, 1984. – 93 с. – Текст : непосредственный.

121. Бояршинова, А. К. Теория инженерного эксперимента : текст лекций / А. К. Бояршинова, А. С. Фишер ; А. К. Бояршинова, А. С. Фишер ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Южно-Уральский гос. ун-т, Каф. "Автомобильный трансп.". – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 82 с. – EDN QMFTYX. – Текст : непосредственный.

122. Российская Федерация. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и

контроль качества продукции. Основные термины и определения: утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 08.12.1981 №5297: введен в действие с 01.01.1982 – Москва: Стандартинформ, 2011. – 24 с. – Текст : непосредственный.

123. Паньтелеев, А. А. Методика и требования к проведению пилотных испытаний на промышленных предприятиях / А. А. Пантелеев, А. В. Жадан, А. А. Фомин, Д. А. Шаповалов – Текст : непосредственный // Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии : материалы IX международной научно-практической конференции, Нижнекамск, 05–07 апреля 2016 года. – Нижнекамск: Публичное акционерное общество "Нижнекамскнефтехим", 2016. – С. 11-12. – EDN WIPFFT.

124. Русин, А. Ю. Обработка информации в системе испытаний промышленного оборудования на надёжность / А. Ю. Русин, М. Абдулхамед – Текст : непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 4(56). – С. 27-33. – EDN TLQHEN.

125. Котел отопительный водогрейный. Паспорт и руководство по эксплуатации. – Москва: ООО «Лемакс», 2020. – 24 с. – Текст : непосредственный.

126. Wilo: Инструкция по монтажу и эксплуатации. – Москва: ООО «ВилоРус», 2019. – 20 с. – Текст : непосредственный.

127. Счётчики холодной и горячей воды крыльчатые многоструйные МВС. Руководство по эксплуатации – Москва: ООО «Водомер», 2023. – 15 с. – Текст : непосредственный .

128. Манометр показывающий ТМ, ТВ, ТМВ, ТМТБ. Паспорт и инструкция по эксплуатации. – Москва: ЗАО «Росма», 2014. – 2 с. – Текст : непосредственный.

129. Датчики температуры КТХА, КТХК, КТНН, КТЖК, КТМК и КТХА Ех, КТХК Ех, КТНН Ех, КТЖК Ех, КТМК Ех. Руководство по эксплуатации. – Обнинск: ПК «Тесей», 2014. – 85 с. – Текст : непосредственный.

130. Кран шаровой муфтовый латунный для воды. Паспорт / Руководство по эксплуатации. – Москва: ООО «Теплосеть-импорт», 2014. – 10 с. – Текст : непосредственный.

131. Измеритель температуры цифровой АКТАКОМ АТЕ-9380. Паспорт изделия (прибора). Руководство по эксплуатации. – Москва: ЗАО «НПП Эликс», 2008. – 8 с. – Текст : непосредственный.

132. Богословский В. Н. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3ч. Часть I. Отопление : справочник проектировщика. / В. Н. Богословский, Б. А. Крупнов, А. Н. Сканапи и др.; Под ред. И. Г. Старовойтова, Ю. И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1990. – 344 с.: ил. – Текст : непосредственный.

133. Зайцев, О. Н. К вопросу реализации вычислений при проектировании систем ОВК в рамках ТИМ / О. Н. Зайцев, И. П. Ангелюк, В. О. Смиян – Текст : непосредственный // Методология безопасности среды жизнедеятельности : Сборник научных трудов XVIII Международной научно-практической конференции, Симферополь, 22–25 октября 2025 года. – Симферополь: ООО "Издательство Типография "Ариал", 2025. – С. 532-534.

134. Удовиченко, В. М. Интеграция BIM-технологий с системами отопления зданий / В. М. Удовиченко – Текст : непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : Материалы Национальной научно-практической конференции, Тюмень, 18–19 декабря 2025 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2025. – С. 258-261.

135. Суханова, И. И. Анализ гидравлического и аэродинамического расчётов систем отопления и вентиляции на основе BIM-моделирования / И. И. Суханова, В. С. Гнедых, Д. А. Демшина – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9(60). – С. 6.

136. Российская Федерация. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. СП 131.13330.2025. Строительная климатология. СНиП 23-01-99* : свод правил : утвержден Приказом Минстроя России от

08.08.2025 №470/пр : введен в действие с 09.09.2025. – Москва: Стандартинформ, 2025. – 238 с. – Текст : непосредственный.

137. Российская Федерация. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. СП 54.13330.2022 Здания жилые многоквартирные. СНиП 31-01-2003 : свод правил : утвержден Приказом Минстроя России от 13.05.2022 №361/пр : введен в действие с 14.06.2022. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 60 с. – Текст : непосредственный.

138. Российская Федерация. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. О включении в федеральный реестр сметных нормативов информации о федеральных единичных расценках и отдельных составляющих к ним : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24.06.2021 № 408/пр. – 1 с. – Текст : непосредственный.

139. Веселкина, Е. Н. Сравнение энергоэффективности и экономической целесообразности газового и электрического отопления на примере частного дома / Е. Н. Веселкина, Р. К. Гусев, Н. Д. Цветнов – Текст : непосредственный // Шаг в науку. – 2018. – № 2. – С. 124-128. – EDN JPIXPL.

140. Малявина Е. Г. Теплотери здания: справочное пособие / Е. Г. Малявина – Москва: АВОК-ПРЕСС, 2011. – 144 с. – Текст : непосредственный.

141. Вагин, Г. Я. Методика технико-экономического обоснования внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий и оборудования в промышленности / Г. Я. Вагин, Н. Н. Головкин, Е. Б. Солнцев, А. А. Лямин – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2005. – № 6. – С. 8-13. – EDN HSWYYT.

142. Подлевских, А. П. Методика технико-экономического обоснования внедрения ресурсо-энергосберегающих технологий и оборудования на предприятиях технического сервиса / А. П. Подлевских, С. Р. Прохончуков, А. Л. Фролов – Текст : непосредственный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11-1. – С. 15-21. – EDN SUEEJT.

143. Хоменко, В. В. Методика технико-экономического обоснования программ технологического обеспечения высокотехнологичных инновационных проектов на ранних стадиях жизненного цикла / В. В. Хоменко – Текст : непосредственный // Технология машиностроения. – 2014. – № 2. – С. 64-68. – EDN SCCHJV.

144. Коссова, Т. В. Оценка ставки дисконтирования для государственных инвестиционных проектов в России / Т. В. Коссова, М. А. Шелунцова – Текст : непосредственный // Вопросы экономики. – 2024. – № 5. – С. 21-37. – DOI 10.32609/0042-8736-2024-5-21-37. – EDN ZMVKRZ.

145. Гумерова, Э.И. Ставка дисконтирования для оценки эффективности проекта в кризисных и посткризисных условиях экономики / Э.И. Гумерова – Текст : непосредственный // StudArctic Forum. – 2017. – № 1 (5). – С. 121-130. – DOI: 10.15393/j102.art.2017.784.

Приложение А. Акт о внедрении в образовательный процесс результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
Юго-Западного государственного
университета, доктор технических
наук, профессор
О.Г. Локтионова
22 июля 2026 г.



о внедрении в образовательный процесс
результатов диссертационной работы
Короянова Алексея Викторовича

Комиссия в составе:

председатель – к.т.н., доцент, врио декана факультета энергетических систем Павлов Е.В.

члены комиссии – начальник учебно-методического управления, к.х.н., доцент Протасов В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой инфраструктурных теплоэнергетических систем Зайцев О.Н. составили акт о том, что результаты диссертационной работы «Совершенствование системы водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками» соискателя ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» Короянова А.В. используются в образовательном процессе бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», магистров направления подготовки 08.04.01 «Строительство», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» при изучении дисциплин: «Отопление», «Теплоснабжение», «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологии», «Децентрализованное отопление и горячее водоснабжение», «Термодинамические и тепломассообменные процессы в теплоэнергетике».

Члены комиссии



Павлов Е.В.

Протасов В.В.

Зайцев О.Н.

Приложение Б. Акт о внедрении результатов диссертационной работы ООО «ПРАЙМКЕЙ»



ООО «ПРАЙМКЕЙ»
305000, г. Курск, ул. Радищева, д. 24а, оф. 27
Тел.: +7 (4712) 200-120
ИНН 4632247458 КПП 463201001
ОГРН 1184632011530
www.primekey.tech
info@primekey.tech



Исх. №374/2026 от 07.07.2026

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Короянова Алексея Викторовича

Комиссия в составе:

председатель – Мигунов Юрий Юрьевич

члены комиссии – главный инженер Калайдов С.М., руководитель технологического отдела, Конарев А.В., аспирант кафедры инфраструктурных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» Короянов А.В. составили настоящий акт о том, что при проектировании объектов «Промышленный комплекс по производству фармацевтических субстанций на площадке ОЭЗ ППТ «Калуга» и «Завод по производству готовых лекарственных форм на площадке ОЭЗ ППТ «Моглино» были использованы результаты диссертационной работы «Совершенствование системы водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками».

Используемые методы расчета и конструктивные решения являются актуальными, имеют научную новизну и могут быть применены при проектировании низкотемпературных систем отопления.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения данных конструктивных решений – повышение энергоэффективности отопительных систем и сокращение энергопотребления объектов.

Члены комиссии

Мигунов Ю.Ю.

Калайдов С.М.

Конарев А.В.

Ознакомлен

Короянов А.В.

**Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы
ООО «ЕВРОКЛИМАТ 2000»**

ООО «ЕВРОКЛИМАТ 2000»

305025 г. Курск, ул. Магистральный пр., д. 32 а, оф. 17

Тел.: +7 (4712) 78-78-70

ИНН 4632128676 КПП 463201001

ОГРН 1114632000614

ek46.ru; info@ek46.ru

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Короянова Алексея Викторовича

Результаты диссертационного исследования «Совершенствование системы водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками», выполненного аспирантом кафедры инфраструктурных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» Корояновым Алексеем Викторовичем, нашли практическое применение в рамках сотрудничества с компанией ООО «Евроклимат 2000».

Совместная работа была направлена на разработку и внедрение стенового блока с системой капиллярных трубок для низкотемпературного отопления жилых помещений зданий.

Примененные конструктивные решения обладают научной новизной и рекомендованы к использованию в производственной программе ООО «Евроклимат 2000» при создании нового поколения энергоэффективного оборудования для систем низкотемпературного отопления.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения включает расширение ассортимента предприятия за счет выпуска конкурентоспособной инновационной продукции с улучшенными технико-экономическими характеристиками и укрепление позиций на рынке энергосберегающих технологий.

Директор



Зайцев Е.А.

01.07.2026

