

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

Научный руководитель:

Зайцев Олег Николаевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Кочев Алексей Геннадьевич,
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Теплогазоснабжение», заведующий кафедрой;

Саргсян Самвел Володяевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция», заведующий кафедрой

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского**»

Защита диссертации состоится «25» декабря 2026 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по адресу: 394006, Воронежская область, г. Воронеж, улица 20-летия Октября, дом 84, корпус 2, ауд. 2228.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте ВГТУ: <http://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «23» октября 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



С. В. Чуйкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Инженерные системы обеспечения микроклимата являются одним из основополагающих элементов технологического суверенного 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 более 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 перспективных вариантов систем отопления, которые бы с одной стороны позволяли 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, А.Н. Сканави, В.Н. Богословского, низкотемпературных отопительных систем – А.Г. Крафта.

Вопросами применения низкотемпературных отопительных систем занимались О.Н. Зайцев, И.П. Ангелюк. В работах А.В. Ищенко, Г.Д. Никитина рассматриваются системы водяного теплого пола, относящиеся к лучистым системам отопления.

Вопросами использования лучистых климатических систем в последнее время занимались С.А. Волошин, М.В. Бодров, К.В. Макунина, А.Е. Руин, О.А. Аверкова, К.И. Логачев, вопросами капиллярного водяного отопления – Н.И. Захаров, А.В. Шишкин, М.В. Хрестьяновская, К. Р. Marshall, Chuck Yu, использованием капиллярных систем для кондиционирования воздуха в помещении – В.А. Широков, А.Ю. Попова, А.А. Жуликов, К.А. Трошкин. Вопросам математического и численного моделирования капиллярных отопительных систем посвящены работы А.В. Шишкина, В.М. Уляшева, Sh. Fu, S. Gendelis.

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 в уменьшению мощно-

сти конвективного потока от нагревательных проборов, что изменило аэродинамику движения воздуха в помещении (в данном случае, инфильтрирующий воздух закрывал нагревательный прибор, который по нормативным требованиям должен располагаться в местах наибольших теплопотерь).

Таким образом, теоретическое и экспериментальное исследование термодинамических и гидродинамических характеристик системы капиллярного водяного отопления, встраиваемой в стеновые блоки, представляет собой актуальную научную задачу.

Цель и задачи работы: Целью работы является совершенствование 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 сформулированы **следующие задачи:**

1) Выполнить обзор существующих систем отопления жилых зданий для выявления достоинств и недостатков каждой 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 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.

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

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

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Выявлено, что в современных системах отопления при снижении температурного режима и уменьшения 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. Предложена 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 $40-50^{\circ}\text{C}$, массового расхода теплоносителя от 0,0055 до 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 численного моделирования (расхождения не превышают 5%).

4. Определена регрессионная зависимость средней температуры поверхности стенового блока с системой капиллярных трубок от температуры теплоносителя на входе в диапазоне $40-50^{\circ}\text{C}$ и массового расхода теплоносителя от 0,0055 до 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 Flow

Simulation 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. Разработанный алгоритм инженерного подбора стенового блока с системой капиллярных труб внедрен в практику проектирования ООО «Евроклимат 2000», ООО «Праймкей» и использован 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, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 185 страницах машинописного текста, содержит 19 таблиц, 69 рисунков, 3 приложения, библиографический список состоит из 145 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертационной работе представлено обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ наиболее распространенных систем водяного отопления с выявлением их достоинств и недостатков. Особое внимание уделено системам капиллярного водяного отопления.

Выявлено, что наиболее распространенные на данный момент системы радиаторного водяного отопления создают неравномерное распределение температур по отапливаемому помещению, а также вызывают мощные конвективные потоки в местах установки отопительных приборов, что отрицательно влияет на параметры микроклимата в помещении.

На основании зависимости, представленной на рис. 1 определено, что достижение комфортных параметров микроклимата возможно только с изменением радиационной температуры помещения, которое могут обеспечить лучистые системы отопления, к которым относятся системы капиллярного водяного отопления.

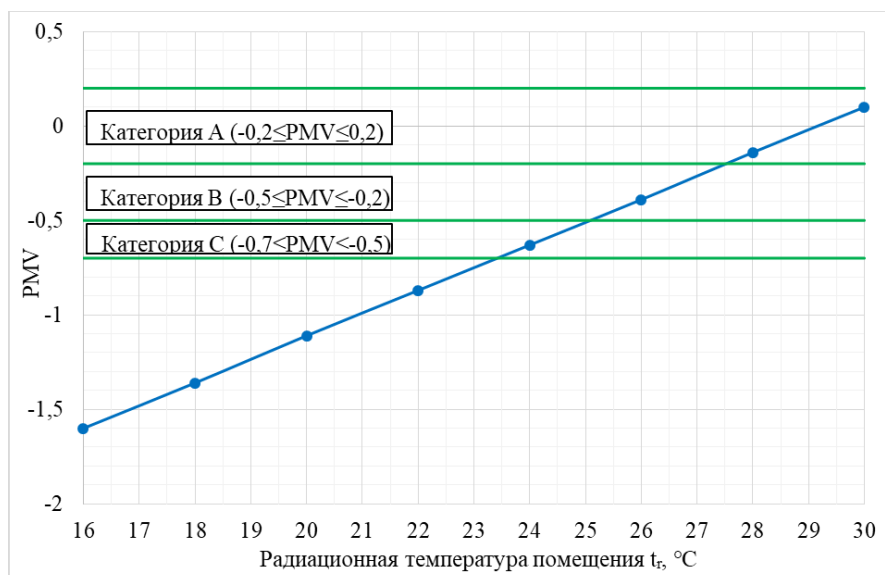


Рис 1. Прогнозируемая средняя оценка качества воздушной среды

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.

В результате проведенного анализа было выявлено, что 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.

Во второй главе предложена оригинальная конструкция стенового блока с системой капиллярных трубок (рис. 2-3), а также представлены результаты численного моделирования термодинамических и гидродинамических процессов в данной системе.

Конструкция стенового блока с системой капиллярных трубок разработана с учетом требований, учитывающих равномерное заполнение системы теплоносителем, равномерный прогрев поверхности стенового блока, минимизацию расхода тепла в сторону соседних помещений от отапливаемого помещения; равномерный прогрев воздуха в отапливаемом помещении, достижение потерь давления в разрабатываемой системе, сопоставимых с потерями давления в системах радиаторного водяного отопления и системах водяного теплого пола.

Для выполнения численного моделирования предложенной системы использовался программный комплекс SolidWorks Flow Simulation. Моделирование выполнено на основе уравнений Навье-Стокса, в рамках $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

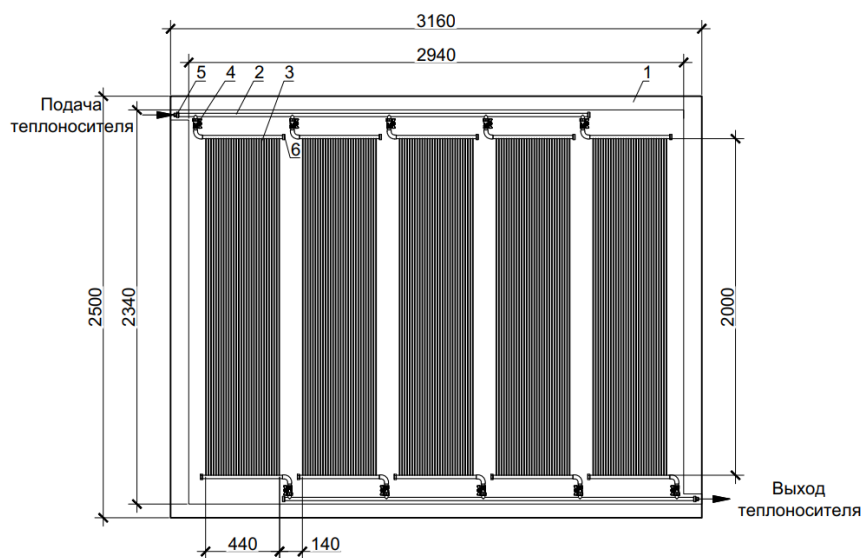


Рис. 2 Общий вид предлагаемой конструкции стенового блока с системой капиллярных трубок. 1 - лист гипсокартона; 2 - коллектор; 3 - секция капиллярных трубок; 4 - вентиль; 5 - переходная муфта; 6 - заглушка

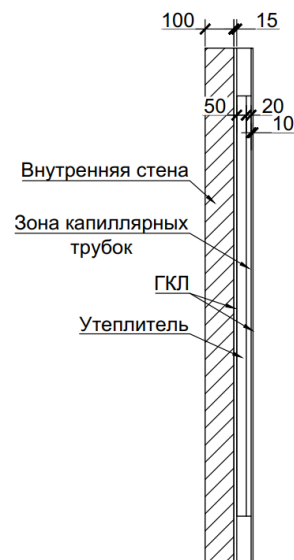


Рис. 3. Разрез стенового блока, совмещенного с внутренней стеной помещения

Для выполнения расчетов были заданы следующие материалы:

- система капиллярных трубок: полипропилен;
- утеплитель: пенополистирол;
- стеновой блок: гипсокартон.

Граничные условия для выполнения расчетов:

- давление на входе в систему: 303,9 кПа;
- температура теплоносителя на входе в систему: 40 °С;
- массовый расход теплоносителя на выходе из системы: 0,0083 кг/с.

В качестве критерия для завершения расчета была выбрана сходимость следующих целей:

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

Размер ячеек расчетной сетки: 0,03 м.

В результате численного моделирования были получены следующие картины распределения температур в системе капиллярных трубок (рис. 4), на поверхности стенового блока (рис. 5), в разрезе стенового блока, совмещенного со стеной помещения (рис. 6).

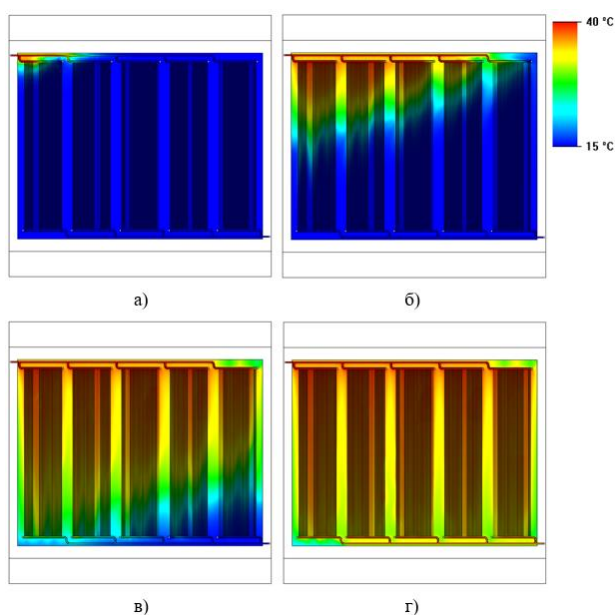


Рис. 4. Распределение температур в системе капиллярных трубок по мере заполнения теплоносителем (время: а – 60 секунд; б – 180 секунд; в – 420 секунд; г– 600 секунд)

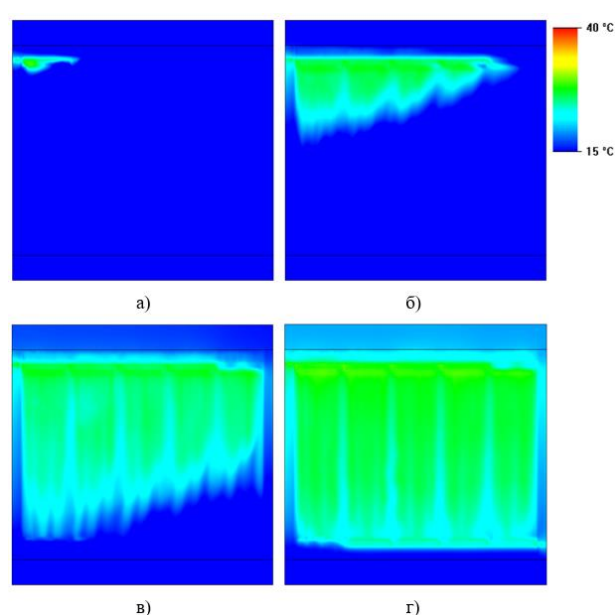


Рис.5. Распределение температур на поверхности блока по мере заполнения системы теплоносителем (время: а – 60 секунд; б – 180 секунд; в – 420 секунд; г– 600 секунд)

Анализ полученных картин (рис. 4-5) показал, что заполнение системы капиллярных трубок теплоносителем происходит равномерно, вследствие чего происходит равномерный нагрев поверхности блока. Разница в температуре наиболее и наименее нагретых зон находится в пределах 2 °С. При этом средняя температура поверхности блока составляет 29 °С. Анализ рис. 6 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.

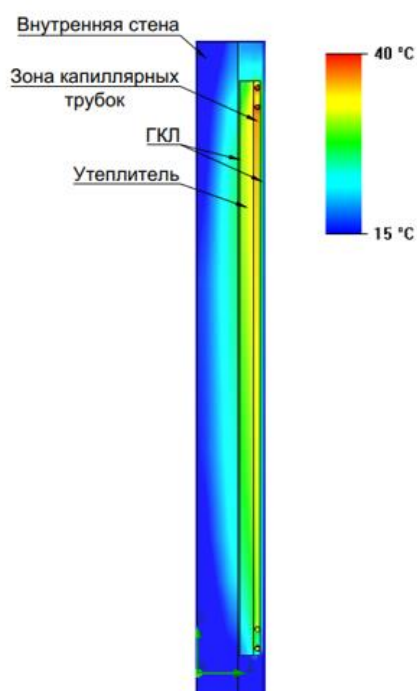


Рис. 6. Распределение температур в разрезе стенового блока, совмещенного с внутренней стеной помещения

Также в результате численного моделирования были построены следующие графики, описывающие изменение температуры теплоносителя при прохождении через систему капиллярных трубок (рис. 7), потери давления в системе (рис. 8), распределение температур по поверхности блока (рис. 9).

Температура теплоносителя после прохождения через систему снизилась на 4,5 °C. При этом наиболее интенсивное снижение наблюдается при прохождении теплоносителя через систему капиллярных трубок.

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.



Рис. 7. График снижения температуры теплоносителя ($t_0 = 40\text{ °C}$; $l_0 = 5,1\text{ м}$)

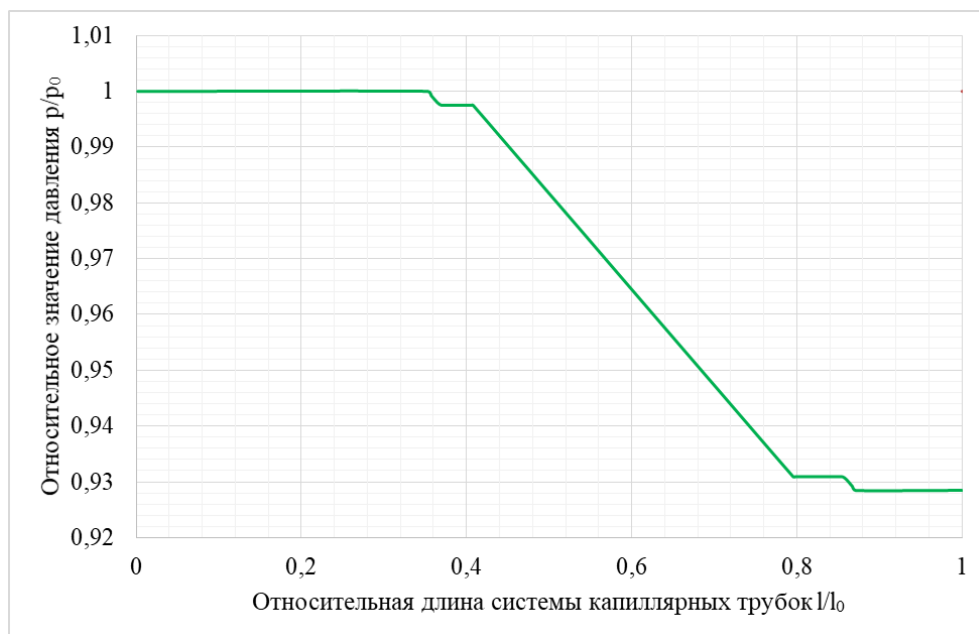


Рис. 8. График потерь давления в блоке ($p_0 = 303975$ Па; $l_0 = 5,1$ м)

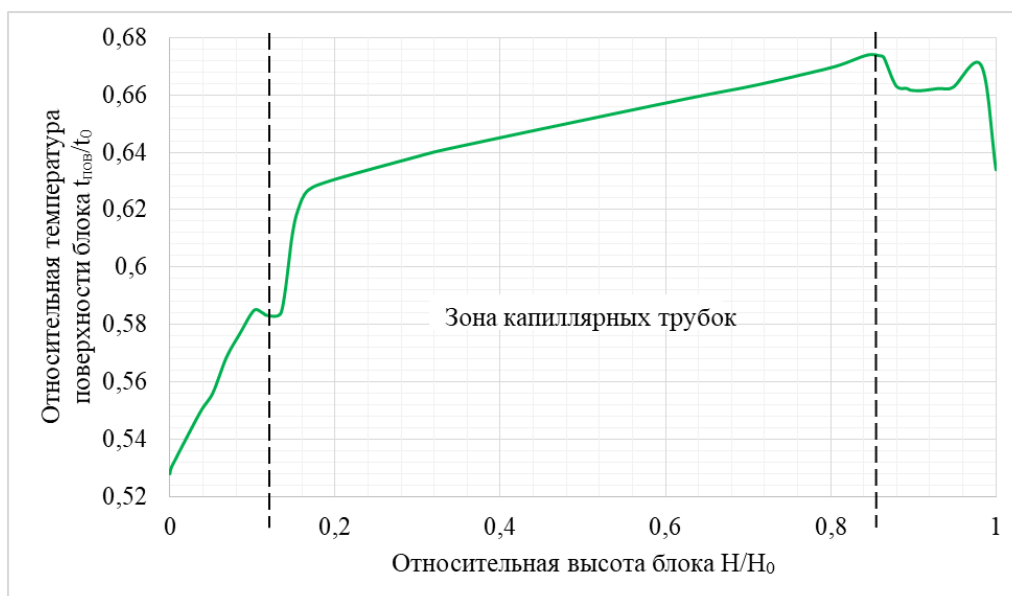


Рис. 9. График температуры поверхности блока по оси Y ($t_0 = 40$ °С; $H_0 = 2,5$ м)

На основании полученных данных был сделан вывод, 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 °С. Анализ графика по вертикальной оси (рис. 9) показал, 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.

Также с помощью SolidWorks FlowSimulation выполнено численное моделирование распределения температур в помещении, отапливаемом с помощью стенового блока, размещенного на внутренней стене помещения (рис. 10).

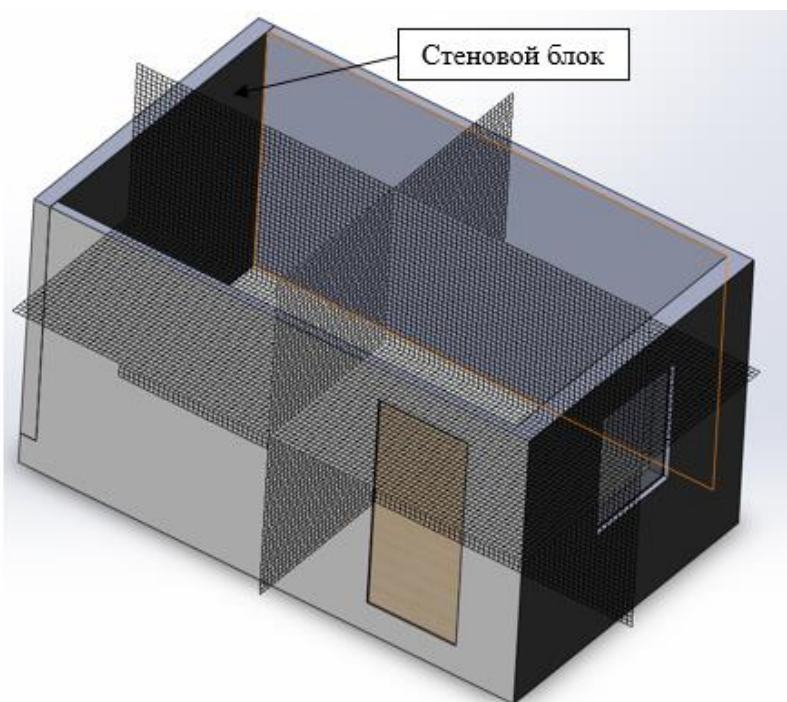


Рис. 10. Модель помещения со стеновым блоком с капиллярными трубками с расчетной сеткой

Заданные материалы для выполнения расчетов:

- материал стен: бетонный блок;
- система капиллярных трубок: полипропилен;
- утеплитель: пенополистирол;
- стеновой блок: гипсокартон.

Граничные условия для выполнения расчетов:

- давление окружающей среды: 101, 3 кПа;
- температура воздуха в помещении: 15 °С;
- температура наружного воздуха: -5 °С;
- давление на входе в систему: 303, 9 кПа;
- температура теплоносителя на входе в систему: 40 °С;
- массовый расход теплоносителя на выходе из системы: 0,0083 кг/с.

В качестве критерия для завершения расчета была выбрана сходимость следующих целей:

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

Размер ячеек расчетной сетки: 0,05 м.

В результате были получены следующие картины (рис. 11) и график (рис. 12) распределения температур в отапливаемом помещении. На основании данных изображений (рис. 11) было определено, что по всему объему помещения наблюдается равномерный прогрев воздуха. График (рис. 12) также подтверждает данный вывод.

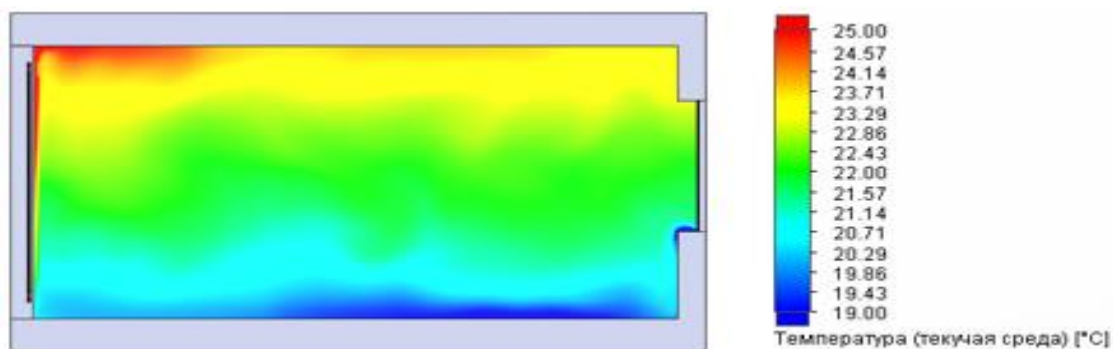


Рис. 11. Картины распределения температур в средней зоне помещения

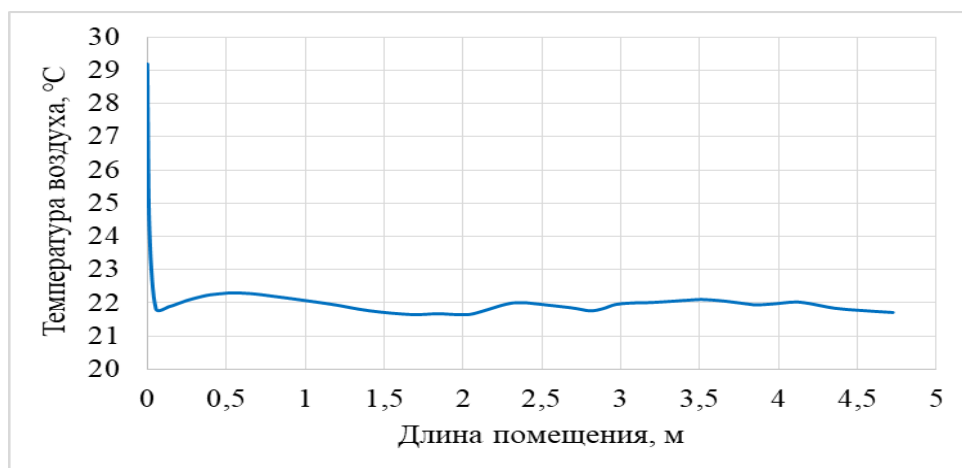


Рис. 12. График распределения температур по длине в центре отапливаемого помещения

Сравнение распределения температур при использовании стенового блока и радиатора (рис. 13) показало, 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.

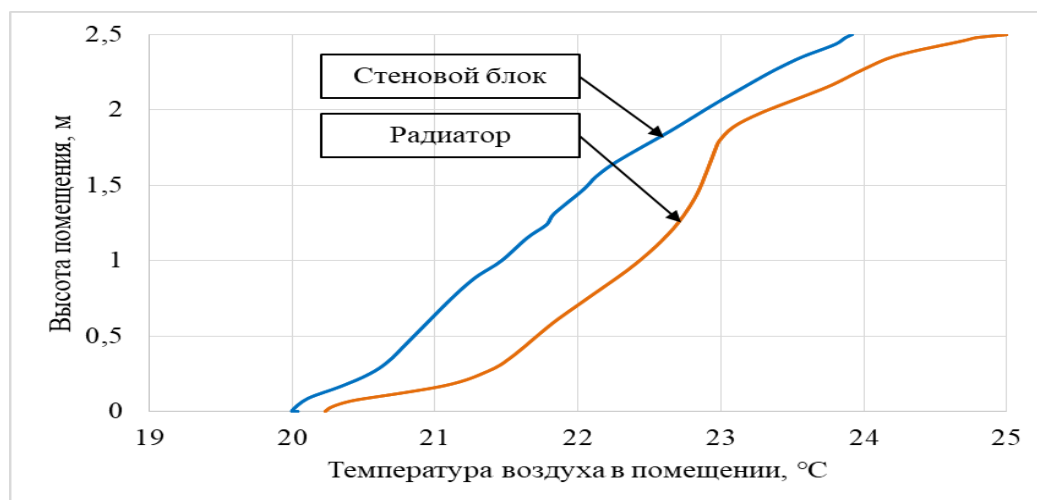


Рис. 13. Графики распределения температур по высоте (ось Y) в центре отапливаемого помещения

На основании картин распределения скоростей в отопляемом помещении (рис. 14) было выявлено, 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 для жилых помещений 0,15 м/с.

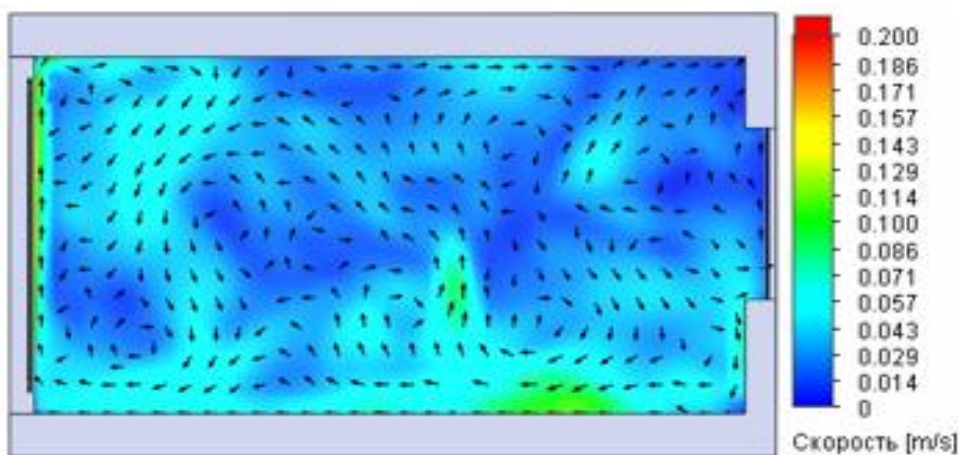


Рис. 14. Распределение скорости движения воздуха в средней зоне помещения.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований блоков с капиллярными трубками.

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены 3 варианта блоков в различном диаметре капиллярных трубок: 0,003 м, 0,0045 м, 0,006 м (рис. 15-16). В качестве основания использованы листы пенополистирола толщиной 0,02 м. Коллекторы выполнены из полипропиленовых труб диаметром 0,002 м.

Для проведения эксперимента был составлен ротатбельный план второго порядка. В ходе экспериментальных исследований производилось варьирование следующих параметров:

- температура теплоносителя на входе в экспериментальный блок $t_{вх}$ от 40 °С до 50 °С;
- массовый расход теплоносителя через экспериментальный блок G от 0,0069 кг/с до 0,0083 кг/с;
- диаметр капиллярных трубок d от 0,003 м до 0,006 м.

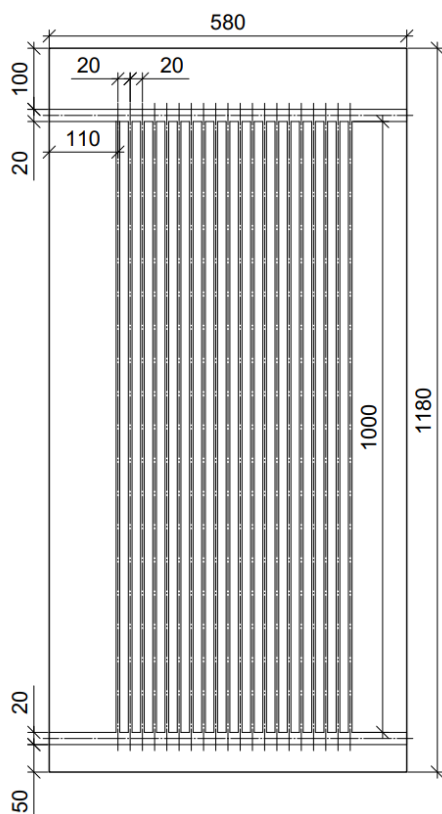


Рис. 15. Схема расположения пазов для укладки коллекторов и капиллярных трубок



Рис. 16. Общий вид системы капиллярных трубок внутри экспериментального блока

Схема и общий вид экспериментального стенда представлены на рис. 17.

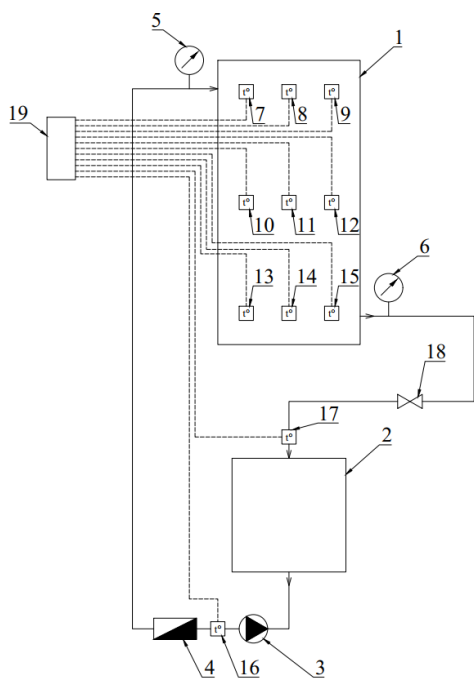


Рис.17. Экспериментальный стенд (схема и общий вид):

- 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

В результате обработки экспериментальных данных было получено следующее регрессионное уравнение (1):

$$t_{\text{вых}} = 43,25 + 4,688 \cdot t'_{\text{вх}} + 0,556 \cdot G' + 0,34 \cdot t'^2_{\text{вх}} + 0,206 \cdot G'^2 + 0,109 \cdot d'^2, \quad (1)$$

где $t_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на выходе из блока, °С;

$t'_{\text{вх}}$ – 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.

На его основе были построены графики зависимости температуры теплоносителя на выходе из блока с капиллярными трубками $t_{\text{вых}}$ от температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$, массового расхода теплоносителя G и диаметра капиллярных трубок d (рис. 18-19).

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 $t_{\text{вых}}$. Увеличение массового расхода теплоносителя G также приводит к росту температуры теплоносителя на выходе $t_{\text{вых}}$. 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 $t_{\text{вых}}$ с повышением температуры на входе $t_{\text{вх}}$, однако сохраняется параболическая зависимость. При этом сгруппированность графиков по диаметрам объясняется изменением температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$.

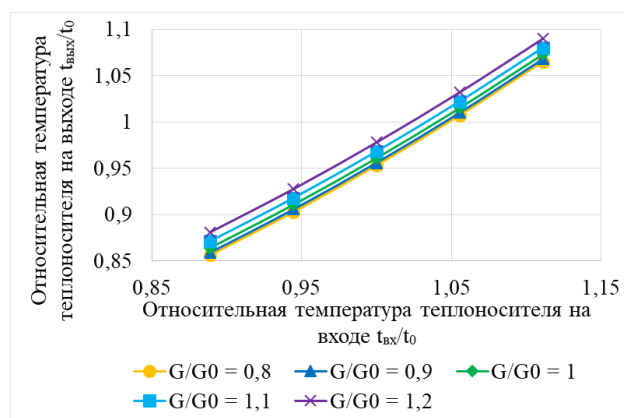


Рис. 18. График относительной температуры теплоносителя на выходе из блока с капиллярными трубками $t_{\text{вых}}$ в зависимости от относительной температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ при относительном диаметре капиллярных трубок $d/d_0 = 1$ ($t_0 = 45$ °С; $G_0 = 0,0069$ кг/с; $d_0 = 0,0045$ м)

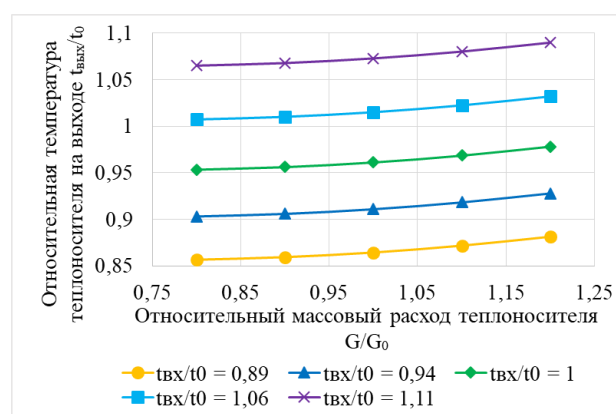


Рис. 19. График относительной температуры теплоносителя на выходе из блока с капиллярными трубками $t_{\text{вых}}$ в зависимости от массового расхода теплоносителя G при относительном диаметре капиллярных трубок $d/d_0 = 1$ ($t_0 = 45$ °С; $G_0 = 0,0069$ кг/с; $d_0 = 0,0045$ м)

На основании полученной регрессионной зависимости были также построены графики зависимости снижения температуры теплоносителя Δt от температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ и массового расхода теплоносителя G (рис. 20-21). Было выявлено, что при температуре теплоносителя на входе равной 47°C и минимальном массовом расходе равном $0,0055\text{ кг/с}$ наблюдается максимальное снижение температуры теплоносителя после прохождения через систему капиллярных трубок равное 2°C .

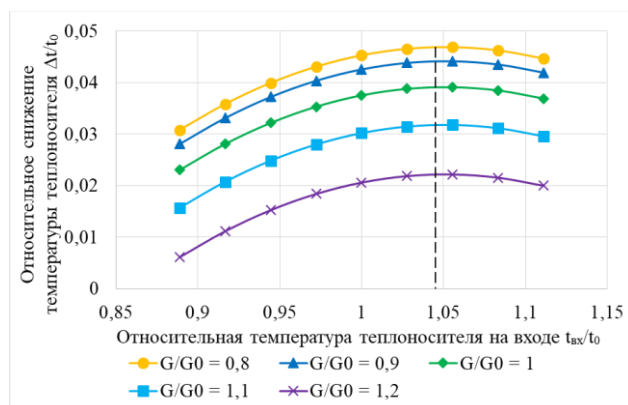


Рис. 20. График изменения температуры теплоносителя Δt в зависимости от относительной температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ при относительном диаметре капиллярных трубок $d/d_0 = 1$ ($t_0 = 45^\circ\text{C}$; $G_0 = 0,0069\text{ кг/с}$; $d_0 = 0,0045\text{ мм}$)

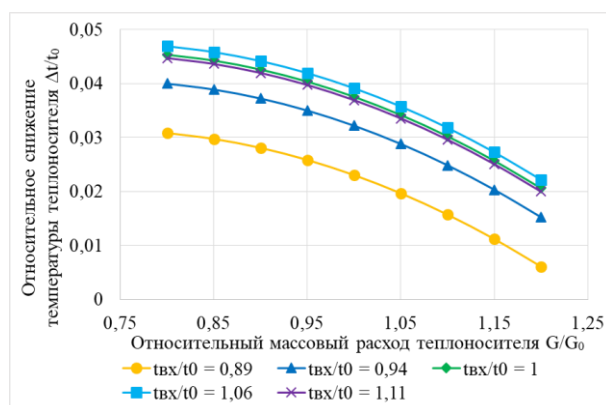


Рис. 21. График изменения температуры теплоносителя Δt в зависимости от массового расхода теплоносителя G при относительном диаметре капиллярных трубок $d/d_0 = 1$ ($t_0 = 45^\circ\text{C}$; $G_0 = 0,0069\text{ кг/с}$; $d_0 = 0,0045\text{ мм}$)

Также в результате обработки экспериментальных данных была выявлена регрессионная зависимость для средней температуры поверхности блока (2):

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

где $t_{\text{нов}}$ — средняя температура поверхности блока, $^\circ\text{C}$;

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

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

На основании данного уравнения были построены графики зависимости средней температуры поверхности блока с капиллярными трубками $t_{\text{нов}}$ от температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ и массового расхода теплоносителя G (рис. 22-23), которые показывают, что на всем исследуемом диапазоне сохраняется тенденция увеличения средней температуры поверхности блока $t_{\text{нов}}$ с ростом температуры теплоносителя на входе $t_{\text{вх}}$ и относительного массового расхода теплоносителя G . Однако, более интенсивный рост наблюдается при увеличении температуры подаваемого теплоносителя $t_{\text{вх}}$.

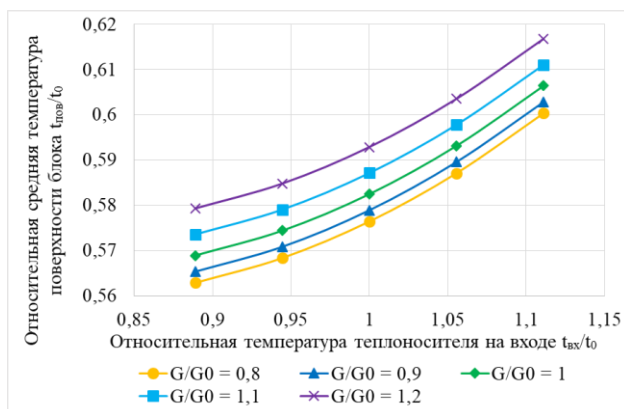


Рис. 22. График относительной средней температуры поверхности блока с капиллярными трубками $t_{пов}$ в зависимости от относительной температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ ($t_0 = 45\text{ °C}$; $G_0 = 0,0069\text{ кг/с}$)

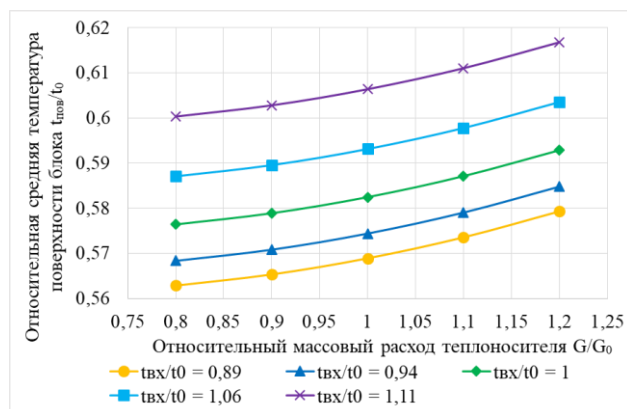


Рис. 23. График относительной средней температуры поверхности блока с капиллярными трубками $t_{пов}$ в зависимости от относительного массового расхода теплоносителя G ($t_0 = 45\text{ °C}$; $G_0 = 0,0069\text{ кг/с}$)

В ходе проведения экспериментов осуществлялась термография поверхности блоков и в системе капиллярных трубок с помощью тепловизора. Целью данного исследования являлся анализ равномерности нагрева поверхности экспериментальных блоков, сравнение блоков с различным диаметром капиллярных трубок. В соответствии с рекомендациями по использованию тепловизора, были выбраны следующие параметры для проведения измерений:

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

Исследование проводилось при следующих параметрах работы экспериментального блока:

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

На рис. 24 представлена полученная термограмма экспериментального блока. Все трубки равномерно заполнены теплоносителем. При этом температура коллектора на входе составляет $39,9\text{ °C}$, а температура коллектора на выходе $38,2\text{ °C}$. Средняя температура поверхности блока составляет $25,1\text{ °C}$. При этом распределение температур по поверхности блока равномерное. Разница между максимальной и минимальной температурой на поверхности блока не превышает $2,6\text{ °C}$. Наиболее нагретой является зона коллектора.

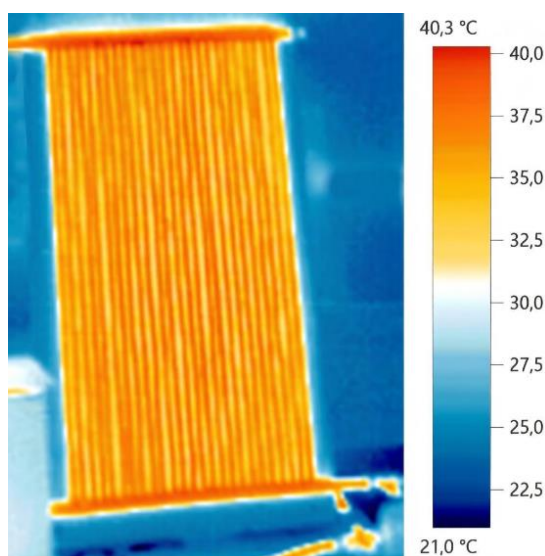


Рис. 24. Термограмма системы капиллярных трубок

Сопоставление результатов экспериментальных исследований с данными, полученными в ходе численного моделирования показало отклонение не более, чем на 5%, что говорит о достаточной достоверности полученных данных.

В четвертой главе приведены результаты промышленных испытаний и 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.

Расчет экономической эффективности показал, 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 относительно водяного радиаторного отопления составляет от 1,6 до 3,9 лет. Результаты расчетов представлены на рис. 25.

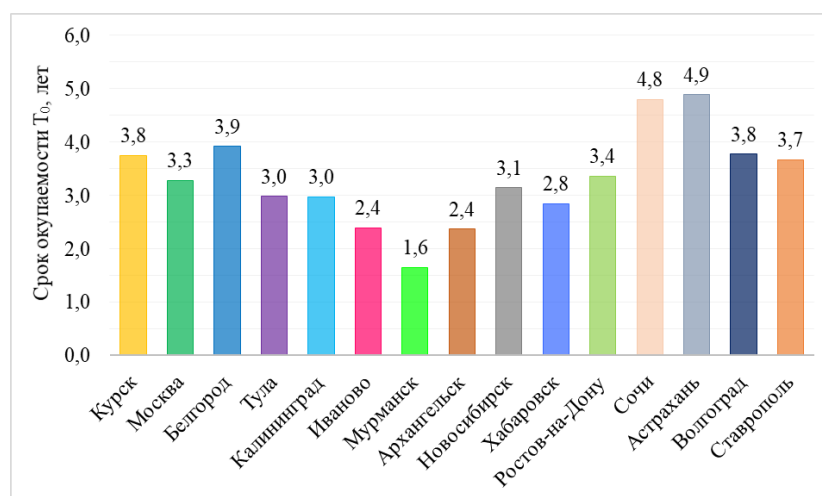


Рис. 25. Срок окупаемости системы отопления на основе стенового блока с капиллярными трубками в сравнении с водяной радиаторной системой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного диссертационного исследования:

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 4°С, что 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 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 3 °С, средняя температура поверхности стенового блока составила 29 °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 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 показал, 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. 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.

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 2200 руб./м² и 900 руб./м² 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 93 руб./(год·м²) и водяного теплого пола на 67 руб./(год·м²), при этом разница с системами электрического теплого пола и электрическим конвектором достигает 900 руб./(год·м²);

– 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 2,1 до 6,8 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.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. **Короянов, А. В.** Исследование системы отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – № 2(72). – С. 46-54. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/72.4. – EDN CINWYZ.
2. **Короянов, А. В.** Совершенствование системы водяного капиллярного отопления / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев, А. П. Бурцев, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 24-36. – DOI 10.21869/2223-1560-2025-29-2-24-36. – EDN HBGNVN.

3. **Короянов, А. В.** Экспериментальное исследование температуры поверхности стенового блока с системой капиллярных трубок / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2026. – Т. 30, № 2. – С. 67-78. – DOI 10.21869/2223-1560-2026-30-2-67-78. – EDN YRQQED.
4. **Короянов, А. В.** Экспериментальное исследование стенового блока с капиллярными трубками для системы водяного отопления / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2026. – № 3(38). – С. 38-46.

Публикации в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus

5. **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.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2697, No. 1. – P. 012073. – DOI 10.1088/1742-6596/2697/1/012073. – EDN SLFCMF.

Доклады и материалы конференций

6. **Короянов, А. В.** Система капиллярного водяного отопления в стеновых блоках / А. В. Короянов // 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.
7. **Короянов, А. В.** Система водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев // 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.
8. **Короянов, А. В.** Водяное отопление жилых помещений на основе стеновых блоков с капиллярными трубками / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев // Инженерные системы зданий и сооружений : Материалы I Международной научно-технической конференции, Уфа. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2026. – С. 122-125.

Подписано в печать 22.10.2026 г. Формат бумаги 70х100 1/16. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,23. Тираж 100 экз. Заказ № 797/1 от 22.10.2026г.
Отпечатано в: Индивидуальный предприниматель Занин Руслан Валерьевич,
адрес места жительства: Курская область, г. Курск, ИНН 462900509202