

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи

Монах

Шацков Артем Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ И
ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ**

05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и
освещение

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.т.н., доцент

Монах
Монах С.И.

Идентичность всех экземпляров заверяю:

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 01.005.01



З.В. Удовиченко

З.В. Удовиченко

Макеевка 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Раздел 1. Аналитическое исследование перспектив внедрения инфракрасного отопления	10
1.1 Инфракрасные системы лучистого отопления	10
1.2 Тепловое излучение инфракрасного спектра	12
1.3 Основные физические законы инфракрасного излучения при лучистом отоплении	16
1.4 Влияние ИК излучения на организм человека	21
1.5 Тепловой комфорт в помещении с лучистым отоплением	25
1.6 Панельные отопительные приборы для систем лучистого отопления жилых и общественных зданий	30
1.7 Расчет и проектирование систем лучистого отопления	33
1.8 Угловые коэффициенты	35
1.9 Выводы по первому разделу	40
Раздел 2. Математическая модель лучистого теплообмена в помещении	42
2.1 Теплообмен в помещении при лучистом отоплении	42
2.2 Определение средних диффузных угловых коэффициентов	48
2.3 Определение температуры адиабатных поверхностей	54
2.4 Расчет теплообмена в помещении с лучистым отоплением при учете теплопередачи через заполнение световых проемов	59
2.5 Методика расчета систем низкотемпературного лучистого отопления	62
2.6 Выводы по второму разделу	63
Раздел 3. Экспериментальные исследования температурного режима помещения при низкотемпературном лучистом отоплении	64
3.1 Экспериментальная установка и методика измерений	64
3.2 Планирование и обработка результатов эксперимента	70
3.3 Экспериментальные исследования температуры внутреннего воздуха в помещении с лучистым отоплением	80

3.4 Выводы по третьему разделу	92
Раздел 4. Практическая реализация и технико-экономическое обоснование результатов работы	94
4.1 Постановка задачи расчета систем лучистого отопления	94
4.2 Теплотери помещения с лучистым отоплением	95
4.3 Методика проектирования систем лучистого отопления.....	100
4.3.1 Подбор отопительных панелей	100
4.3.2 Выбор оптимального места установки прибора	102
4.3.3 Окончание расчета системы лучистого отопления	107
4.4 Технико-экономическая оценка внедрения лучистого отопления	110
4.4.1 Экономическое обоснование выбора оптимального варианта отопления мансардного дома площадью 99,3 м ²	112
4.4.2 Экономическое обоснование выбора оптимального варианта отопления двухкомнатного дома площадью 49,4 м ²	113
4.4.3 Экономическое обоснование выбора оптимального варианта отопления однокомнатного дома площадью 30,1 м ²	114
4.5 Выводы по четвертому разделу	115
Заключение	116
Список литературы	117
Приложение А	132
Приложение Б.....	146
Приложение В	164
Приложение Г.....	179

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одной из важнейших задач на сегодня является решение проблем теплоснабжения с одновременным решением задач энергоресурсосбережения. Централизованные системы отопления, которые широко используются в данное время, находятся в состоянии глубокого кризиса, большая часть тепловых сетей нуждаются в реконструкции.

Вышеуказанные проблемы можно решить путем создания децентрализованных систем отопления как для районов жилой застройки, так и для общественных зданий. Такие системы отличаются малой инерционностью и высокой управляемостью. Ряд исследователей отмечают, что одним из наиболее оптимальных способов решить проблему отопления жилых и общественных зданий является использование электрического отопления. При этом отмечается, что экономически целесообразно для нужд отопления использовать электричество, выработанное на АЭС, КЭС, ГЭС, а также на возобновляемых источниках энергии. Это позволит решить проблему отопления зданий совместно с уменьшением загрязнения окружающей среды.

Высокую эффективность показывают системы низкотемпературных электрических инфракрасных отопительных приборов. Системы лучистого отопления имеют ряд преимуществ перед традиционными системами отопления: возможность обогрева как всего помещения, так и отдельных зон; отсутствие массивных трубопроводов и воздуховодов и затрат на транспорт теплоносителя; отсутствие циркуляции пыли и загрязняющих веществ в обогреваемом помещении; возможность снижения температуры воздуха в обогреваемом помещении на 1-3°C, что обусловлено особенностями процессов теплообмена при использовании радиационного отопления и допускается строительными нормами. При правильной организации лучистого отопления помещения экономический эффект от внедрения подобных систем может в несколько раз превышать затраты на их приобретение и монтаж. Для реализации потенциала энергосбережения при работе лучистого

отопления необходимо на стадии проектирования определить суммарную мощность излучателей, их тип и расположение в помещении. Все вышеперечисленное и определяет актуальность темы диссертационной работы.

Степень разработанности темы. Вопросами лучистого теплообмена занимались А.Г. Блох, С.С. Кутателадзе, М.А. Михеев, Ю.А. Табунщиков, Э.М. Спэрроу, Р. Зигель, М.Н. Оцисик, Дж. Лиенхард, М. Модест.

Лучистое отопление широко изучалось такими исследователями, как Ф. Миссенар, А. Мачкаши, Л. Банхиди, Т. Бураковский, А.А. Худенко, Р. Борхерт, Н.В. Богословский, А.Н. Сканави.

Тепловой комфорт в помещениях, оснащенных различными системами отопления, исследовался Н.В. Богословским, Л. Банхиди, П.О. Фангером.

Влиянию лучистого обогрева и охлаждения посвящены работы А.А. Летавета, А.Е. Малышевой.

Проблема определения углового коэффициента излучения освещалась в работах В. Нуссельта, Р. Зигеля, М. Модеста, В.Р. Моргана, П. Муна, А.Г. Блоха, Ю.А. Табунщикова, Е.Г. Малявиной.

Цель работы: повышение эффективности работы низкотемпературных лучистых систем отопления путем разработки научно обоснованной методики расчета сложного теплообмена и теплопередачи через ограждающие конструкции.

Задачи исследования:

- провести анализ эффективности использования лучистых отопительных приборов в жилых и общественных зданиях;
- разработать математическую модель определения средних диффузных угловых коэффициентов при теплообмене излучением в помещении;
- создать экспериментальную установку и провести исследования температурных режимов помещения, особенностей теплообмена на внутренних поверхностях наружных ограждений и теплопередачи через них при низкотемпературном лучистом отоплении;
- на базе проведенных аналитических и экспериментальных исследований разработать методику расчета температурного режима отапливаемого помещения

и усовершенствовать методику расчета тепловых потерь при проектировании систем низкотемпературного лучистого отопления;

– обосновать экономическую эффективность внедрения систем низкотемпературного лучистого отопления.

Объект исследования – закономерности теплообмена на внутренних поверхностях наружных ограждений и теплопередачи через наружные ограждающие конструкции при отоплении помещений инфракрасными низкотемпературными отопительными приборами.

Предмет исследования – системы низкотемпературного лучистого отопления жилых и общественных зданий.

Научная новизна полученных результатов:

- доработана математическая модель лучистого отопления, получены аналитические выражения средних диффузных угловых коэффициентов для помещения, оборудованного низкотемпературными лучистыми отопительными панелями;

- получены зависимости для расчета температур внутренних поверхностей ограждающих конструкций в условиях лучистого теплообмена с учетом радиационных свойств этих поверхностей и геометрии их взаимного расположения;

- впервые разработан научно обоснованный метод расчета сложного теплообмена и температурного режима отапливаемого помещения, что позволило совершенствовать методику расчета тепловых потерь при проектировании систем низкотемпературного лучистого отопления.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов исследований:

- предложена математическая модель определения температуры внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций путем нахождения средних диффузных угловых коэффициентов, которая позволяет выбрать оптимальное место установки низкотемпературных лучистых отопительных приборов;

- получены регрессионные зависимости для инженерного расчета температур внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций при проектировании систем низкотемпературного лучистого отопления;

- разработана методика проектирования систем низкотемпературного лучистого отопления.

Практическая значимость результатов исследования:

- разработана методика расчета температуры внутреннего воздуха и поверхности внутренних ограждающих конструкций при лучистом отоплении;

- доказано снижение теплопотерь помещений с лучистым отоплением по сравнению с помещениями, оборудованными конвективными отопительными приборами;

- обоснована экономическая и экологическая эффективность применения низкотемпературных систем лучистого обогрева жилых и общественных зданий;

- разработана методика подбора лучистых отопительных приборов и расчета систем низкотемпературного лучистого отопления, которые внедрены в учебный процесс в качестве учебного материала в курсе дисциплин «Экологические проблемы и энергосбережение», «Автономные системы теплоснабжения», «Теплообмен в системах ОВ и К» для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Строительство» профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Методология и методы исследования. В диссертации использованы численные и экспериментальные методы исследования. Численные методы исследования основаны на решении интегральных уравнений, моделирующих процессы сложного и радиационного теплообмена. Планирование экспериментальных исследований проводилось с использованием полного факторного эксперимента.

Адекватность полученных экспериментальных данных подтверждает достоверность зависимостей, полученных в результате математического моделирования.

Личный вклад соискателя включает постановку цели и задач исследования, получение аналитических выражений для определения среднего диффузного

углового коэффициента излучения, разработку математической модели определения температуры внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции, предложение и обоснование методики расчета параметров температурного режима помещения, проведение теоретических и экспериментальных исследований, обработку экспериментальных данных, определение экономического эффекта от внедрения систем лучистого отопления.

Основные положения, выносимые на защиту:

- аналитические зависимости для определения средних диффузных угловых коэффициентов излучения;
- регрессионная математическая модель отопления электрическими инфракрасными излучателями жилого помещения, полученная методом планирования физического эксперимента;
- усовершенствованная методика проектирования систем низкотемпературного лучистого отопления для жилых и общественных зданий.

Степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

Достоверность результатов исследований подтверждается использованием основополагающих положений теории тепломассообмена, современных методов математического моделирования, а также доказанной адекватностью результатов экспериментальных исследований. Достоверность обеспечивается также широкой публикацией работ по данной теме и обсуждением их на конференциях различного уровня.

Основные результаты диссертации докладывались на:

- XII-XIII Международных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры «Здания и конструкции с применением новых материалов и технологий» (г. Макеевка, 2013 – 2014 гг.);

I Международном строительном форуме «Строительство и архитектура-2017» (г. Макеевка, 20-22 апреля 2017 г.).

II Международном строительном форуме «Строительство и архитектура-2018» (г. Макеевка, 19-21 апреля 2018 г.).

Международная научно-технической конференции «Энергетические системы» (г. Белгород, 2017 г.);

II открытая республиканская заочная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов "Актуальные проблемы развития городов" (г. Макеевка, 1 марта 2018 г.)

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах в специализированных рецензируемых научных изданиях общим объемом 2,96 п.л., лично автором 1,68 п.л., в том числе 3 работы опубликованы в изданиях входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденный МОН Украины, 1 работа в издании, входящем в перечень специализированных научных журналов, утвержденный Министерством образования и науки ДНР, 1 – в зарубежном издании, 2 – по материалам конференции.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Общий объем работы - 182 страницы, в том числе 113 страниц основного текста; 45 рисунков; 12 таблиц; списка литературы на 15 страницах; 51 страницы приложений.

1 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ОТОПЛЕНИЯ

1.1 Инфракрасные системы лучистого отопления

В зависимости от преобладающего способа передачи теплоты отопление помещений может быть конвективным или лучистым.

Лучистым называют отопление, при котором радиационная температура помещения превышает температуру воздуха ($t_R > t_v$) [23].

В основе работы всех систем инфракрасного (лучистого) отопления заложен принцип прямого обогрева помещения, а именно: тепловые лучи, попадая на поверхность стен, пола, различных предметов, проникают внутрь и постепенно прогревают их. При этом возникает так называемое вторичное излучение, также в конце концов поглощаемое предметами и ограждениями помещения [24]. Поток тепла, поглощаясь одеждой и кожей человека, создает тепловой комфорт без повышения температуры окружающего воздуха. При этом средневзвешенная температура ограждений, видимых с определенной точки помещения, может быть либо выше, либо ниже температуры воздуха, в зависимости от положения этой точки и от площади и температуры излучающих поверхностей. Из этого следует, что при одинаковых комфортных условиях, человек может дышать при лучистом отоплении более холодным воздухом, чем при конвективном. Это является одним из основных преимуществ лучистого отопления [25]. Температура воздуха в помещении с лучистым отоплением может быть ниже, чем при конвективном отоплении. Человек отдает окружающей среде теплоту, вырабатываемую в ходе физиологических процессов, главным образом путем лучистого теплообмена [26].

Теплообмен только излучением возможен лишь в безвоздушном пространстве. В помещении лучистый теплообмен всегда сопровождается конвективным. При этом, вследствие различия температуры поверхностей возникает движение воздуха в помещении [23]. Таким образом, воздух в обогреваемых помещениях, оставаясь практически прозрачным для инфракрасного

излучения, нагревается за счет вторичного тепла, то есть конвекции от конструкций и предметов, нагретых тепловым потоком.

Использование инфракрасных обогревателей дает возможность снизить потребление энергии и уменьшить затраты на обогрев помещений по сравнению с традиционными системами отопления [28].

Наиболее распространены высокотемпературные инфракрасные обогреватели потолочного типа, используемые для локального обогрева производственных мест или больших площадей с высокими потолками, а также панельно-лучистые местные и центральные отопительные системы с теплоснабжением при помощи воды и воздуха. Вопросы использования инфракрасной техники для отопления помещений различного назначения широко освещались как в работах ряда советских и российских [24, 28-35], украинских [36-40], а также зарубежных авторов [26, 41-48].

Высокая практичность инфракрасных обогревателей заключается в простом и быстром монтаже, простоте эксплуатации оборудования и управлении температурным режимом, освобождаются значительные площади, исключается опасность размораживания системы. В инфракрасных обогревателях не используются движущиеся части, нет воздушных фильтров, отсутствует смазка. Применяемые в них плоские нагревательные элементы более эффективны, чем трубчатые электрические нагреватели и имеют больший срок службы. Крепятся на потолке и стенах, могут работать круглосуточно [10].

Основной проблемой применения является необходимость соблюдения гигиенических нормативов: ограничение температуры поверхности обогревателя и плотности лучистого теплового потока на рабочем месте. Это требует детального расчета распределения лучистого тепла по поверхностям обслуживаемых помещений. Современный рынок инфракрасных обогревателей чрезвычайно насыщен и разнообразен [10].

Он насчитывает около 20 производителей этого оборудования, подавляющее число которых — зарубежные: из Германии, Венгрии, Италии, Турции, Словакии, США, Польши, Чехии, Франции, Швеции и т.д. В последние годы наблюдается

устойчивая тенденция роста объемов продаж данного вида отопительного оборудования (в среднем на 20% ежегодно). Его потребителями преимущественно являются промышленные предприятия и учреждения сферы обслуживания [10].

1.2 Тепловое излучение инфракрасного спектра

Перенос радиации можно рассматривать как с позиции электромагнитной, так и с позиций квантовой теории излучения. Ни одна из этих точек зрения не может претендовать на полноту, поскольку не описывает в полной мере природы наблюдаемого явления. Тем не менее, такой двойственный подход приносит значительную пользу [49]. В целом, радиационные свойства поверхностей жидкостей и твердых тел значительно проще могут быть предсказаны на основе электромагнитной теории излучения, в то время как поглощательная и излучательная способности газов успешно описываются квантовой теорией излучения [50].

В рамках волновой теории электромагнитное излучение описывается законами, определяющими поведение поперечных волн, в которых колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Скорость распространения электромагнитного излучения равна скорости света; свет по существу является лишь частным случаем электромагнитного излучения в узком диапазоне спектра [50], [51]. При этом обычно невозможно выделить плоскость преимущественного направления колебаний. В связи с этим тепловое излучение принято считать неполяризованным. Исключение составляет излучение блестящих металлических поверхностей, для которых удастся выделить плоскость с наибольшей энергией колебаний [52].

Законы распространения, отражения и преломления, установленные для световых лучей, справедливы и для тепловых. Поэтому, чтобы лучше себе представить какие-либо сложные явления теплового излучения, всегда закономерно проводить аналогию со световым излучением, которое нам больше известно и доступно непосредственному наблюдению [53].

Для характеристики излучения используются три основных параметра: частота излучения ν , длина волны излучения λ и скорость распространения (волны или фотона) c . Только два из этих параметров являются независимыми, так как они связаны между собой соотношением

$$c = \lambda \cdot \nu. \quad (1.1)$$

На рисунке 1.1 приведена шкала электромагнитных волн и принятое деление её на участки. Термин «тепловое излучение» относится к собственному излучению нагретых тел; практический интерес представляет участок спектра от 0,1 до 100 мкм, в котором заключена основная часть энергии теплового излучения, причем видимая часть спектра соответствует длинам волн от 0,4 до 0,7 мкм. Более коротким длинам волн соответствует рентгеновское и γ -излучение, а также космические лучи [54], [55].

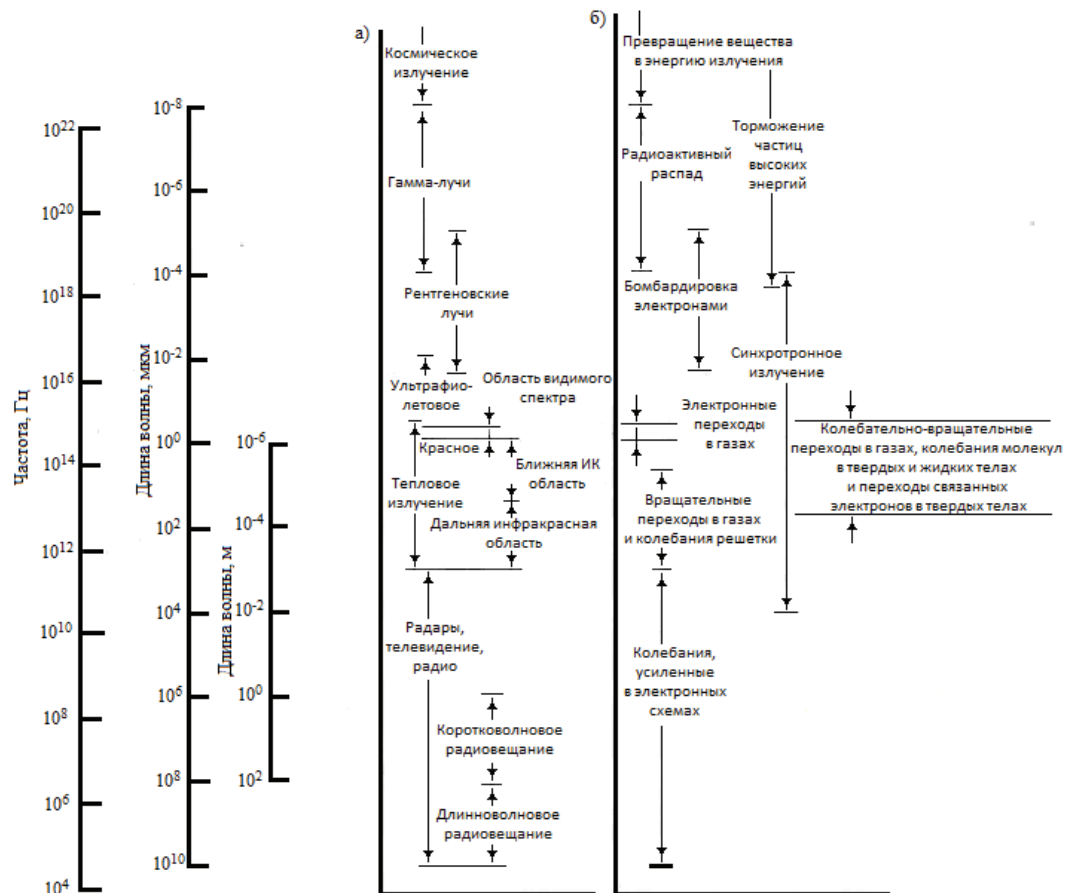


Рисунок 1.1 – Спектр электромагнитного излучения [30]:

а – вид излучения, б – механизм излучения

Инфракрасную область спектра иногда подразделяют на ближнюю инфракрасную область, простирающуюся от области видимого света до $\lambda = 25$ мкм, и на дальнюю инфракрасную область, соответствующую более длинным волнам инфракрасного спектра [51].

Спектр излучения твердых тел является непрерывным, спектр излучения газов – прерывистым, то есть их излучение селективно. Селективным излучением и поглощением обладают также некоторые твердые тела (например, кварц), имеющие наиболее выраженный объемный характер высвечивания или поглощения. У большинства твердых тел поглощение и излучение происходят в весьма тонком пограничном слое. Это даёт основание в феноменологической теории излучательные характеристики приписывать непосредственно геометрическим поверхностям тел [52, 53].

Тепловое излучение может переходить в разнообразные формы энергии, однако основной формой превращения является переход в форму теплового хаотического движения атомов и молекул и обратный переход внутренней энергии частиц в излучение. Этот процесс превращения энергии в совокупности с процессом переноса излучения и называется теплообменом излучением [54, 55, 60].

Тепловое излучение возникает за счет того, что атомы тела под действием теплоты движутся быстрее, а в случае твердого материала быстрее колеблются по сравнению с состоянием равновесия. При этом движении атомы сталкиваются. В результате неупругого столкновения внутренняя энергия одного или обоих атомов возрастает, и энергия движения уменьшается. Одна из возможностей отдачи увеличивающейся внутренней энергии – испускание электромагнитных волн. Во время излучения электронная оболочка атома колеблется как микроскопическая антенна. Электромагнитное излучение либо возбуждает другой атом, либо покидает тело: это и есть тепловое излучение. Поскольку атомы движутся при любой температуре, все тела при любой температуре испускают теплоту. Энергия электромагнитной волны, то есть сила излучения при данной температуре зависит от длины волны [26].

Испускаемая энергия E_0 будет наибольшей при характерной длине волны λ , при этом форма кривой «энергия – длина волны» в идеальном случае зависит только от температуры излучающего тела и не зависит от материала (рис. 1.2).

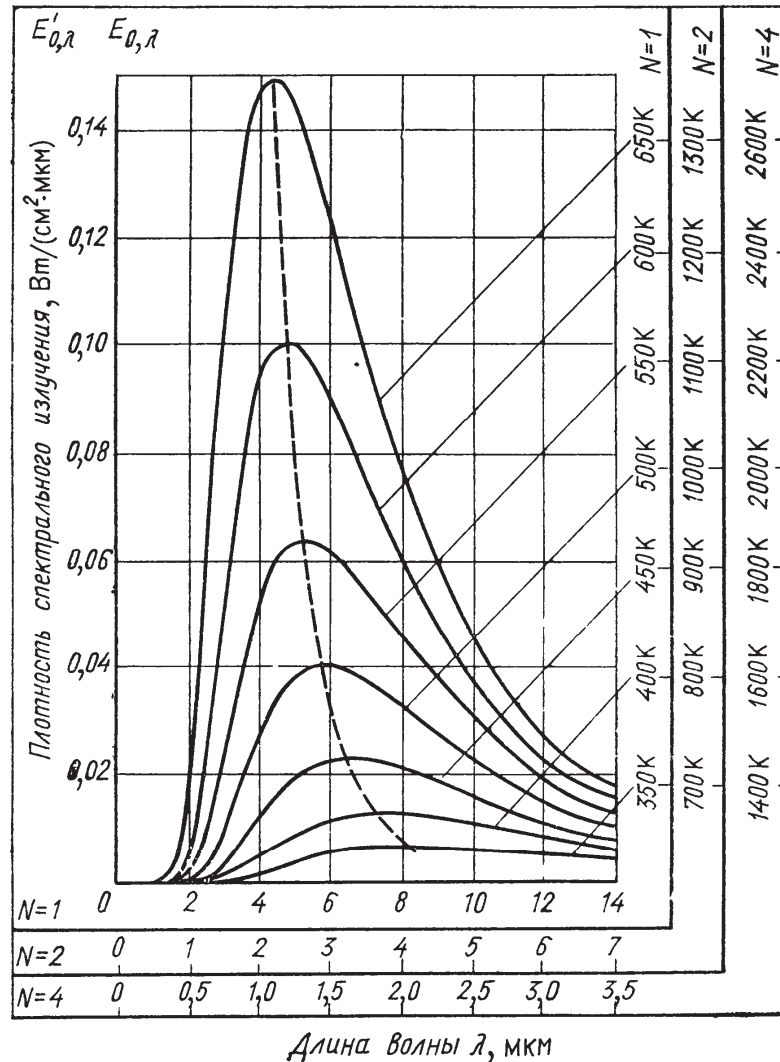


Рисунок 1.2 – Универсальное распределение плотности монохроматического излучения черного тела [26].

Длина волны, м, соответствующая максимальной испускаемой энергии, определяется соотношением

$$\lambda_i = \frac{b}{T}, \quad (1.2)$$

где b – независимая от вида материала постоянная, равная $0,2884 \cdot 10^{-2}$ м/К.

Это соотношение называется законом Вина [47].

Характерной особенностью излучаемой энергии является то, что, в отличие от других основных видов передачи теплоты, здесь нет необходимости в передающем промежуточном веществе, даже наоборот, скорость распространения волны максимальна в вакууме.

1.3 Основные физические законы инфракрасного излучения при лучистом отоплении

При эксплуатации зданий определяющим является тепловой режим помещений, от которого зависит ощущение теплового комфорта людей, нормальное протекание производственных процессов, состояние и долговечность конструкций здания и его оборудования. Тепловая обстановка в помещении определяется совместным действием ряда факторов: температуры, подвижности и влажности воздуха помещения, наличием струйных течений, распределением параметров воздуха в плане и по высоте помещения, а также радиационным излучением окружающих поверхностей, зависящим от их температуры, геометрии и радиационных свойств. Под действием конвективного и лучистого теплообмена и процессов массопереноса температуры воздуха и поверхностей в помещении взаимосвязаны и оказывают воздействие друг на друга [49].

Для изучения формирования микроклимата, его динамики и способов воздействия на него нужно знать законы теплообмена в помещении [49].

Температуры поверхностей в помещении неодинаковы. Обычно зимой и летом наружные ограждения и приборы систем отопления – охлаждения бывают более нагретыми или охлажденными по сравнению с внутренними стенами, которые имеют температуру, близкую к температуре воздуха в помещении. Между поверхностями происходит теплообмен излучением, подчиняющийся общим физическим закономерностям, пользоваться которыми в инженерных расчетах сложно. Лучистый теплообмен в помещении происходит в условиях ограниченного диапазона значений температур, определённых радиационных свойств поверхностей и геометрии их расположения [49].

Теплообмен излучением между телами в значительной мере зависит от радиационных свойств поверхностей: их степени черноты, поглощательной и отражательной способностей. Эталон в этом отношении является абсолютно черное тело, все радиационные характеристики которого хорошо известны. На практике всегда приходится иметь дело с нечерными телами, поэтому при всех расчетах теплообмена излучением необходимо знать их реальные радиационные характеристики.

При расчетах теплообмена излучением реальные технические поверхности всегда рассматриваются, как диффузные, то есть предполагается, что они диффузно излучают и диффузно отражают падающую на них лучистую энергию [50].

Принимается допущение, что поверхности в помещении являются серыми телами. В отличие от абсолютно черных, серые тела излучают меньше тепла и падающий на них лучистый поток полностью ими не поглощается, а частично отражается, согласно закону Кирхгофа [50].

В то же время, в соответствии с законом Кирхгофа, согласно которому коэффициенты излучения и поглощения монохроматического излучения поверхностью материалов равны, первые излучают меньше тепловой энергии, чем вторые. Коэффициент излучения поверхности серого тела C всегда меньше коэффициента излучения абсолютно черного тела C_0 . Между ними существует зависимость

$$C = \varepsilon \cdot C_0, \quad (1.3)$$

где ε — степень черноты, или относительный коэффициент излучения поверхности (величина безразмерная); для серой поверхности $\varepsilon < 1$.

Проводники отражают, а диэлектрики поглощают большую часть падающего на них инфракрасного излучения (рис. 1.3).

Таким образом, тепловое излучение поверхностей в помещении можно рассматривать как инфракрасное монохроматическое диффузное, подчиняющееся законам Стефана-Больцмана, Ламберта и Кирхгофа – излучение серых тел.

Воздух помещения при расчете лучистого теплообмена между поверхностями можно считать лучепрозрачной средой. Он состоит в основном из двухатомных газов (азот, кислород), которые практически прозрачны для тепловых лучей и сами не излучают тепловой энергии. Незначительное содержание многоатомных газов (водяной пар и диоксид углерода) при малых толщинах слоя воздуха в помещении практически не изменяет этого свойства.

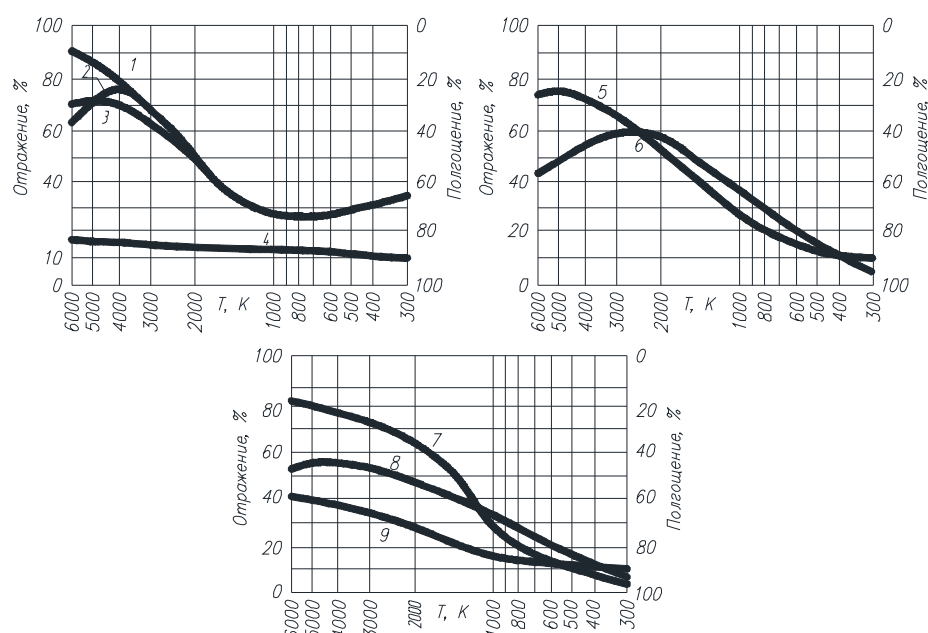


Рисунок 1.3 – Отражательная и поглощательная способности материалов в зависимости от температуры источника (абсолютно черного тела) падающего излучения:

1 – бумага; 2 – дерево; 3 – материал одежды; 4 – линолеум; 5 – штукатурка гипсовая; 6 – красный кирпич; 7 – кафель белый; 8 – керамическая плитка; 9 – бетон

Собственное излучение E_1 – количество энергии, излучаемое единицей поверхности тела в единицу времени для всех длин волн от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$. Для детального изучения явления важно знать закон распределения энергии излучения по длинам волн при различных температурах $E_\lambda = f(\lambda, T)$. Величина E_λ называется спектральной плотностью потока излучения и представляет собой отношение

плотности потока излучения, испускаемого в интервале длин волн от $\lambda + d\lambda$, к рассматриваемому интервалу длин волн [34]

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}. \quad (1.4)$$

Закон изменения спектральной плотности потока излучения от длины волны и температуры для абсолютно черного тела (рис. 1.4) Планку удалось установить теоретически [58]

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda \cdot T} - 1}, \quad (1.5)$$

где λ – длина волны, м;

T – абсолютная температура тела, К;

c_1 и c_2 – постоянные излучения, соответственно равные $3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² и $1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К.

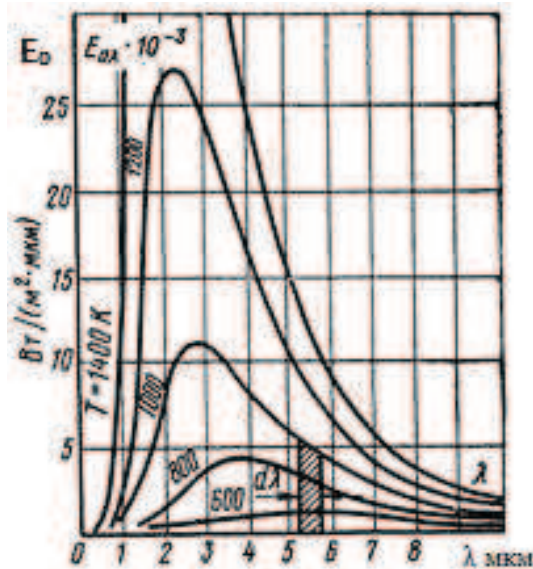


Рисунок 1.4 – Зависимость $E_{0\lambda} = f(\lambda, T)$ по закону Планка

Площадь, ограниченная кривой $T = \text{const}$, осью абсцисс и ординатами λ и $\lambda + d\lambda$, дает количество энергии dE_0 , излучаемое участком длин волн $d\lambda$, следовательно, $dE_0 = E_{0\lambda} d\lambda$. Полное количество лучистой энергии, излучаемое всеми длинами волн, составляет

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0\lambda} \cdot d\lambda. \quad (1.6)$$

Из этого выражения путем интегрирования по всем длинам волн можно получить закон Стефана-Больцмана. Закон был установлен опытным путем Й. Стефаном в 1879 г. и теоретически Л. Больцманом в 1881 г. Он устанавливает зависимость плотности потока интегрального излучения от температуры. Для абсолютно черного тела из уравнения 1.6 он принимает вид

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0\lambda} \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5} d\lambda}{e^{c_2/\lambda \cdot T} - 1}. \quad (1.7)$$

В результате интегрирования уравнения получается следующее выражение

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4, \quad (1.8)$$

где σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

В технических расчетах закон также может применяться в другой форме

$$E_0 = c_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.9)$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴).

Законом Стефана-Больцмана определяется количество энергии, излучаемое телом по всем направлениям. Каждое направление определяется углом φ , который оно образует с нормалью к поверхности. Изменение излучения по отдельным направлениям определяется законом Ламберта. Согласно этому закону количество энергии, излучаемое элементом поверхности dF_1 в направлении элемента dF_2 , пропорционально количеству энергии, излучаемой по нормали $E_n dF_1$, умноженному на величину элементарного телесного угла $d\Omega$ и $\cos \varphi$ [56]

$$d^2Q_\varphi = E_n d\Omega \cos\varphi dE_1. \quad (1.10)$$

Следовательно, наибольшее количество энергии поверхностью излучается в направлении нормали при $\varphi=0$; с увеличением φ количество излучаемой энергии уменьшается, и при $\varphi=90^\circ$ оно становится равным нулю.

Следовательно, оптико-геометрические параметры систем тел являются одним из важнейших факторов при расчете лучистого теплообмена.

1.4 Влияние инфракрасного излучения на организм человека

Электромагнитное загрязнение окружающей среды, наряду с химическим и радиационным, – наиболее распространенный вид загрязнения, несущий опасные глобальные последствия и вызывающий большую обеспокоенность как ученых, так и населения. Всемирная организация здравоохранения включила проблему электромагнитного загрязнения окружающей среды в перечень приоритетных проблем человечества [61]. В связи с этим необходимо тщательно рассмотреть влияние ИК излучения на организм человека.

Спектр ИК излучения можно разделить на 3 диапазона [42,49,53]:

- коротковолновой ($\lambda=0,76\dots1,4$ мкм);
- средневолновой ($\lambda=1,4\dots3$ мкм);
- длинноволновой ($\lambda=3\dots1000$ мкм).

Воздействие ИК излучения на организм человека изучалось в СССР ещё в первой половине XX века и продолжается до сих пор [63-77]. Гигиенисты Летавет А.А. и Малышева А.Е. в результате исследований пришли к выводу, что лучистый теплообмен составляет 60% от суммарной теплоотдачи человеком в окружающую среду [63], что делает лучистый теплообмен важнейшей составляющей теплового комфорта человека. Пребывание человека среди предметов, нагретых с поверхности больше или меньше, чем поверхность его тела,

вызывает положительный или отрицательный баланс тепла, получаемого или отдаваемого телом путем излучения. Пребывание в среде с более холодными предметами (стены, скалы, почва и пр.) вызывает увеличенную потерю тепла излучением; стены, нагретые выше температуры поверхности кожи, вызывают резкое уменьшение потери тепла излучением.

Исследования гигиенистов показали (А. А. Летавет и А. Е. Малышева, 1941 г.; А. Е. Малышева и Е. Г. Репина, 1954 г.; Э. И. Брандт и О. И. Марголина, 1954 г.; А. Г. Понугаева, 1949 г.; Н. Ф. Галанин, 1952 г., и др.), что влияние радиационного охлаждения заключается не только в потере тепла организмом: потеря тепла и связанное с ней резкое понижение температуры кожи сопровождаются очень малыми реакциями терморегуляции — сужением сосудов конечностей, отсутствием повышения обмена веществ, но это влечет за собой значительное снижение возбудимости нервной системы, общую вялость и апатию. Указанные особенности радиационного охлаждения обуславливают то, что этот фактор среды крайне неблагоприятен для организма человека [64-66, 77].

Обычно радиационное охлаждение резче всего выражено в поздний осенний период, когда еще мало отапливаемые здания значительно охлаждаются, а температура воздуха помещений относительно высока. Опыты на животных (И. Г. Рогаль, 1958 г.) показывают, что практически акклиматизация к фактору радиационного охлаждения отсутствует. Для большинства организмов (животные и человек) радиационное охлаждение является по существу глубоким нарушением динамического стереотипа теплового баланса в отдаче тепла. В этом и заключается специфичность воздействия рассматриваемого фактора среды [64].

Радиационное нагревание вызывает понижение обмена веществ, расширение сосудов кожи, учащение пульса, увеличение минутного объема сердца, т. е. комплекс явлений, характерных для нагревания вообще (М. Е. Маршак, 1930; Н. Ф. Галанин, 1952 г.). Имеются данные о специфическом влиянии радиации на нервную систему (И. А. Зайдшнур, 1948 г., 1950 г.; И. А. Зайдшнур и М. Г. Тихая, 1951 г.; Л. Т. Еловская, 1955 г.).

Сочетание радиационного нагрева с охлажденным воздухом имеет большие преимущества, так как способствует поддержанию теплового баланса организма при сохранении реакции на холодный воздух, т. е. высокого обмена веществ, высокой возбудимости центральной нервной системы. Радиационное нагревание, служащее основой так называемого панельного отопления, представляет большой интерес для санаторных условий и климатотерапии; оно позволяет проводить экспозицию организма человека к природным факторам среды при относительно низких температурах последней [64].

Биологическое воздействие лучистой энергии зависит от длины волны, интенсивности излучения и его продолжительности [26, 66-75].

Излучение проникает в организм через кожу. Различные слои кожи по-разному отражают и поглощают лучи. При инфракрасном длинноволновом излучении проникание лучей значительно уменьшается по сравнению с коротковолновым излучением.

Инфракрасные лучи оказывают как местное, так и общее воздействие. Коротковолновое инфракрасное излучение в месте облучения вызывает покраснение кожи, но это покраснение рефлективно распространяется и на 2-3 см вокруг облучаемой области. Причина этого в том, что капиллярные сосуды расширяются, кровообращение усиливается. Вскоре на месте облучения возникает волдырь, который позднее превращается в струп. При воздействии коротковолновых инфракрасных лучей этот струп исчезает только через 1-2 месяца, а при действии длинноволновых инфракрасных лучей – на второй неделе, при этом как волдырь, так и струп болезненны. При попадании коротковолновых инфракрасных лучей на органы зрения может возникнуть катаракта. Например, в глазу кролика при действии длинноволновых инфракрасных лучей с длиной волны 0,67-0,14 мкм возникает ряд изменений, и в течение 1-3 лет со времени воздействия возникает типичная картина катаракты [26].

Впервые биологическое действие ИК-излучения было обнаружено по отношению к культурам клеток, растениям, животным. В большинстве случаев, подавлялось развитие микрофлоры. У людей и животных активизировался

кровоток и, как следствие этого, ускорялись процессы обмена. Было доказано, что инфракрасные лучи оказывали одновременно болеутоляющее, антиспазматическое, противовоспалительное циркуляторное, стимулирующее и отвлекающее действие. Исследователи отметили, что инфракрасные лучи улучшают циркуляцию крови, а вызванная инфракрасными лучами гиперемия оказывает болеутоляющее действие [75, 77].

Длинные инфракрасные лучи с длиной волны $\lambda > 1,5$ мкм не вызывают катаракты, не проникают глубоко в кожу человека и оказывают тепловой эффект, благоприятный для человека. ИК-излучение также позволяет ослабить действие ядохимикатов, способствует повышению неспецифического иммунитета. Установлено, что процедуры воздействия ИК-излучения ускоряют процесс выздоровления больных гриппом, катаром верхних дыхательных путей и могут служить мерой профилактики простудных заболеваний [77].

Человеческий организм, как и любое другое тело, поглощает падающее на него излучение во всем спектральном диапазоне длин волн и сам является источником теплового излучения с длиной волны равной по закону смещения Вина

$$\lambda = \frac{0,2884 \cdot 10^{-2}}{36,6 + 273,15} = 9,36 \text{ мкм.}$$

Из закона спектрального распределения плотности потока излучения Планка можно сделать вывод, что интенсивность излучения являются функцией абсолютной температуры и длины волны [60]. Чем выше энергия излучения по сравнению с энергией самого объекта, тем сильнее воздействие и вероятность провоцирования различных каталитических процессов в организме человека. Длина волны излучения низкотемпературных лучистых отопительных приборов, согласно закону смещения Вина, составляет

$$\lambda = \frac{0,2884 \cdot 10^{-2}}{80 + 273,15} = 8,21 \text{ мкм.}$$

Отсюда можно сделать вывод, что излучение низкотемпературных панелей не наносит вреда здоровью человека.

1.5 Тепловой комфорт в помещении с лучистым отоплением

Использование лучистого отопления не должно подвергать человека опасности и создавать дискомфортный микроклимат в помещении. Прежде всего необходимо обеспечить в отапливаемом помещении оптимальную тепловую среду. Требования, связанные с созданием комфортных условий, определяются пребыванием человека в помещении. Очевидно, что требования для больничных палат, жилых помещений, административных помещений, учебных зданий, детских садов различны, поскольку различны функции этих помещений.

Комфортные для человека условия определяются оптимальными параметрами микроклимата, которые регламентируются нормативными документами Украины [80-87] и РФ [88-97]. Вопросами определения комфортных условий занимались как отечественные, так и зарубежные ученые [23-28, 39, 41, 98-102].

Для расчета и проектирования систем отопления, как правило, используются национальные стандарты, а при их отсутствии международные стандарты, такие как EN12828 [104], ISO EN7730 [105] или EN15251 [106], в которых сформулированы общие требования к тепловому комфорту. Рекомендуемые критерии для общего теплового комфорта, предложенные О. Фангером [107], выражаются в индексе комфортности (PMV) и в ожидаемом проценте неудовлетворенных степенью комфорта (PPD). Кроме того, должна учитываться расчетная температура комфорта, а также факторы локального теплового комфорта: разность температуры воздуха по высоте зоны обслуживания, асимметрия эквивалентной температуры излучения, подвижность воздуха (сквозняки) и температура окружающих поверхностей [108].

Неудовлетворенность параметрами микроклимата может являться результатом теплого или прохладного дискомфорта тела в целом, который

характеризуют ожидаемым значением теплоощущения PMV (Predicted Mean Vote) и прогнозируемым процентом неудовлетворенности PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Субъективное состояние психологического теплоощущения оценивают следующей шкалой (Таблица 1.1) значений PMV. Эти показатели используют совместно с нормированными параметрами микроклимата для оценки работоспособности системы отопления [109]. Области тепловых условий для человека при выполнении легкой работы в зависимости от температуры внутреннего воздуха и радиационной температуры приведены на рисунке 1.5.

Таблица 1.1 – Шкала оценивания психологического теплоощущения человека

PVM	-3	-2	-1	0	1	2	3
Ощущение	Холодно	Прохладно	Слегка прохладно	Комфортно	Слегка тепло	Тепло	Жарко

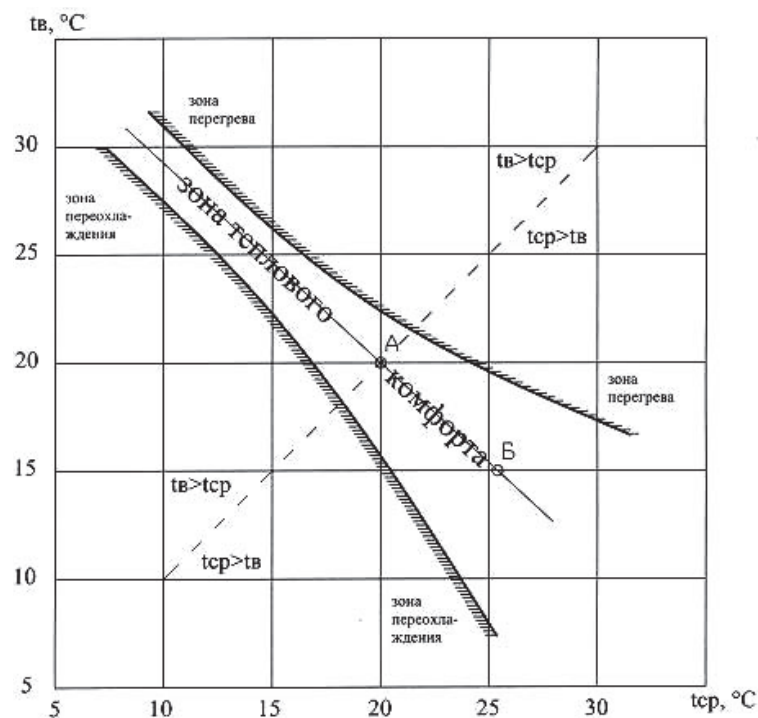


Рисунок 1.5 – Области тепловых условий для человека, выполняющего легкую работу в отапливаемом помещении:

t_v – температура внутреннего воздуха, t_{cp} – средняя температура поверхностей

При одной и той же температуре воздуха (например, 20°C) тепловые ощущения человека в зависимости от температуры t_{cp} могут быть различными. Эти ощущения могут характеризоваться оценками «холодно» при пониженной t_{cp} (если, например, t_{cp} ниже 16°C при $t_b=20^\circ\text{C}$), «нормально» (если $t_{cp}=16-25^\circ\text{C}$ при той же температуре воздуха) и «жарко» при повышенной t_{cp} (выше 25°C в приведенном примере).

На рисунке 1.5 выделены области конвективного отопления (слева вверху над пунктирной линией), отличительной характеристикой которого является превышение температуры воздуха в помещении над средней температурой поверхностей ($t_b > t_{cp}$), и лучистого отопления (справа внизу), когда средняя температура поверхностей выше температуры воздуха ($t_{cp} > t_b$). Наиболее благоприятно для самочувствия людей комфортное сочетание t_b и t_{cp} при лучистом отоплении. Улучшение самочувствия людей при этом объясняется физиологически благоприятным сокращением доли лучистого теплообмена и возрастанием конвективного теплообмена при понижении температуры окружающего воздуха (например, до 15°C в точке Б).

Самочувствие и работоспособность человека зависят от работы физиологической системы терморегуляции организма, которая нормально функционирует при температуре тела около 36,6°C. Допустимые колебания этой температуры не должны превышать 0,4...1,1°C. Для обеспечения постоянной температуры требуется соблюдение общего теплового баланса человека, которое характеризуется следующим уравнением

$$Q_{\text{ч}} \pm Q_{\text{ч}}^{\text{к}} \pm Q_{\text{ч}}^{\text{л}} - Q_{\text{ч}}^{\text{и}} - Q_{\text{ч}}^{\text{р}} - Q_{\text{ч}}^{\text{ф}} \pm \Delta Q_{\text{ч}} = 0, \quad (1.11)$$

где $Q_{\text{ч}}$ – общее количество энергии, вырабатываемой организмом человека;

$Q_{\text{ч}}^{\text{к}}$ – теплообмен человека с окружающей средой конвекцией;

$Q_{\text{ч}}^{\text{л}}$ – теплообмен человека излучением;

$Q_{\text{ч}}^{\text{и}}$ – расхода теплоты на испарение влаги;

$Q_{\text{ч}}^{\text{р}}$ – расход теплоты в механическую работу;

$Q_{\text{ч}}^{\text{ф}}$ – расхода теплоты на нагрев вдыхаемого воздуха;

$\Delta Q_{\text{ч}}$ – избыток или недостаток теплоты в организме.

Ощущение температурного комфорта зависит от температуры окружающего воздуха и температуры поверхностей, обращенных в помещение. Понятие осредненная температура ограждающих поверхностей помещения (или радиационная температура) имеет большое значение, поскольку большая часть потерь теплоты организмом человека происходит путем излучения (от 45 до 60% общих потерь теплоты) [98]. Чем выше радиационная температура, тем меньшее количество тепловой энергии теряется человеком через излучение.

В некоторых источниках приводятся другие данные о лучистой составляющей общего теплообмена с окружающей средой, как указано на рисунках 1.6 и 1.7.

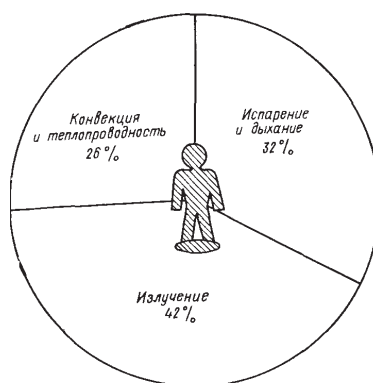


Рисунок 1.6 – Теплообмен между телом человека и окружающей средой в состоянии равновесия (по данным Каммерера) [26]

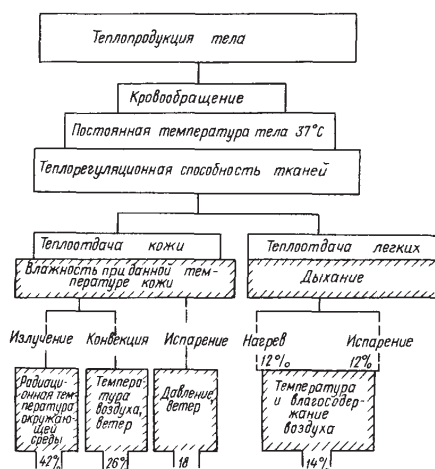


Рисунок 1.7 – Распределение теплоотдачи тела человека (по данным Браттке, Коллмара и Лизе) [26]

Тепловое состояние человека проверяется на выполнение условий комфортности, описанных в работе В.Н. Богословского [98]. Первое условие комфортности позволяет найти такое значение температуры в помещении, при котором человек, находящийся в середине помещения, не испытывает перегрева или переохлаждения. Для условий холодного времени года первое условие комфортности записывается в виде

$$t_R = 1,57 \cdot t_{\Pi} - 0,057 \cdot t_{\text{в}} \pm 1,5, \quad (1.12)$$

где t_R – радиационная температура в помещении;

t_{Π} – температура помещения;

$t_{\text{в}}$ – температура внутреннего воздуха.

Второе условие комфортности определяется комфортным тепловым состоянием человека, находящегося около нагретых или охлажденных поверхностей. Поскольку при потолочном отоплении наибольший тепловой поток поступает на поверхность головы человека, то допустимая температура отопительного прибора (из условия расстояния между отопительным прибором и головой человека 1 м) не должна превышать [98]

$$t_{\Pi}^{\text{доп}} \leq 19,2 + \frac{8,7}{\varphi_{\text{ч-п}}}, \quad (1.13)$$

где $t_{\Pi}^{\text{доп}}$ – допустимая температура нагретой поверхности на расстоянии 1 м от человека;

$\varphi_{\text{ч-п}}$ –угловой коэффициент с элементарной площадки поверхности тела человека на нагретую поверхность, который можно определить из выражения

$$\varphi_{\text{ч-п}} = 1 - 0,8 \cdot \frac{x}{\sqrt{F_{\Pi}}}. \quad (1.14)$$

С использованием этой зависимости можно построить зону допустимых температур поверхностей в помещении при условии соблюдения второго условия комфортности. Зона допустимых температур изображена на рисунке 1.8.

Отсюда можно сделать вывод, что использование низкотемпературных лучистых отопительных панелей позволяет добиться выполнения второго условия комфортности в жилом помещении.

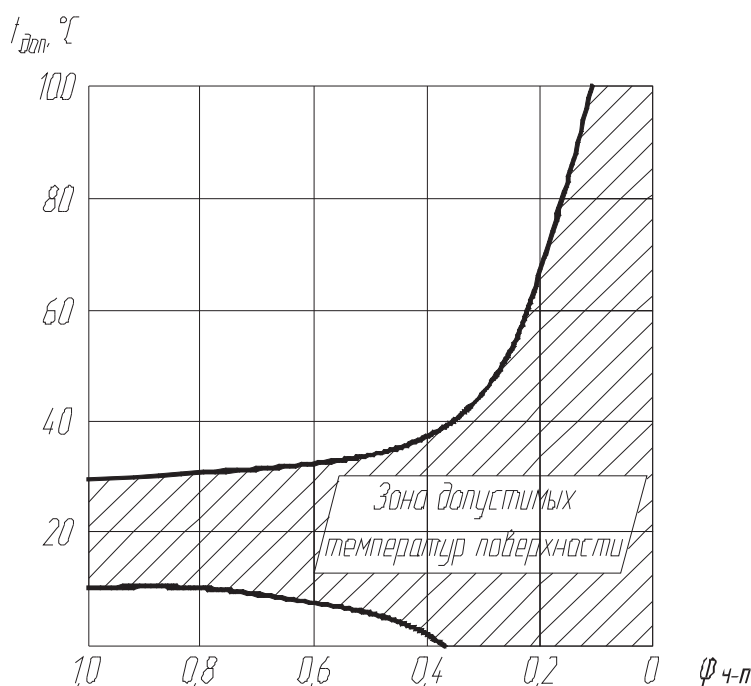


Рисунок 1.8 – Зона допустимых температур поверхности отопительного прибора из условий выполнения второго условия комфортности:

$t_{\text{доп}}$ – допустимая температура помещения, $\varphi_{\text{ч-п}}$ – угловой коэффициент излучения с поверхности головы человека на отопительную панель

1.6 Панельные отопительные приборы для систем лучистого отопления жилых и общественных зданий

Лучистые отопительные приборы отличаются от конвективных прежде всего своей конструкцией, благодаря которой доля лучистой теплоотдачи становится преобладающей. Часть теплоотдачи конвективных отопительных приборов, за

исключением устройств воздушного отопления, происходит также путем излучения.

В основу классификации отопительных приборов можно положить различные характеристики (температура поверхности прибора, конструктивное устройство, расположение прибора, теплоноситель и т.д.), но самым важным можно считать температуру поверхности отопительного прибора, поскольку она в первую очередь определяет остальные его характеристики и играет важную роль в формировании теплоощущения, что обязательно нужно принимать во внимание.

Электрические инфракрасные (ИК) обогреватели, которые используются для отопления жилых и общественных зданий, можно условно разбить на длинноволновые ИК-излучатели (температура поверхности излучателя от 100 до 200°C) и низкотемпературные ИК отопительные панели (температура излучающей поверхности от 25 до 50°C).

Температура поверхности низкотемпературных обогревателей не превышает 50°C, а спектр излучения лежит в диапазоне 9,2-9,5 мкм. К нему следует отнести универсальные стеновые отопительные панели, греющие мебель и инфракрасные сауны. Панели изготавливаются в корпусе коробчатой конструкции, внутри которой заключен кабель, похожий на кабель для теплого пола. На тыльной стороне закреплена теплоотражающая изоляция. Лицевая сторона панели окрашивается порошковыми красками - она может быть облицована при установке керамической плиткой, мрамором и любым другим натуральным или искусственным камнем. Панель обогревает помещение мягким инфракрасным излучением и не создает интенсивных потоков воздуха. Напряжение питания панелей ~ 220 В, 50 Гц. Удельная мощность панелей ~ 500 Вт/м². Степень защиты IP67. Класс защиты – 1. Гарантийный срок эксплуатации – 5 лет. Срок службы не менее 25 лет. Панели выпускаются в широком диапазоне типоразмеров.

На базе универсальных электроотопительных панелей разработаны и выпускаются:

- 1) Подоконники, которые могут быть дополнены подоконными керамическими панелями.

2) Переносные плоские панели, предназначенные для инфракрасного и контактного нагрева различных частей тела человека: ног, грудной клетки, поясницы и так далее. Для задания необходимой температуры нагрева они обеспечены терморегулятором. Напряжение питания - 220В / 50 Гц. Мощность - 50 и 90 Вт. Размеры: 34х34 и 45х45 см.

3) Нагревательное полотно (высокотехнологичный экзотермический материал), являющееся двумя слоями плотной прозрачной пленки (шириной 540мм) с герметично запаянным внутри нагревательным элементом (графитовое напыление, соединенное с электродами). Принцип работы заключается в подключении полотна к обычной электросети 220В, после чего полотно начинает излучать инфракрасные волны (энергия солнечного света). Это излучение путем нагрева всех непрозрачных предметов позволяет создать в помещении необходимую температуру.

Особый интерес для повышения теплового комфорта в жилых помещениях представляют так называемые теплоизлучающие зеркала.

Обогреватель состоит из двух 4-х мм пластин соединенных вместе (общая толщина 9 мм). На поверхность задней пластины нанесен невидимый электропроводящий слой, который и выделяет тепло, при прохождении по нему электрического тока. Передняя пластина выполняет роль электрической и механической защиты. Температура равномерная по всей поверхности электрообогревателя и не поднимается выше 75°C. В ванне или сауне такое зеркало не запотевают, не изменяет установленный уровень влажности, вписывается в любой интерьер и экологически безопасно.

Ко второй группе относятся потолочные ИК панели, или, как их еще называют, потолочные кассеты, которые представлены в модельном ряду крупнейшего их производителя - фирмы Frisco (Швеция). Остановимся на двух их модификациях: для установки вместо модуля подвесного потолка и с монтажными скобами для крепления к потолку. В свою очередь, кассеты с монтажными скобами предлагаются в брызгозащитном (IP 54) и защищенном от струй (IP 55) исполнении. Их устройство очень напоминает вышеописанные стеновые панели:

пленочный нагреватель, стальной корпус, отражающая теплоизоляция. Корпус из оцинкованной стали окрашен методом порошкового напыления. Температура поверхности панелей не превышает 100°C, что обеспечивает мягкий комфортный режим обогрева.

Так же к этой группе можно отнести ИК-молдинги Termoplus, предназначенные для установки над окнами. Нагреватель - стальной ТЭН. Передняя панель выполнена из алюминия с эмалевым покрытием повышенной прочности. В задней части корпуса имеются прорези для прохода воздуха, что позволяет обогревателю работать не только в ИК режиме, но и в режиме конвектора. Температура излучающей поверхности - 200°C. Напряжение питания - 220 или 360 В. Ширина и высота для всех моделей одинаковые - 90 × 215; 100 мм, а вот длина может быть разной. Поставляются в трех исполнениях:

- ЕС – для сухих помещений, управляются внешним термостатом или селектором мощности;
- ECVT – для влажных помещений, имеют встроенный термостат и шнуровой выключатель;
- ECV – для влажных помещений, могут использоваться как ведомые к приборам ECVT или самостоятельно (работают от внешнего управляющего устройства).

1.7 Расчет и проектирование систем лучистого отопления

Задачей расчета является нахождение температуры внутренней поверхности ограждений с учетом лучистого теплообмена между отопительной панелью и остальными взаимно параллельными и перпендикулярными поверхностями и конвективного теплообмена между воздухом и ограждениями. Знание этих температур позволяет проверить соблюдение комфортной температурной обстановки, уточнить теплотери помещения и тепловую мощность отопительной панели. В зависимости от полученных значений температур поверхностей

наружных ограждений теплотери помещения будут отличаться от теплотерь при конвективном отоплении [23,24].

Большая часть тематической литературы и исследований посвящена изучению газовых излучателей. Установка таких приборов в жилых и некоторых общественных зданиях запрещена действующими строительными нормами [80, 81, 88, 89], что делает существующие методики расчета отопления неподходящими.

Тем менее, некоторые отечественные и зарубежные авторы работали над методикой расчета и проектирования низкотемпературных систем отопления [23, 24, 26, 30, 120, 121].

Авторы [26] и [30] приводят подробное описание методик расчета для различных отопительных приборов с теплоносителем-водой. Но в этом случае конвективная составляющая между отопительным прибором и ограждающими конструкциями превышает лучистую. Соотношение конвективной и лучистой теплоотдачи при различных способах отопления по данным [26] показана на рисунке 1.9.

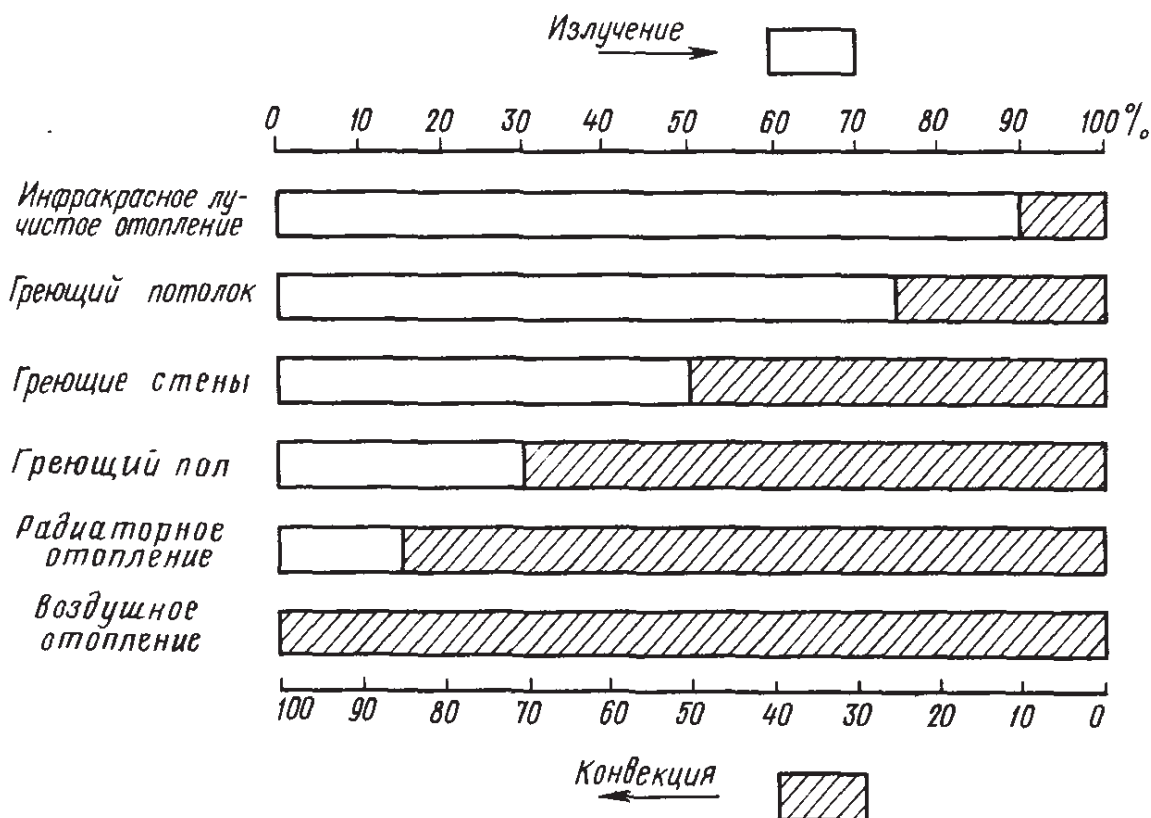


Рисунок 1.9 – Соотношение конвективной и лучистой теплоотдачи при различных способах отопления

Авторы [121] представляют достаточно подробную методику расчета системы отопления с подвесными панелями. Поскольку теплоотдача панели значительно зависит от параметров теплоносителя-воды, большая часть расчётов основана на определении параметров панели в зависимости от параметров воды.

Формулы теплового баланса, приведенные в [23, 26, 121-123] представляют собой аналитические зависимости, с помощью которых можно производить расчет системы отопления, но проведение расчетов значительно затруднено, так как отсутствует методика определения углового коэффициента.

Следовательно, для разработки методики расчета систем лучистого отопления необходимо определить аналитические зависимости для вычисления углового коэффициента.

1.8 Угловые коэффициенты

В задачах теплообмена излучением между поверхностями, разделенными друг от друга лучепрозрачной, то есть неизлучающей, непоглощающей и нерассеивающей средой, определяющее влияние на теплообмен излучением оказывает взаимная ориентация поверхностей в пространстве. В таких случаях вводится понятие углового коэффициента.

Различают элементарный, локальный и средний угловые коэффициенты. Элементарный угловой коэффициент определяет условия теплообмена излучением между двумя элементарными площадками dF_1 и dF_2 . Он характеризует долю полусферического потока энергии, испускаемого одной и падающего на другую элементарную площадку. Локальный угловой коэффициент определяет условия теплообмена излучением между элементом dF_1 поверхности F_1 одного тела и конечной поверхностью F_2 другого тела. Он характеризует долю полусферического потока энергии, испускаемого элементарной площадкой одного тела и падающего на всю поверхность другого. Средний угловой коэффициент определяет условия теплообмена излучением между поверхностями F_1 и F_2 двух тел конечных размеров. Он характеризует долю полусферического

потока энергии, испускаемого одной и падающего на другую поверхность тел конечных размеров [59, 60].

Рассмотрим две диффузно излучающие поверхности F_1 и F_2 , поддерживаемые при постоянных температурах T_1 и T_2 соответственно. Пусть dF_1 и dF_2 – две элементарные площадки поверхностей F_1 и F_2 и r_{12} ($r_{12} = -r_{21}$) – вектор, соединяющий dF_1 и dF_2 . Единичные векторы n_1 и n_2 , направленные по нормали к dF_1 и dF_2 , образуют углы φ_1 и φ_2 с линией, соединяющей эти элементарные площадки [59].

Для решения задач лучистого теплообмена в помещении с лучистыми отопительными приборами требуется определение среднего углового коэффициента.

Средний угловой коэффициент между поверхностями F_1 и F_2 определяется следующим образом

$$F_{F_1-F_2} = \frac{\left[\begin{array}{c} \text{Энергия излучения, испускаемого} \\ \text{поверхностью } F_1 \text{ и непосредственно} \\ \text{достигающего } F_2 \end{array} \right]}{\left[\begin{array}{c} \text{Полная энергия излучения, испускаемого} \\ \text{поверхностью } F_1 \text{ во всех направлениях} \\ \text{в пределах полусферического телесного угла} \end{array} \right]}. \quad (1.15)$$

Если энергия излучения первого тела I_1 не зависит от направления и постоянна по всей поверхности F_2 , то из (1.8) получаем

$$F_{F_1-F_2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_2 dF_1. \quad (1.16)$$

Выражение для диффузного среднего углового коэффициента между поверхностями, когда энергия излучения второго тела I_2 не зависит от направления и постоянна по всей поверхности F_2 , получается непосредственно из 1.8 путем простой перестановки индексов 1 и 2 [59]

$$F_{F_2-F_1} = \frac{1}{F_2} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_2 dF_1. \quad (1.17)$$

Из (1.16) и (1.17) получается следующее соотношение взаимности [50-52]

$$F_1 F_{F_1-F_2} = F_2 F_{F_2-F_1}. \quad (1.18)$$

Вычисление угловых коэффициентов прямым интегрированием требует двух- или четырехкратного интегрирования, что представляет значительные трудности для большинства конфигураций, кроме самых простых. Даже применение численных методов может быть весьма проблематичным из-за особенности подинтегрального выражения, а также чрезмерных затрат времени при использовании ПК для вычисления. Тем не менее, значительные усилия были направлены на разработку методов определения угловых коэффициентов [50].

Д. Гамильтон и У. Морган [110] вычислили диффузные угловые коэффициенты для простых конфигураций, включая прямоугольники, треугольники и цилиндры, и представили результаты в виде графиков и таблиц. Также угловые коэффициенты для тел простой формы собраны в работах Г. Лойербергера и Р. Пирсона [111], Ф. Крейта [112], а также Э. Спэрроу и Р. Сесса [49], Р. Зигеля и Дж. Хауэлла [51]. Помимо этого аналитические и экспериментальные методы определения угловых коэффициентов описаны в работах М. Якоба [113], а также Э. Эккерта и Р. Дрейка [114], кроме того в работе Ф. Крейта и У. Блека приведены графики для определения коэффициентов некоторых более сложных конфигураций [112].

Угловые коэффициенты для тел сложной формы часто могут быть выражены через известные угловые коэффициенты для более простых тел при помощи принципа суперпозиции и соотношений взаимности для угловых коэффициентов, который называется алгеброй диффузных угловых коэффициентов [110].

Для некоторых конфигураций угловые коэффициенты можно определить дифференцированием [59] или методом натянутых нитей Хоттеля, предложенный

в 1935 г. Г.Л. Поляком [116] и теоретически обоснованный Г. Хоттелем и А. Серафимом [117]. Также аналитический метод определения угловых коэффициентом предложен В. Нуссельтом [118].

Тем не менее, в упомянутых работах описаны локальные угловые коэффициенты. Но в жилом помещении размеры внутренних поверхностях соизмеримы с площадью отопительных приборов, поэтому практическую значимость представляют средние коэффициенты, и их определение требует прямого интегрирования. Интегрирование по поверхности можно заменить интегрированием по контуру в соответствии с теоремой Стокса [57]. Этот способ составляет основу метода контурного интегрирования для определения диффузных угловых коэффициентов. Данный метод был первоначально применен в работе П. Муна [119].

Выражение для определения среднего углового коэффициента между поверхностями конечных размеров A_1 и A_2 в этом случае будет иметь вид (рис. 1.10)

$$2 \cdot \pi A_1 F_{A_1-A_2} = \oint_{\text{контур } A_1} \oint_{\text{контур } A_2} (\ln r \, dx_2 dx_1 + \ln r \, dy_2 dy_1). \quad (1.19)$$

Контуры прямоугольников разделяются на участки и интегрирование выполняется сначала по контуру A_2 , а потом по контуру A_1 . В итоге получается следующее выражение

$$\begin{aligned} 2 \cdot \pi a b F_{A_1-A_2} = & \int_{y_1=b}^0 \int_{y_2=0}^b \ln[(y_2 - y_1)^2 + c^2]^{1/2} dy_2 dy_1 + \\ & + \int_{y_1=b}^0 \int_{y_2=b}^0 \ln[a^2 + (y_2 - y_1)^2 + c^2]^{1/2} dy_2 dy_1 + \\ & + \text{интегралы по участкам II, III, IV}. \end{aligned} \quad (1.20)$$

Данное выражение слишком громоздко, что делает его использование для вычислений теплообмена в жилом помещении неоправданно трудоемким.

Схема расчета среднего углового коэффициента методом контурного интегрирования с указанием основных переменных приведена на рисунке 1.10.

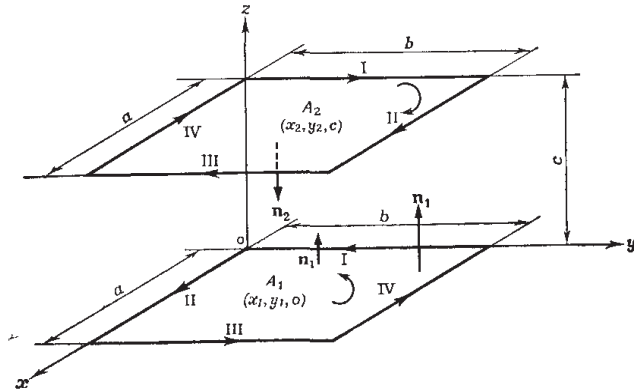


Рисунок 1.10 – Расчет среднего углового коэффициента методом контурного интегрирования

Вопросы определения угловых коэффициентов рассматривались отечественными учеными: А.Г. Блохом [59], Г.Л. Поляком [116], М.А. Михеевым [56], Ю.А. Табунщиковым [99], Е.Г. Малявиной [120].

Малявина приводит аналитические выражения для определения средних угловых коэффициентов.

Для двух одинаковых поверхностей, расположенных в параллельных плоскостях напротив друг друга средний угловой коэффициент определяется следующим образом

$$\varphi_{j-i} = \frac{2}{\pi xy} \left(0,5 \ln \frac{zw}{z+w-1} + y\sqrt{z} \cdot a \cdot \operatorname{tg} \frac{y}{\sqrt{z}} + x\sqrt{w} \cdot \operatorname{atg} \frac{x}{\sqrt{w}} - y \cdot \operatorname{arctg}(y) - x \cdot \operatorname{arctg}(x) \right), \quad (1.21)$$

где a, b – стороны прямоугольников, м;

n – расстояние между ними, м;

При этом $x = b/n$, $y = a/n$, $z = 1 + x^2$, $w = 1 + y^2$.

Для поверхностей, расположенных в перпендикулярных плоскостях, имеющих общую грань, средний угловой коэффициент определяется следующим образом

$$\varphi_{j-i} = \frac{1}{\pi} \left(\arctg \frac{a}{b} + \frac{c}{b} \arctg \frac{a}{c} - \sqrt{1 + \frac{c^2}{b^2}} \cdot \arctg \frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}} - \right. \\ \left. - 0,25 \frac{a}{b} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2) \cdot a^2}{(a^2 + b^2)(a^2 + c^2)} + 0,25 \frac{b}{a} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2)}{(b^2 + c^2)(a^2 + b^2)} + 0,25 \frac{c^2}{ab} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2)c^2}{(a^2 + c^2)(b^2 + c^2)} \right), \quad (1.22)$$

где a – общая грань, м;

b, c – сторона соответственно 1-го и 2-го прямоугольника, м.

Приведенные выражения довольно удобны для вычисления углового коэффициента с помощью современных возможностей ПК и специального программного обеспечения. Тем не менее, для расчетов лучистого теплообмена в помещениях с ИК отоплением они не применимы в виду изначальных ограничений. Размеры подавляющего большинства низкотемпературных отопительных приборов значительно меньше размеров внутренних ограждений. К тому же, варианты установки отопительных панелей практически исключают наличие общей грани у прибора и обогреваемой поверхности.

1.9 Выводы по первому разделу

– Отопление является одной из наиболее затратных составляющих инженерного обеспечения. Централизованное отопление требует реконструкции сетей теплоснабжения. По оценкам специалистов, потери энергии при таком отоплении достигают 40% (в развитых странах - 2%).

– Анализ публикаций в специализированных журналах позволяет утверждать, что доля автономных источников отопления, включая отопительные панели, неуклонно возрастает.

– Необходимо повышать энергическую эффективность отопления жилых и общественных зданий, в том числе, за счет внедрения низкотемпературных систем лучистого отопления.

- Не существует единой классификации инфракрасных отопительных приборов, а также единой нормативной методики проектирования систем лучистого отопления жилых и общественных зданий.

- Длинноволновое инфракрасное излучение, используемое низкотемпературными лучистыми панелями, не наносит вреда организму человека, домашних животных и растений.

- Необходимо разработать методику расчета отопительной системы при лучистом отоплении на основе интегральных уравнений теплового баланса, для чего, в свою очередь, необходима методика определения угловых коэффициентов.

Для повышения эффективности систем лучистого отопления жилых и общественных зданий следует провести теоретические и экспериментальные исследования процессов теплообмена в помещениях с лучистым отоплением.

Задачи исследования состоят в следующем:

- провести анализ эффективности использования лучистых отопительных приборов в жилых и общественных зданиях;

- разработать математическую модель определения средних диффузных угловых коэффициентов при теплообмене излучением в помещении;

- создать экспериментальную установку и провести исследования температурных режимов помещения, особенностей теплообмена на внутренней поверхности наружных ограждений и теплопередачи через них при низкотемпературном лучистом отоплении;

- на базе проведенных аналитических и экспериментальных исследований разработать методику расчета температурного режима отапливаемого помещения и усовершенствовать методику расчета теплопотерь при проектировании систем низкотемпературного лучистого отопления;

- обосновать экономическую эффективность внедрения систем низкотемпературного лучистого отопления.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОМЕЩЕНИИ

2.1 Теплообмен в помещении при лучистом отоплении

При эксплуатации зданий определяющим является тепловой режим помещений, от которого зависит ощущение теплового комфорта людей, нормальное протекание производственных процессов, состояние и долговечность конструкций здания и его оборудования. Как уже отмечалось, тепловая обстановка в помещении определяется совместным действием ряда факторов: температуры, подвижности и влажности воздуха помещения, наличием струйных течений, распределением параметров воздуха в плане и по высоте помещения, а также радиационным излучением окружающих поверхностей, зависящим от их температуры, геометрии и радиационных свойств. Под действием конвективного и лучистого теплообмена и процессов массопереноса температуры воздуха и поверхностей в помещении взаимосвязаны и оказывают воздействие друг на друга [49-50].

Для изучения формирования микроклимата, его динамики и способов воздействия на него нужно знать законы теплообмена в помещении [49-50].

Температуры поверхностей в помещении неодинаковы. Обычно зимой и летом наружные ограждения и приборы систем отопления – охлаждения бывают более нагретыми или охлажденными по сравнению с внутренними стенами, которые имеют температуру, близкую к температуре воздуха в помещении. Между поверхностями происходит теплообмен излучением, подчиняющийся общим физическим закономерностям, пользоваться которыми в инженерных расчетах сложно. Лучистый теплообмен в помещении происходит в условиях ограниченного диапазона значений температур, определённых радиационных свойств поверхностей и геометрии их расположения [49-50]. Потоки взаимного обмена энергией излучения между поверхностями помещения в этом случае, изображены на рисунке 2.1.

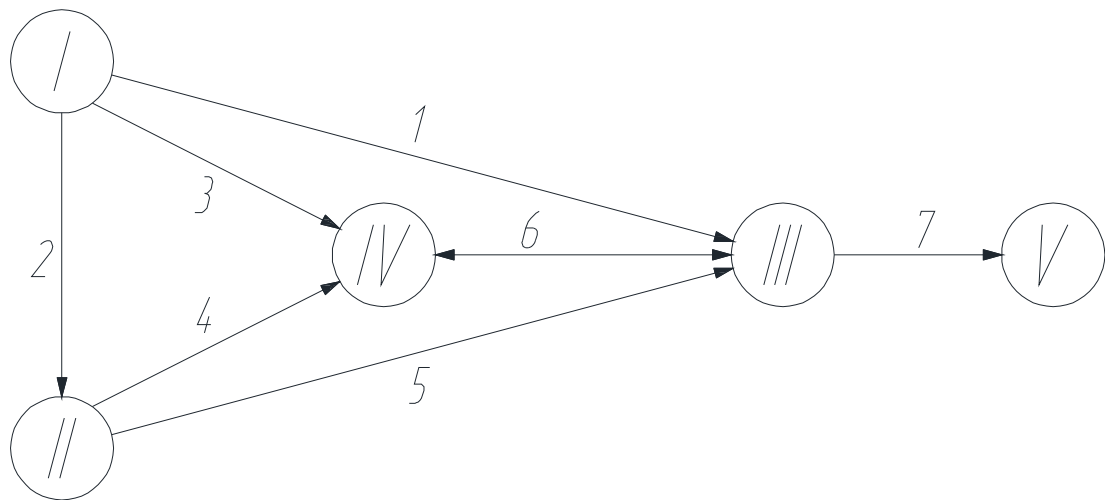


Рисунок 2.1 – Граф тепловых потоков в помещении:

I – отопительная панель, II – внутренние поверхности внутренних ограждений, III – наружное ограждение, IV – внутренний воздух в помещении, V – наружный воздуха, 1 – лучистый теплообмен между отопительной панелью и наружным ограждением, 2 – лучистый теплообмен между панелью и внутренними ограждениями, 3 – конвективный теплообмен между панелью и внутренним воздухом, 4 – конвективный теплообмен между внутренним ограждением и внутренним воздухом, 5 – лучистый теплообмен между внутренними и наружным ограждениями, 6 – конвективный теплообмен между наружным ограждением и внутренним воздухом, 7 – теплопередача с внутренней поверхности наружного ограждения к наружному воздуху

Теплообмен в помещении рассчитывается при установившемся состоянии и тепловые потоки от греющей панели в помещение и из помещения наружу считают равными.

Задачей расчета является нахождение температуры внутренней поверхности ограждений с учетом лучистого теплообмена между отопительной панелью и остальными взаимно параллельными и перпендикулярными поверхностями и конвективного теплообмена между воздухом и ограждениями. Знание этих температур позволяет проверить соблюдение комфортной температурной обстановки, уточнить теплотери помещения и тепловую мощность отопительной панели. В зависимости от полученных значений температур внутренних

поверхностей наружных ограждений теплотери помещения будут отличаться от теплотерь при конвективном отоплении.

В помещении обычной конструкции имеются поверхности шести видов, участвующие в теплообмене: наружные стены, окна, пол, потолок, внутренние стены, отопительная панель. Эти поверхности можно разделить на три группы: источник тепловых потерь (наружные ограждения), адиабатные (внутренние ограждения) и источник теплоступлений (отопительная панель).

Следует также отметить, что жилое помещение представляет собой замкнутую систему из N поверхностей конечных размеров. Для упрощения решения задачи теплообмена принимаются следующие предположения:

- каждая поверхность системы – изотермическая. Для неизотермических поверхностей это условие может быть достигнуто путем деления поверхности на более мелкие зоны, в пределах которых температура может быть принята постоянной;
- каждая поверхность системы – серая;
- излучение, испускаемое каждой поверхностью, диффузно распределяется в полупространстве;
- поверхностная плотность потока эффективного излучения одинакова во всех точках каждой из поверхностей системы. При этом угловые коэффициенты не зависят от величины и поверхностного распределения потоков излучения.

Задачей расчета является нахождение температуры внутренней поверхности ограждений с учетом лучистого теплообмена между отопительной панелью и остальными взаимно параллельными и перпендикулярными поверхностями и конвективного теплообмена между воздухом и ограждениями. Знание этих температурных условий позволяет проверить соблюдение комфортной тепловой обстановки, уточнить теплотери помещения и тепловую мощность отопительной системы. В зависимости от полученных значений температуры поверхности наружных ограждений теплотери помещения будут отличаться от теплотерь при конвективном отоплении.

В общем виде уравнение теплового баланса для внутренней поверхности наружного ограждения 1 площадью A_1 при установившемся состоянии

$$Q_H = Q_L + Q_K. \quad (2.1)$$

Q_H выражает тепловой поток от внутренней поверхности ограждения 1 при температуре τ_1 к наружному воздуху при температуре t_H

$$Q_H = \int_{A_1} \frac{\tau_{dA_1} - t_H}{R'_{0dA_1}} dA_1, \quad (2.2)$$

где R'_{0dA_1} - неполное (без сопротивления теплообмену на внутренней поверхности) сопротивление теплопередаче ограждения. Так как большая часть наружных ограждений не являются однородными (например, балконные двери в квартирах, световые проемы в большинстве жилых и общественных зданиях), то в расчетах следует использовать приведенные значения термического сопротивления неоднородной ограждающей конструкции, рассчитанные согласно нормативным документам.

Лучистый теплообмен поверхности ограждения 1 площадью A_1 с другими поверхностями ограждений i -той площадью A_i выражается уравнением

$$Q_L = \sum_i \int_{A_i} \int_{A_1} \varphi_{dA_i-dA_1} \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_{dA_i}}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_{dA_1}}{100} \right)^4 \right] dA_i dA_1. \quad (2.3)$$

В это уравнение включается сумма лучистых потоков с других поверхностей на поверхность A_1 и собственный лучистый поток с поверхности A_1 на остальные поверхности A_i без учета отраженного излучения.

Результирующая конвективного теплообмена между воздухом и поверхностью A_1 составляет

$$Q_K = \int_{A_1} \alpha_{K.dA_1} (t_B - \tau_{dA_1}) dA_1, \quad (2.4)$$

где $\alpha_{K.dA_1}$ - локальное значение коэффициента теплообмена конвекцией на элементе поверхности dA_1 .

Уравнение теплового баланса для поверхности площадью A_1 после подстановок имеет вид

$$\begin{aligned} \int_{A_1} \frac{\tau_{dA_1} - t_H}{R_{0dA_1}} dA_1 = \sum_i \int_{A_i} \int_{A_1} \varphi_{dA_i-dA_1} \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_{dA_i}}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_{dA_1}}{100} \right)^4 \right] dA_i dA_1 + \\ + \int_{A_1} \alpha_{K.dA_1} (t_B - \tau_{dA_1}) dA_1. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Для дальнейшего упрощения практических расчетов систему алгебраических уравнений можно привести к одному уравнению, определяющему теплообмен между нагретой поверхностью, остальными поверхностями и воздухом помещения. При этом остальные поверхности помещения можно заменить условной поверхностью, используя свойство замыкаемости угловых коэффициентов.

Также на основе анализа специальной литературы [56,125] можно сделать следующее допущение: так как большинство строительных материалов имеет достаточно высокие коэффициенты излучения (около 90% излучения абсолютно черного тела), можно пренебречь отражениями лучистой теплоты и рассматривать только первичное поглощение теплоты каждой поверхностью.

В этом случае выражение (2.5) приобретает вид

$$\begin{aligned} \frac{C_1 C_2}{C_0} \left[\left(\frac{T_H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_X}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{H-X} + \frac{C_1 C_3}{C_0} \left[\left(\frac{T_{BH}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_X}{100} \right)^4 \right] \cdot (1 - \varphi_{H-X}) + (T_B - T_X) \cdot \alpha_K + \\ (T_H - T_X) k' = 0, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где C_1, C_2, C_3 – коэффициенты излучения отопительной панели, внутренней поверхности наружного ограждения, внутренней поверхности адиабатных поверхностей, соответственно;

$T_{\text{п}}$ – температура отопительной панели, К;

$T_{\text{х}}$ – температура внутренней поверхности наружного ограждения, К;

$T_{\text{вн}}$ – температура внутренней поверхности адиабатной поверхности соответственно, К;

$\varphi_{\text{п-х}}$ – угловой коэффициент между отопительной панелью и внутренней поверхностью наружного ограждения;

$T_{\text{в}}$ – температура внутреннего воздуха, К;

$T_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, К;

k' – коэффициент теплопередачи через наружное ограждение, Вт/м²·К;

$\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент конвективного теплообмена между внутренней поверхностью наружного ограждения и внутренним воздухом Вт/м²·К.

Согласно исследованиям, результаты которого приведены авторами в работах [23, 24, 26], температура внутреннего воздуха в помещении с лучистым отоплением равна температуре внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции. В этом случае выражение $T_{\text{в}} - T_{\text{х}}$ равно нулю, следовательно, слагаемое $(T_{\text{в}} - T_{\text{х}}) \cdot \alpha_{\text{к}}$ также равно нулю.

Также незначительна разница температур между температурой внутренней поверхности наружного ограждения и температурой внутренней поверхности адиабатных поверхностей, что позволяет пренебречь слагаемым $\frac{C_1 C_3}{C_0} \left[\left(\frac{T_{\text{вн}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{х}}}{100} \right)^4 \right] \cdot (1 - \varphi_{\text{п-х}})$. Тогда выражение 2.6 приобретает вид

$$\frac{C_1 C_2}{C_0} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{х}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{\text{п-х}} + (T_{\text{н}} - T_{\text{х}}) k' = 0. \quad (2.7)$$

Основная задача расчета теплообмена – определение температуры внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции на основании исходных данных:

- температуры наружного воздуха;
- параметры отопительной панели;
- степень черноты строительных материалов.

Для решения этой задачи выражение (2.7) можно представить в виде

$$\sigma_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{\text{п-х}} \cdot T_{\text{х}}^4 + T_{\text{х}} \cdot k' - \sigma_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{\text{п-х}} \cdot T_{\text{п}}^4 - T_{\text{н}} \cdot k' = 0. \quad (2.8)$$

Выражение 2.8, полученное автором, представляет собой удобное выражение для определения температуры внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции.

2.2 Определение средних диффузных угловых коэффициентов

Излучатель и поверхности помещения друг относительно друга могут располагаться либо в перпендикулярных, либо в параллельных плоскостях. Соответствующие схемы изображены на рисунках 2.2 и 2.3.

На первой схеме векторы нормали к поверхностям 1 и 2 $\overline{n_1} = (0; 1; 0)$ и $\overline{n_2} = (0; 0; 1)$. Обозначим координаты точки А $(x_A; 0; z_A)$ и точки В $(x_B; y_B; 0)$. Тогда $\overline{AB} = (x_B - x_A; y_B; -z_A)$. Учитывая, что из постановки задачи углы φ_1 и φ_2 - острые

$$\cos \varphi_1 = \frac{\overline{AB} \cdot \overline{n_1}}{|\overline{AB}| \cdot |\overline{n_1}|} = \frac{y_B}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + y_B^2 + z_A^2}}; \quad (2.9)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{\overline{BA} \cdot \overline{n_2}}{|\overline{BA}| \cdot |\overline{n_2}|} = \frac{z_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + y_B^2 + z_A^2}}. \quad (2.10)$$

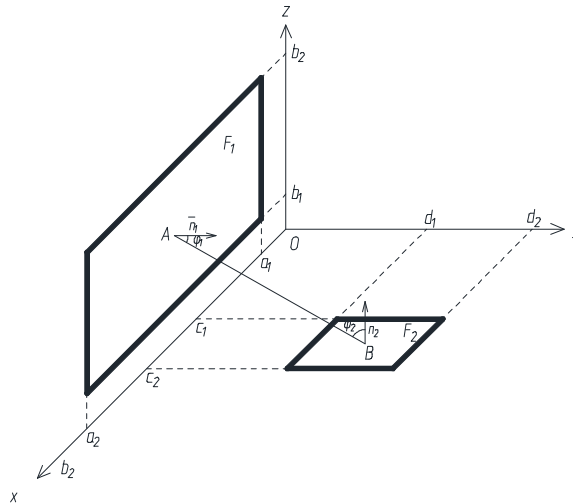


Рисунок 2.2 – Схема к расчету взаимной поверхности облучения в случае, когда излучатель и поверхность помещения расположены в перпендикулярных плоскостях:

F_1 – ограждающая конструкция; F_2 – отопительная панель; a_i, b_j – координаты ограждающей конструкции; c_k, d_i – координаты панели; n_1, n_2 – векторы нормали к поверхностям ограждающей конструкции и отопительной панели соответственно; A, B – точки на поверхностях ограждающей конструкции и отопительной панели; φ_1, φ_2 – угол между вектором нормали и отрезком AB

С учетом того, что $r = AB$, выражение (2.9) для двух поверхностей, расположенных в перпендикулярных плоскостях, можно представить следующим образом

$$H_{12} = \frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{a_2} dx_a \int_{x_1}^{x_2} dx_b \int_{b_1}^{b_2} dz_A \int_{y_1}^{y_2} \frac{y_B z_A dy_B}{\left[(x_B - x_A)^2 + y_B^2 + z_A^2 \right]^2}. \quad (2.11)$$

Область интегрирования представляет собой умножение двух плоских прямоугольников. Первый из них F_1 расположен в плоскости xz и имеет размеры $(a_2 - a_1)$ вдоль оси x и $(b_2 - b_1)$ вдоль оси z , а второй F_2 расположен в плоскости xy и имеет размеры $(c_2 - c_1)$ вдоль оси x и $(d_2 - d_1)$ вдоль оси y (рис. 2.2).

Так как область интегрирования правильная по всем переменным, то порядок интегрирования определяется видом подынтегральной функции. Из соображений удобства выбираем следующий порядок интегрирования

$$H_{12} = \frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{a_2} dx_a \int_{c_1}^{c_2} dx_b \int_{b_1}^{b_2} dz_a \int_{d_1}^{d_2} \frac{y_b z_a dy_b}{[(x_b - x_a)^2 + y_b^2 + z_a^2]^2}. \quad (2.12)$$

Внутренний интеграл вычисляется с помощью замены $t = (x_b - x_a)^2 + y_b^2 + z_a^2$ и, переходя к тройному интегралу получим

$$H_{12} = -\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^2 (-1)^i \int_{a_1}^{a_2} dx_a \int_{c_1}^{c_2} dx_b \int_{b_1}^{b_2} \frac{z_a dz_a}{(x_b - x_a)^2 + d_i^2 + z_a^2}. \quad (2.13)$$

Здесь внутренний интеграл также легко интегрируется с помощью замены $s = (x_b - x_a)^2 + d_i^2 + z_a^2$. В результате чего получим двойной интеграл

$$H_{12} = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+j} \int_{a_1}^{a_2} dx_a \int_{c_1}^{c_2} \ln[(x_b - x_a)^2 + d_i^2 + b_j^2] dx_b. \quad (2.14)$$

Для дальнейшего интегрирования найдем отдельно интеграл вида

$$I_1 = \int_{c_1}^{c_2} \ln[(x_b - x_a)^2 + a^2] dx_b. \quad (2.15)$$

Воспользуемся методом интегрирования по частям. Обозначим

$$v = \ln[(x_b - x_a)^2 + a^2]; \quad (2.16)$$

$$dv = dx_b. \quad (2.17)$$

Тогда:

$$du = \frac{2(x_b - x_a)dx_b}{(x_b - x_a)^2 + a^2}, \quad (2.18)$$

$$v = x_b; \quad (2.19)$$

$$du = \frac{2(x_b - x_a)dx_b}{(x_b - x_a)^2 + a^2}, \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= x_b \ln[(x_b - x_a)^2 + a^2] - 2 \int \frac{(x_b^2 - 2x_b x_a + x_a^2 + a^2) + (x_b - x_a)x_a - a^2}{(x_b - x_a)^2 + a^2} dx_b = \\ &= x_b \ln[(x_b - x_a)^2 + a^2] - 2 \int dx_b - 2 \int \frac{(x_b - x_a)x_a}{(x_b - x_a)^2 + a^2} dx_b + \int \frac{a^2 dx_b}{(x_b - x_a)^2 + a^2} = \\ &= x_b \ln[(x_b - x_a)^2 + a^2] - 2x_b - x_a \ln[(x_b - x_a)^2 + a^2] + 2a \cdot \arctg \frac{x_b - x_a}{a} = (2.21) \\ &= (x_b - x_a) \ln[(x_b - x_a)^2 + a^2] - 2x_b - x_a \ln[(x_b - x_a)^2 + a^2]. \end{aligned}$$

Учитывая, что $a = \sqrt{d_i^2 + b_j^2}$ с учетом найденного интеграла I_1 перейдем к обычному определенному интегралу

$$H_{12} = -\frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{k+i+j} \int_{a_1}^{a_2} \left\{ (c_k - x_a) \ln[(x_b - x_a)^2 + d_i^2 + b_j^2] + \right. \\ \left. + 2\sqrt{d_i^2 + b_j^2} \cdot \arctg \frac{c_k - x_a}{\sqrt{d_i^2 + b_j^2}} \right\} dx_a. \quad (2.22)$$

Для окончательного интегрирования понадобятся два интеграла вида

$$I_2 = 2a \int \arctg \frac{c_k - x_a}{a} dx_a; \quad (2.23)$$

$$I_3 = \int (c_k - x_a) \ln[(c_k - x_a)^2 + d_i^2 + b_j^2] dx_a. \quad (2.24)$$

Для нахождения этих интегралов применим метод интегрирования по частям

$$I_2 = 2a \int \arctg \frac{c_k - x_a}{a} dx_a = \left| u = 2a \cdot \arctg \frac{(c_k - x_a)}{a}; du = -\frac{2a^2 dx_a}{(c_k - x_a) + a^2} \right| = \\ dv = dx_a; v = x_a \\ = 2a \cdot x_a \cdot \arctg \frac{(c_k - x_a)}{a} + \int \frac{2a^2 dx_a}{(c_k - x_a) + a^2} = \\ = 2a \cdot x_a \cdot \arctg \frac{(c_k - x_a)}{a} - \int \frac{2a^2 (c_k - x_a) dx_a}{(c_k - x_a) + a^2} + \int \frac{2a^2 c_k dx_a}{(c_k - x_a) + a^2} = \\ = 2a \cdot x_a \cdot \arctg \frac{(c_k - x_a)}{a} + a^2 \ln[(c_k - x_a)^2 + a^2] - 2a \cdot c_k \arctg \frac{(c_k - x_a)}{a} = \\ = -2a(c_k - x_a) \arctg \frac{(c_k - x_a)}{a} + a^2 \ln[(c_k - x_a)^2 + a^2];$$

$$I_3 = \int (c_k - x_a) \ln[(c_k - x_a)^2 + a^2] dx_a = \\ = \left| u = \ln[(c_k - x_a)^2 + a^2]; du = -\frac{2(c_k - x_a) dx_a}{(c_k - x_a) + a^2} \right| = \\ dv = (c_k - x_a) dx_a; v = -\frac{1}{2}(c_k - x_a)^2 \\ = -\frac{1}{2}(c_k - x_a)^2 \ln[(c_k - x_a)^2 + a^2] - \int \frac{(c_k - x_a)^3 dx_a}{(c_k - x_a)^2 + a^2} =$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{2}(c_k - x_a)^2 \ln[(c_k - x_a)^2 + a^2] - \int \frac{(c_k - x_a)^3 + a^2(c_k - x_a) - a^2(c_k - x_a)dx_a}{(c_k - x_a)^2 + a^2} = \\
&= -\frac{1}{2}(c_k - x_a)^2 \ln[(c_k - x_a)^2 + a^2] - \int (c_k - x_a)dx_a + \frac{a^2}{2} \int \frac{(c_k - x_a)dx_a}{(c_k - x_a)^2 + a^2} = \\
&= -\frac{1}{2}[(c_k - x_a)^2 + a^2] \ln[(c_k - x_a)^2 + a^2] + \frac{1}{2}(c_k - x_a)^2.
\end{aligned}$$

Учитывая, что $a = \sqrt{d_i^2 + b_j^2}$, и используя найденные интегралы I_2 и I_3 , окончательно получим

$$\begin{aligned}
H_{12} = & -\frac{1}{4\pi} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{l+k+i+j} \left\{ -\frac{1}{2}[(c_k - a_l)^2 + d_i^2 + b_j^2] \ln[(c_k - a_l)^2 + d_i^2 + \right. \\
& \left. b_j^2] + \frac{1}{2}(c_k - a_l)^2 - 2(c_k - a_l) \sqrt{d_i^2 + b_j^2} \cdot \arctg \frac{c_k - a_l}{\sqrt{d_i^2 + b_j^2}} + (d_i^2 + b_j^2) \ln[(c_k - a_l)^2 + d_i^2 + b_j^2] \right\}.
\end{aligned} \quad (2.27)$$

В результате интегрирования получено следующее аналитическое выражение для определения взаимной поверхности облучения

$$H_{12} = H_{21} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \frac{(-1)^{i+j+k+l}}{\pi} \left\{ \frac{1}{8}[(c_k - a_l)^2 - d_i^2 - b_j^2] \cdot \ln[(c_k - a_l)^2 + d_i^2 + b_j^2] + \right. \\
\left. + \frac{1}{2}(c_k - a_l) d \sqrt{d_i^2 + b_j^2} \arctg \frac{c_k - a_l}{\sqrt{d_i^2 + b_j^2}} \right\}. \quad (2.28)$$

На второй схеме (Рис. 2.3) векторы нормали к поверхностям 1 и 2 $\overline{n_1} = (0; 0; 1)$ и $\overline{n_2} = (0; 0; -1)$.

Обозначим координаты точки А $(x_A; y_A; 0)$ и точки В $(x_B; y_B; h)$, где h – расстояние между плоскостями. Тогда $\overline{AB} = (x_B - x_A; y_B - y_A; h)$. Учитывая, что из постановки задачи углы φ_1 и φ_2 – острые, то

$$\cos \varphi_1 = \frac{\overline{AB} \cdot \overline{n_1}}{|\overline{AB}| \cdot |\overline{n_1}|} = \frac{h}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + h^2}}; \quad (2.29)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{\overline{BA} \cdot \overline{n_2}}{|\overline{BA}| \cdot |\overline{n_2}|} = \frac{h}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + h^2}}. \quad (2.30)$$

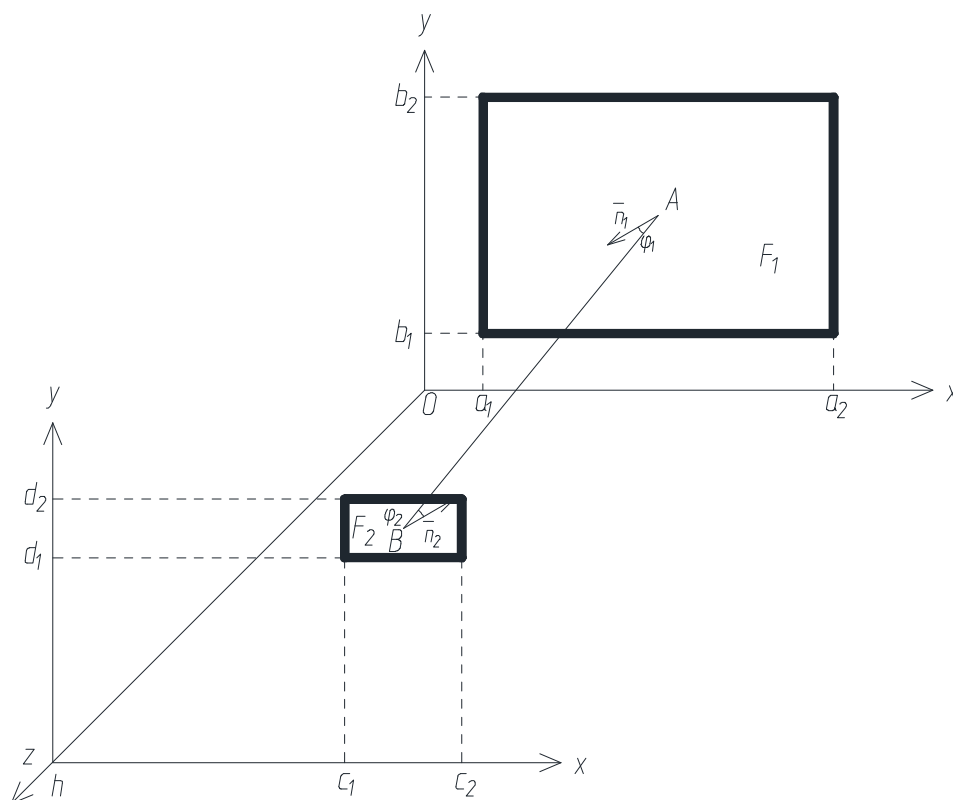


Рисунок 2.3 – Схема к расчету взаимной поверхности облучения в случае, когда излучатель и поверхность помещения расположены в параллельных плоскостях:

F_1 – ограждающая конструкция; F_2 – отопительная панель; a_1, b_1 – координаты ограждающей конструкции; c_k, d_i – координаты панели; h – расстояние между плоскостями, в которых находятся F_1 и F_2 ; n_1, n_2 – векторы нормали к поверхностям ограждающей конструкции и отопительной панели соответственно; A, B – точки на поверхностях ограждающей конструкции и отопительной панели соответственно; φ_1, φ_2 – угол между вектором нормали и отрезком AB .

С учетом того, что $r = AB$, выражение (2.12) для двух поверхностей, расположенных в параллельных плоскостях, можно представить следующим образом

$$H_{12} = \frac{h^2}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} dx_B \int_{a_1}^{a_2} dx_A \int_{y_1}^{y_2} dy_B \int_{b_1}^{b_2} \frac{dy_A}{\left[(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + h^2 \right]^2}. \quad (2.31)$$

После интегрирования получено следующее выражение

$$H_{12} = H_{21} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \frac{(-1)^{i+j+k+l}}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left((b_k - d_l) \sqrt{(c_j - a_i)^2 + h^2} \cdot \operatorname{arctg} \frac{b_k - d_l}{(c_j - a_i)^2 + h^2} + \right. \\ & \left. + (c_j - a_i) \sqrt{(b_k - d_l)^2 + h^2} \cdot \operatorname{arctg} \frac{c_j - a_i}{\sqrt{(b_k - d_l)^2 + h^2}} - \right. \\ & \left. \left[-\frac{h^2}{2} \ln \left[(b_k - d_l)^2 + (c_j - a_i)^2 + h^2 \right] \right] \right\}. \quad (2.32) \end{aligned} \right.$$

На основании полученных выражений вычисляется угловой коэффициент, или коэффициент облучённости, φ_{1-2}

$$\varphi_{12} = \frac{H_{12}}{F_1}; \varphi_{2-1} = \frac{H_{21}}{F_2}. \quad (2.33)$$

Похожие результаты также были получены в [100] при решении задачи математического моделирования лучистого теплообмена в помещении, оборудованном конвективным отопительным прибором.

2.3 Определение температуры адиабатных поверхностей

Важным показателем работы системы лучистого отопления является температура поверхностей внутренних ограждающих конструкций, которые также в литературе называются условным ограждением, или адиабатными поверхностями [23, 24]. Так как температура внутреннего воздуха при работе инфракрасных приборов ниже, чем при работе традиционных отопительных приборов, то выполнение первого условия комфортности можно достичь только за

счет повышения температуры внутренних поверхностей ограждающих конструкций. Без методики расчета этой температуры невозможно определить, насколько эффективно работает система лучистого отопления.

Повышение температуры внутренней поверхности условного ограждения происходит за счет лучистого теплообмена с отопительной панелью, являющейся источником теплоты в помещении

$$Q_{\text{п}} = \sigma_o \cdot \varepsilon_{\text{п}} \cdot \varepsilon_a \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{\text{п-а}} \cdot F_a, \quad (2.34)$$

где σ_o – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К⁴;

$\varepsilon_{\text{п}}$ – степень черноты отопительной панели;

ε_x – степень черноты внутренней поверхности рассчитываемого ограждения, численно равная степени черноты внутренней поверхности наружного ограждения;

$T_{\text{п}}$ – температура поверхности отопительной панели, К;

T_a – температура адиабатных поверхностей, К;

$\varphi_{\text{п-а}}$ – средний диффузный угловой коэффициент излучения с поверхности панели на адиабатные поверхности;

F_a – суммарная площадь адиабатных поверхностей, м².

Так как любое жилое помещение представляет собой замкнутую систему лученепрозрачных поверхностей, то при расчете теплообмена можно применять свойство замыкаемости угловых коэффициентов [27, 29-35], которое, в силу закона сохранения энергии для замкнутой системы, можно записать следующим образом

$$\sum_{j=1}^n \varphi_{ij} = 1. \quad (2.35)$$

Используя это свойство, расчет угловых коэффициентов можно значительно упростить. Выражение (2.18) можно записать следующим образом

$$Q_a = \sigma_o \cdot \varepsilon_a^2 \cdot \left[\left(\frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \cdot (1 - \varphi_{\Pi-x}) \cdot F_a, \quad (2.36)$$

где $\varphi_{\Pi-x}$ – угловой коэффициент, как в выражении 2.8.

Таким образом, для расчета лучистого теплообмена в помещении достаточно определить угловой коэффициент 1 раз.

Температура адиабатных поверхностей несколько выше температуры внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции, поэтому результирующий тепловой поток между ними отличен от нуля и определяется по формуле:

$$Q_x = \sigma_o \cdot \varepsilon_a^2 \cdot \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_x}{100} \right)^4 \right] \cdot F_x, \quad (2.37)$$

где F_x – площадь наружной ограждающей конструкции, м²;

T_x – температура внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции, К.

Конвективный теплообмен между панелью и внутренним воздухом определяется следующим выражением

$$Q_b = \alpha_k \cdot (t_{\Pi} - \tau_{\text{вн}}) \cdot F_{\Pi}, \quad (2.38)$$

где α_k – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²·К;

t_{Π} – температура поверхности панели, К;

$\tau_{\text{вн}}$ – температура внутреннего воздуха, К;

F_{Π} – площадь панели, м².

При температуре внутреннего воздуха 20°С коэффициент конвективного теплообмена α_k , Вт/(м²·°С), для вертикальных поверхностей равен [98]

$$\alpha_k = 1,16 \cdot \Delta t^{\frac{1}{3}}, \quad (2.39)$$

где Δt – разница температур поверхности панели и воздуха, К.

В этом случае формулу (2.22) можно выразить следующим образом:

$$Q_{\text{в}} = \left(t_{\text{п}}^{\frac{4}{3}} - t_{\text{вн}}^{\frac{4}{3}} \right) \cdot F_{\text{панели}}. \quad (2.40)$$

Потери теплоты на нагрев приточного воздуха

$$G_{\text{пр}} \cdot c \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) = \sum_{i=1}^N \int_{A_i} \alpha_{\text{к}dA_i} (t_{dA_i} - t_{\text{н}}) dA_i = \alpha'_{\text{к}i} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) \cdot F_i, \quad (2.41)$$

где $t_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, К;

$\alpha'_{\text{к}}$ – коэффициент конвективного теплообмена между адиабатными поверхностями помещения и внутренним воздухом, Вт/м²·К ;

F_i – площадь i -той адиабатной поверхности, м².

Коэффициент конвективного теплообмена определяется для различных поверхностей [56]:

а) для вертикальных

$$\alpha_{\text{к}} = 1,39 \cdot \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{\frac{1}{4}}; \quad (2.42)$$

б) для нагретых горизонтальных, обращённых вниз

$$\alpha_{\text{к}} = 1,89 \cdot \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{\frac{1}{4}}; \quad (2.43)$$

в) для нагретых горизонтальных, обращенных вверх

$$\alpha_{\text{к}} = 0,971 \cdot \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.44)$$

где l – определяющий размер поверхности в направлении потока воздуха, м;
 Δt – разница температуры адиабатной поверхности и внутреннего воздуха, К.
 Геометрические размеры пола и потолка в большинстве жилых и общественных зданий одинаковы. В случае установки отопительных приборов на стенах формулы (2.43) и (2.44) можно представить в следующем виде

$$\alpha_k = 2,861 \cdot \left(\frac{\Delta t}{l}\right)^{\frac{1}{4}}. \quad (2.45)$$

Тепловой баланс для адиабатных поверхностей, определяется как

$$Q_a - Q_x - Q_v - Q_{\pi} = 0; \quad (2.46)$$

или

$$\sigma_o \cdot \varepsilon_{\pi} \cdot \varepsilon_a \cdot \left[\left(\frac{T_{\pi}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a}{100}\right)^4 \right] \cdot (1 - \varphi_{\pi-x}) \cdot F_a - \sigma_o \cdot \varepsilon_a^2 \cdot \left[\left(\frac{T_a}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_x}{100}\right)^4 \right] \cdot F_x - \left(t_{\pi}^{\frac{4}{3}} - t_{\text{вн}}^{\frac{4}{3}} \right) \cdot F_{\text{панели}} - \sum \alpha'_{k_i} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) \cdot F_i = 0. \quad (2.47)$$

В выражении 2.47 входными параметрами являются следующие значения:

- параметры отопительной панели ε_{π} , T_{π} , F_{π} , определяющиеся по паспорту прибора;
- параметры наружного ограждения F_x , ε_a , а также температура поверхности T_x , определяемая по формуле 2.8;
- геометрические параметры адиабатных поверхностей и их степени черноты;
- средний диффузный угловой коэффициент излучения, как в выражении 2.8;
- температура внутреннего воздуха, численно равная T_x .

Перед началом расчета необходимо вычислить коэффициент конвективного теплообмена α_k для всех типов поверхностей. После этого выражение 2.47 можно представить, как уравнение 4 степени для определения температуры адиабатных поверхностей.

2.4 Расчет теплообмена в помещении с лучистым отоплением при учете теплопередачи через заполнение световых проемов

В некоторых жилых и общественных зданиях значительную часть наружного ограждения составляют заполнения световых проемов. Нередко возле окон создаётся зона теплового дискомфорта даже при относительно высоких показателях термического сопротивления заполнения проема. Поэтому в некоторых случаях может потребоваться расчет температурного режима помещения с учетом теплообмена через окна.

Расчет температуры наружного ограждения значительно усложняется, так как по сравнению с выражением 2.8 в линейном уравнении появляются 2 неизвестных – температура поверхности окна и остальной части ограждения, при этом температура окна будет ниже температуры остальной части ограждения (рис. 2.4), поэтому необходимо учитывать лучистый теплообмен между окном и внутренними стенами. Поэтому для расчета необходимо составить систему из трех уравнений.

В этом случае тепловые потоки через наружное ограждение следует разделять на теплообмен через заполнение светового проема и через остальную часть наружной стены. Тепловые потоки, возникающие в этом случае, схематически изображены на рисунке 2.5. В случае установки отопительной панели на наружном ограждении, теплообмен излучением между панелью и наружным ограждением будет равен нулю (1 и 2 на указанной схеме).

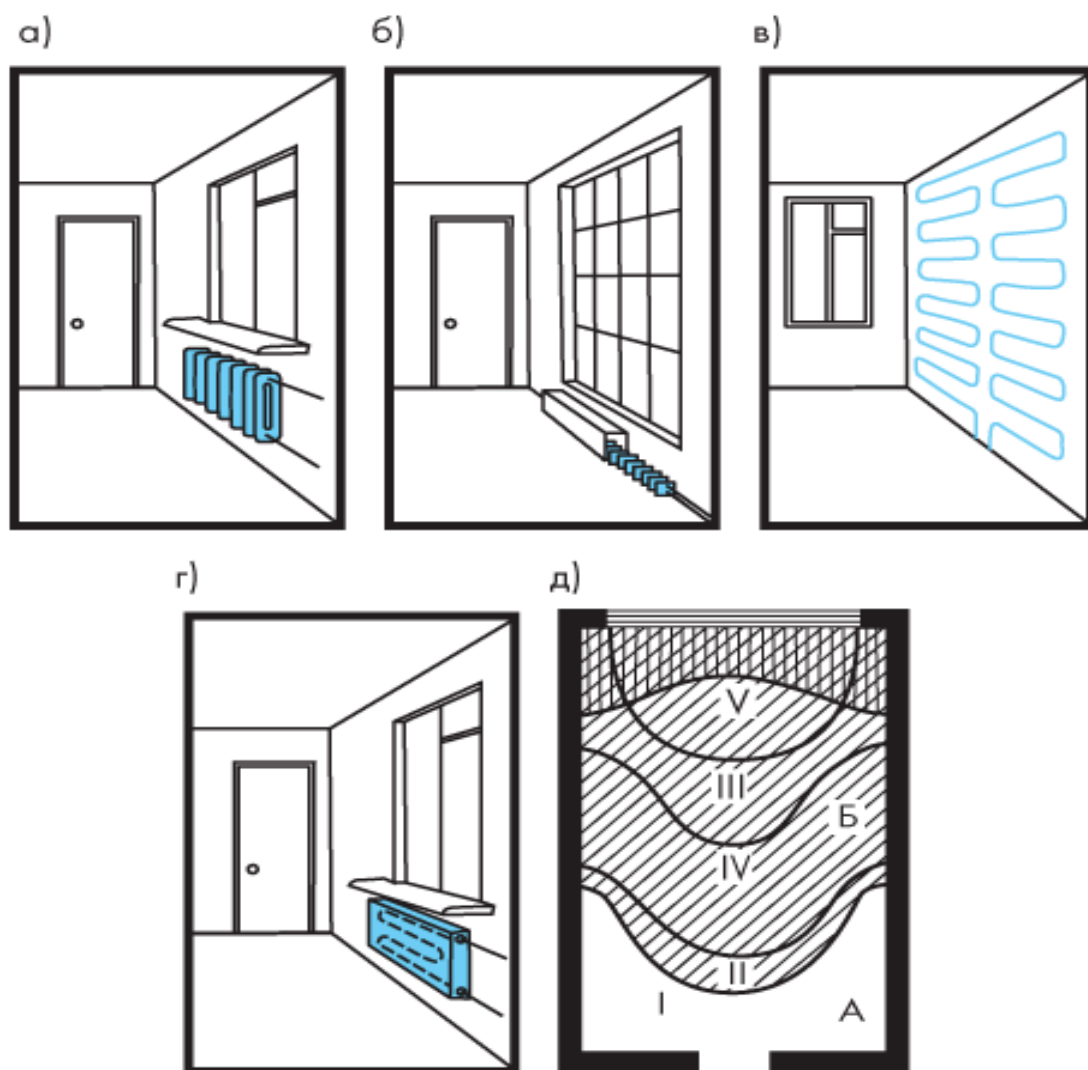


Рисунок 2.4 – Зона теплового дискомфорта:

а – радиатор; б – конвектор; в – панель в перегородке; г – подоконная панель; д – границы зон комфорта в помещении: I – при размещении под окнами радиаторов; II – конвекторов, III – при размещении нагревательных элементов по периметру внутренних стен; IV - в междуэтажных перекрытиях; V – стеновой панели; А – зона комфорта; Б – зона дискомфорта

В выражениях 2.49 и 2.50 первое уравнение показывает тепловой баланс оконного проема, второе – тепловой баланс внутренней поверхности внутренних ограждений (условного ограждения), третье – тепловой баланс внутренней поверхности наружного ограждения без учета заполнения светового проема.

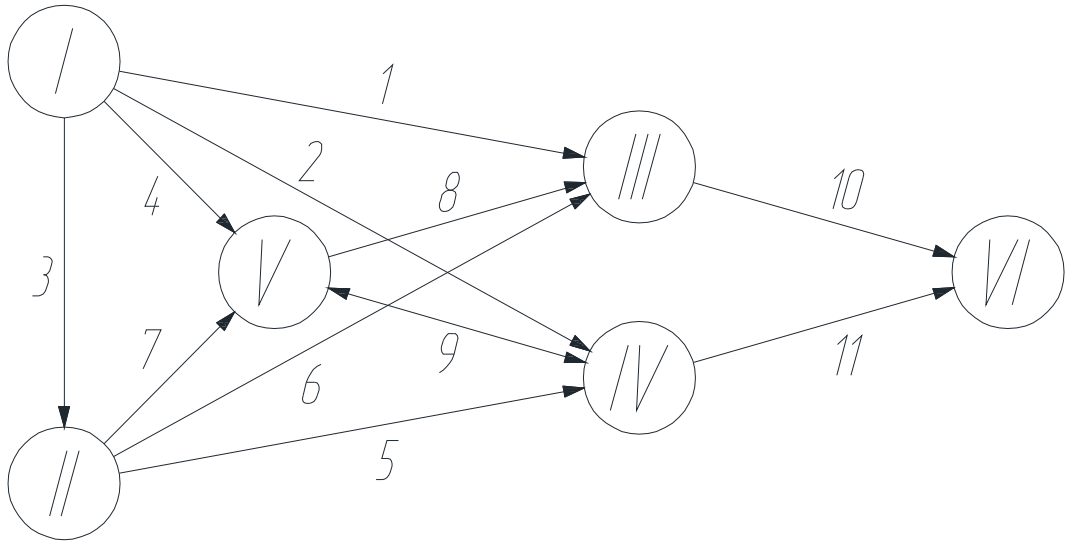


Рисунок 2.5 – Граф тепловых потоков в помещении:

I – отопительная панель, II – внутренние ограждения, III – заполнение светового проема, IV – наружное ограждение без учета заполнения светового проема, V – внутренний воздух, VI – наружный воздух, 1,2,3 – теплообмен излучением между отопительной панелью и остальными поверхностями, 4 – конвективный теплообмен между панелью и внутренним воздухом, 5,6 – теплообмен излучением между внутренними и наружными ограждениями, 7 – конвективный теплообмен между внутренними ограждениями и воздухом в помещении, 8,9 – конвективный теплообмен между наружными ограждениями и внутренним воздухом, 9, 10 – теплопередача через наружное ограждение

При установке отопительной панели на внутренней стене

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{п}}^4 - T_{\text{о}}^4] \varphi_{\text{о}} \cdot F_{\text{п}} + \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_{\text{о}}^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - \\ - k \cdot F_{\text{о}} \cdot (T_{\text{о}} - T_{\text{н}}) - F_{\text{о}} \cdot \alpha_{\text{к}} \cdot (T_{\text{в}} - T_{\text{о}}) = 0; \\ \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{п}}^4 - T_{\text{вн}}^4] (1 - (\varphi_{\text{вн}} + \varphi_{\text{о}})) \cdot F_{\text{п}} - \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_{\text{о}}^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - \\ - \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_{\text{х}}^4] \sum \varphi_j \cdot F_j - F_{\text{вн}} \cdot \alpha_{\text{к}} \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{о}}) = 0; \\ \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{п}}^4 - T_{\text{х}}^4] \varphi_{\text{вн}} \cdot F_{\text{п}} + \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_{\text{х}}^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - \\ - k \cdot F'_{\text{х}} \cdot (T_{\text{х}} - T_{\text{н}}) = 0, \end{array} \right. \quad (2.49)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты;

$T_{\text{о}}$ – температура поверхности окна, К;

F_o – площадь окна, m^2 ;

F'_x – площадь поверхности наружного ограждения без учета площади заполнения светового проема, m^2 ;

φ_i – угловой коэффициент излучения с i -той поверхности внутреннего ограждения на окно;

F_i – площадь i -той поверхности внутреннего ограждения, m^2 ;

φ_j – угловой коэффициент излучения с j -той поверхности внутреннего ограждения на внутреннюю поверхность наружного ограждения;

F_j – площадь j -той поверхности внутреннего ограждения, m^2 ;

φ_o – угловой коэффициент излучения с поверхности отопительной панели на заполнение светового проема;

φ_x – угловой коэффициент излучения с поверхности отопительной панели на внутреннюю поверхность наружного ограждения.

При установке отопительной панели на наружном ограждении

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_o \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_o^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - k \cdot F_o \cdot (T_o - T_{\text{н}}) - \alpha_k \cdot F_{\text{вн}} \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{в}}) = 0; \\ \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_o \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - T_{\text{вн}}^4 \right] \cdot F_{\text{п}} - \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_o \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_o^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - \\ - \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_o \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_x^4] \sum \varphi_j \cdot F_j - \alpha_k \cdot F_{\text{вн}} \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{в}}) = 0; \\ \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_o \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_x^4] \cdot \sum \varphi_j \cdot F_j - k \cdot F'_x \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{н}}) = 0. \end{array} \right. \quad (2.50)$$

2.5 Методика расчета систем низкотемпературного лучистого отопления

На основании полученных автором выражений 2.8, 2.12, 2.16, 2.48-2.50 разработана методика расчета систем низкотемпературного лучистого отопления.

Расчет следует начинать с выбора оптимального места установки отопительных приборов. Это определяется путем расчета среднего диффузного углового коэффициента по формулам 2.29 и 2.33. Угловой коэффициент является одним из важнейших факторов, влияющих на температурный режим помещения. Его следует выбирать таким образом, чтобы температура внутренней поверхности наружного ограждения удовлетворяла требованиям, предъявляемым

строительными нормами, при этом была как можно ниже, так как это позволит максимально уменьшить трансмиссионные тепловые потери.

После расчета угловых коэффициентов следует рассчитать температуры внутренних поверхностей наружных ограждений и удостовериться, что они соответствуют нормативным температурам для данной категории помещения. Затем необходимо рассчитать температуру остальных поверхностей, обращенных в помещение и проверить выполнение первого условия комфортности. В случае выполнения этих требований расчет можно считать окончанным. Подробно методика изложена в разделе 4 настоящей работы.

В случае, если тепловые потоки через наружное ограждение следует разделять на теплообмен через заполнение светового проема и через остальную часть наружной стены, то для расчета температур всех поверхностей, обращенных в помещение, следует пользоваться формулами 2.49 и 2.50.

2.6 Выводы по второму разделу

1. Усовершенствована математическая модель для определения среднего диффузного углового коэффициента излучения для взаимно перпендикулярных и параллельных плоскостей, позволяющая решать задачи лучистого теплообмена с привязкой к конкретным объектам.

2. Разработана математическая модель для определения температуры внутренней поверхности всех типов ограждающих конструкций в помещении с лучистым отоплением.

3. На основе разработанных математических моделей автором получены зависимости для расчета лучистого теплообмена между поверхностями ограждений, обращенными в помещение и расчета температуры внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции.

4. На основе, полученных автором зависимостей для расчета лучистого теплообмена в помещении разработана методика расчета систем низкотемпературного лучистого отопления.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ЛУЧИСТОМ ОТОПЛЕНИИ

В диссертационной работе приведены результаты экспериментального исследования температурного режима помещения жилого здания при отоплении электрическими низкотемпературными инфракрасными панелями в г. Макеевка Донецкой области.

3.1 Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальные исследования проводились в жилом неотапливаемом помещении, 3 стены которого являются наружными.



Рисунок 3.1 – План помещения, в котором проходили испытания

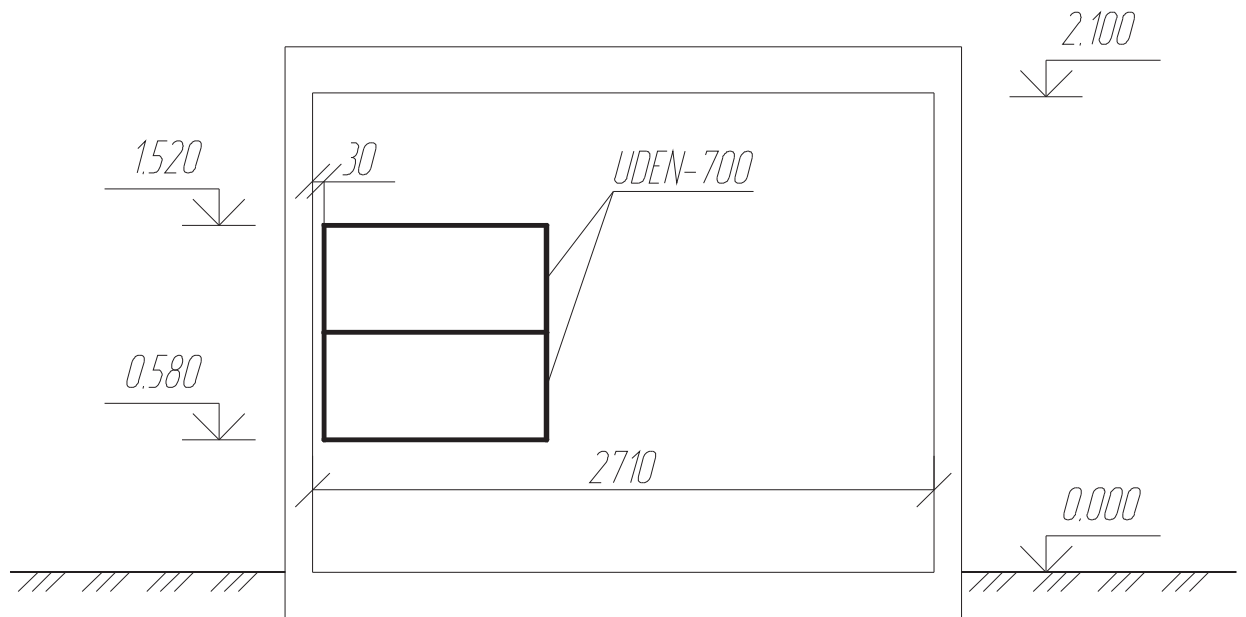


Рисунок 3.2 – Схема размещения отопительных панелей для обеспечения значения углового коэффициента $\phi=0,4$

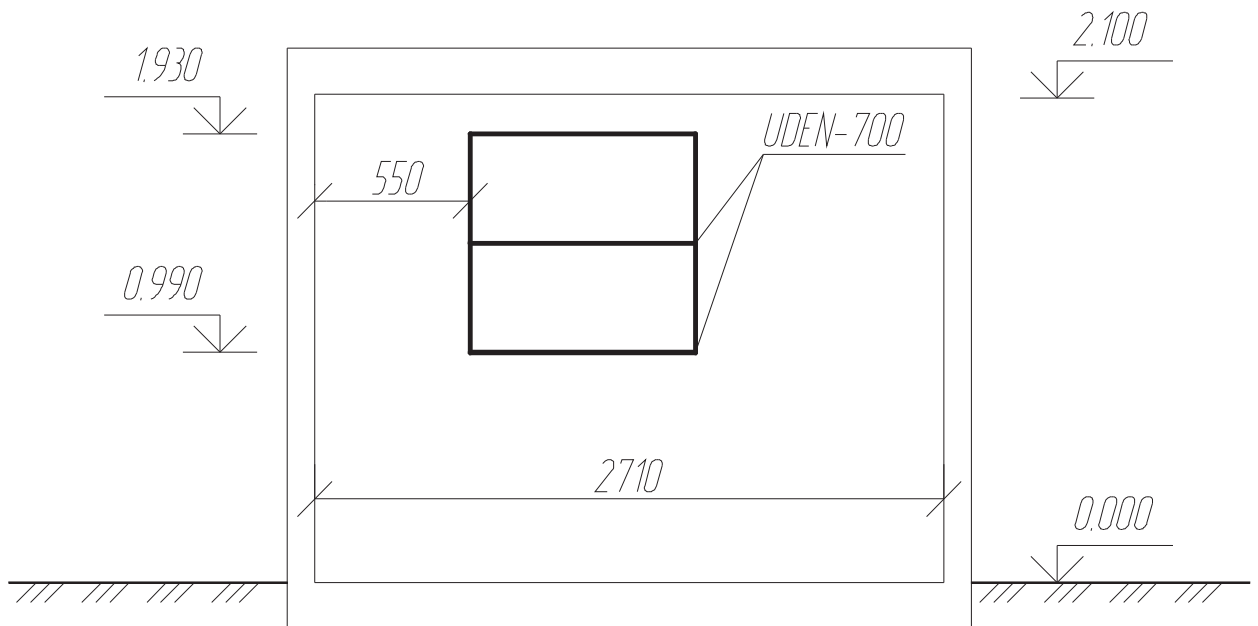


Рисунок 3.3 – Схема размещения отопительных панелей для обеспечения значения углового коэффициента $\phi=0,235$

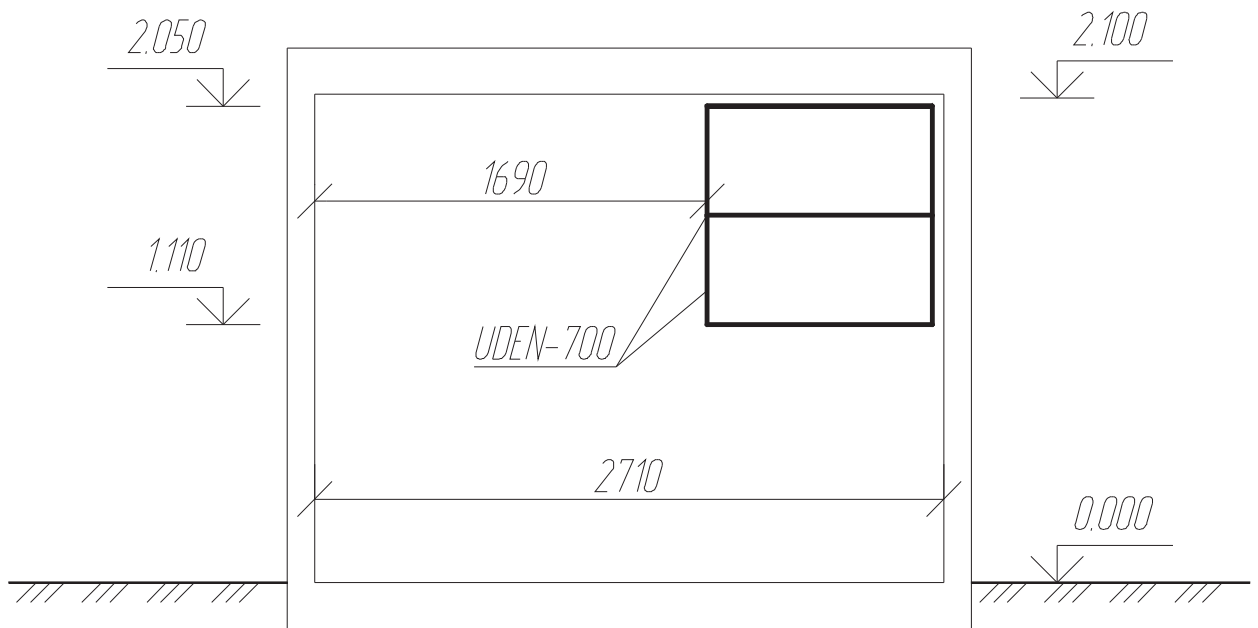


Рисунок 3.4 – Схема размещения отопительных панелей для обеспечения значения углового коэффициента $\varphi=0,07$

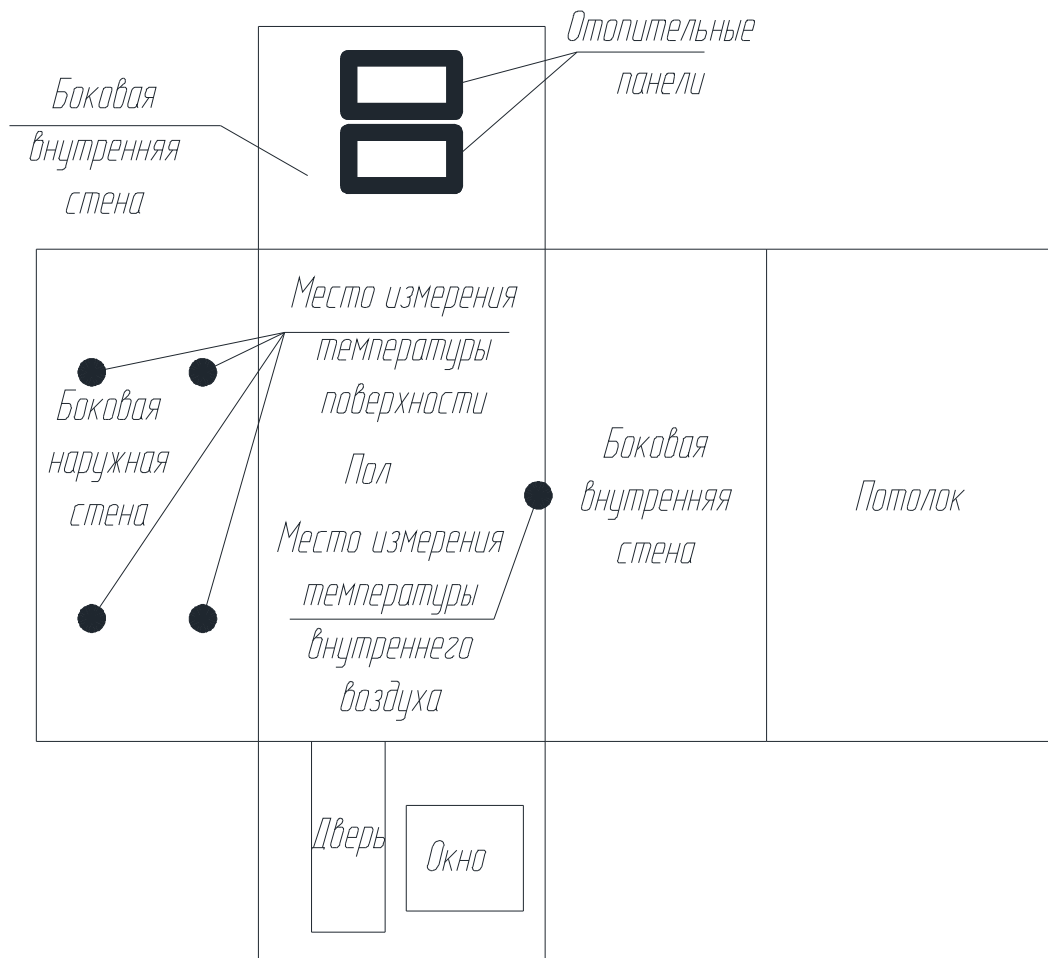


Рисунок 3.5 – Схема размещения измерительных приборов в исследуемом помещении

В качестве отопительных приборов применялись электрические отопительные панели фирмы UDEN, технические характеристики которых приведены в таблице 3.1, а устройство на рисунке 3.6.

Таблица 3.1 – Технические характеристики инфракрасных обогревателей

№ п/п	Наименование параметров и размеров	Модель					
		UDEN -250	UDEN-300	UDEN -500K	UDEN-500D	UDEN-500	UDEN-700
1	Номинальная потребляемая мощность, Вт	207-241	288-336	405-472	405-472	405-472	585-682
2	Номинальное напряжение, В	220-230	220-230	220-230	220-230	220-230	220-230
3	Частота, Гц	50	50	50	50	50	50
4	Габаритные размеры с креплениями, м, не больше:						
	- ширина	163	240	594	350	475	475
	- длина	975	975	594	957	800	978
	- толщина	14 (35)	14(35)	14(35)	14(35)	14(35)	14(35)
5	Объём обогреваемого помещения, м ³ , не больше	10-12,5	12,5-15	20-25	20-35	20-35	30-35
6	Площадь обогрева при h=2,5; м ² , не больше	4-5	5-6	8-10	8-10	8-10	12-14
7	Рабочая температура поверхности, °С, не больше	80±5	80±5	80±5	80±5	80±5	80±5
8	Масса, кг, не больше	4,5	6,0	9,0	8,0	10,0	11,5
9	Способ установки	настенный	настенный	настенный	настенный	настенный	настенный
10	Номинальный режим работы	длительный	длительный	длительный	длительный	длительный	длительный

К установке были выбраны 2 панели UDEN-700 (см. рисунок 3.6.)

При проведении экспериментальных изысканий использовалось следующее измерительное оборудование:

1) для определения температуры внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций использовались термопары с контроллером PD750-3-N;

2) для определения температуры наружного воздуха – T-02-DS.

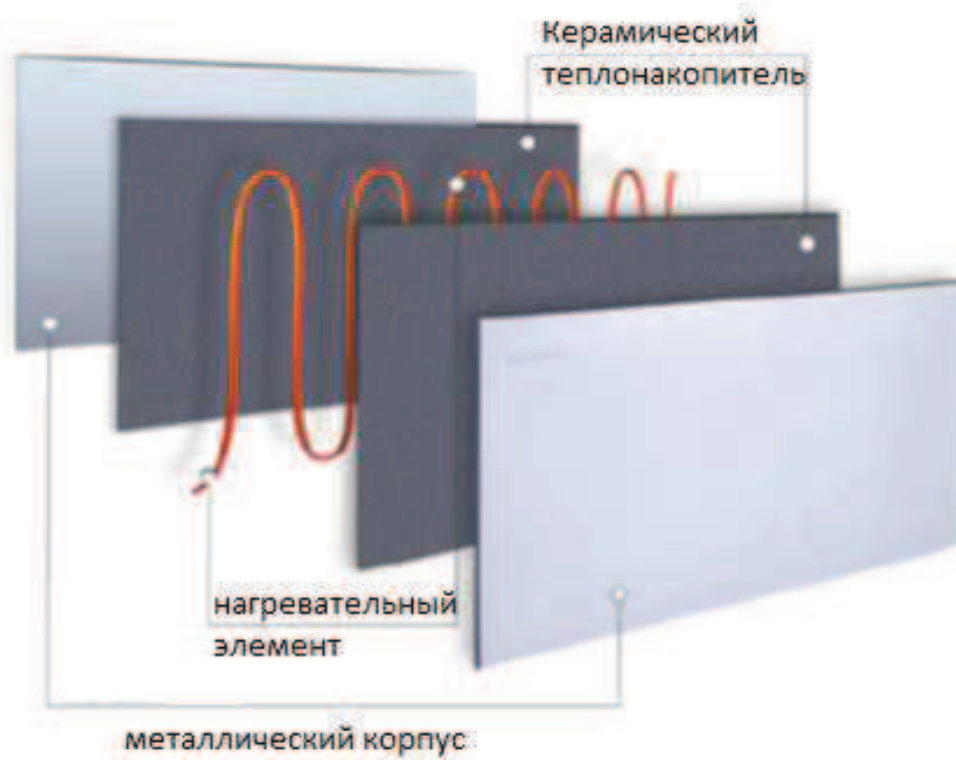


Рисунок 3.6 – Устройство отопительной панели



Рисунок 3.7 – Лабораторная установка с измерительными приборами

Исследования проводились в течение отопительного периода.

Испытания проводятся при установившемся тепловом режиме. Интервал снятия показаний составляет 5-10 минут, при этом делалось 5 замеров. Замеры проводились с помощью портативного цифрового термометра PD750 и прижимных датчиков в виде К-термопар, класс точности 1,5. Температура поверхности стены измерялась в 4 точках, после чего определялось среднее значение температуры по площади ограждения.

В качестве исследуемого параметра микроклимата была выбрана температура внутренней поверхности наружного ограждения. При этом замеры проводились только на 1 стене, как указано на рисунке 3.5. Это было связано с тем, что стены, не контактирующие с наружным воздухом, представляют собой адиабатные отражатели, при этом трансмиссионные тепловые потери через эти поверхности равны нулю.

Измерения температуры на полу не проводились вследствие того, что неутепленный пол представляет собой неоднородную ограждающую конструкцию, из-за чего термическое сопротивление различных участков пола различно.

Потолок исследуемого помещения представляет собой чердачное перекрытие. Поэтому ограждающая конструкция не контактирует с наружным воздухом непосредственно.

Боковая стена с окном также представляет собой неоднородную ограждающую конструкцию. К тому же, в отличие от пола, отличаются не только термические сопротивления различных участков, но и степень черноты поверхности.

Выбранная наружная стена представляет собой однородную ограждающую конструкцию, теплотехнические параметры которой одинаковы по всей площади ограждения. Стена состоит из 3 слоев: двух слоев штукатурки на внутренней и внешней поверхностях, и силикатного кирпича. Толщина стены – 120 мм без учета штукатурки.

Измерения температуры внутреннего воздуха производились с помощью термометра, установленного на стене, не контактирующей с наружным воздухом,

что позволило избежать погрешностей в измерениях, связанных с потерями теплоты через наружное ограждение.

3.2 Планирование и обработка результатов эксперимента

Для разработки планирования эксперимента на основе априорной методики были выявлены основные факторы, влияющие на температуру внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций:

- угловой коэффициент φ ;
- температура поверхности излучателя $t_{п}$, °С;
- температура наружного воздуха $t_{н}$, °С.

Анализ выражения 2.8 показывает, что помимо указанных факторов, на функцию отклика (температуру поверхности) оказывают влияние также термическое сопротивление ограждающей конструкции и радиационные свойства поверхностей, участвующих в процессе теплообмена. Тем не менее, было принято решение не рассматривать эти величины в качестве факторов эксперимента, потому что при проектировании систем отопления термическое сопротивление, как правило задано, поскольку регламентируется нормативной документацией. Степень черноты поверхности отопительных панелей и стены в рассматриваемых условиях можно считать постоянными, потому что диапазон температур поверхностей достаточно мал, поэтому можно считать, что степень черноты не зависит от температуры и постоянна в условиях проводимого эксперимента.

Были определены уровни варьирования факторов, влияющих на температуру внутренней поверхности наружного ограждения ($\tau_{вн}$), результаты представлены в таблице 3.2.

Уровни варьирования температуры наружного воздуха обусловлены климатическими условиями места, в котором проводился эксперимент (с 01.11.2016 г. до 01.03.2017 г. в г. Макеевка).

Таблица 3.2 – Уровни варьирования факторов, влияющих на температуру поверхности

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
1	2	3
Угловой коэффициент, φ	0,07	0,4
Температура поверхности излучателя, t_n , °C	40	80
Температура наружного воздуха °C.	-25	+8

Уровни варьирования температуры поверхности излучателя обусловлены техническими характеристиками отопительной панели. Максимальная температура ограничена особенностями конструкции и задана производителем отопительного оборудования. Изменение температуры достигалось путем изменения потребляемой электрической мощности при помощи трансформатора. При это минимально достижимая температура составила 40°C.

Уровни варьирования углового коэффициента обусловлены геометрическими характеристиками выбранных панелей и исследуемого помещения. Значение коэффициента в процессе измерений изменялось с помощью изменения места установки панелей, что было возможно благодаря простоте монтажа панелей и отсутствия дополнительных коммуникаций (таких, как трубопроводы для подачи теплоносителя в традиционных системах отопления). Аналитические исследования показали, что минимально достижимое значение коэффициента облученности с поверхности панелей на поверхность ограждения составляет 0,07, а максимальное – 0,4. Остальные способы установки панелей позволяли достичь значений углового коэффициента в указанном диапазоне.

Вышеперечисленные факторы можно охарактеризовать как количественные, которые, в свою очередь, задаются численными значениями, определяющими возможные области изменения рассматриваемого параметра.

При построении экспериментально-статистической математической модели необходимо осуществить переход от действительного (натурального) значения факторов к кодированному (стандартизированному) по формуле[126-135]

$$x_i = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j}, \quad (3.1)$$

где x_i – нормированное значение фактора;

x_j – натуральное значение фактора;

x_{j0} – основной уровень фактора;

Δx_j – интервал варьирования фактора.

В результате нормирования уровни варьирования входных параметров из таблицы 3.2 можно переписать в виде таблицы 3.3.

Таблица 3.3 – Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа.

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной 0	Верхний +1	
x_1	0,07	0,235	0,4	0,165
x_2	40	60	80	20
x_3	-25	-8,5	8	16,5

Матрица планирования и результаты планирования эксперимента с тремя параллельными опытами приведены в таблице 3.4. Для каждой строки матрицы планирования по результатам трех параллельных опытов было найдено среднее арифметическое значение параметра оптимизации $\overline{y_{cp}}$.

Таблица 3.4 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

Номер опыта	Матрица планирования								Рабочая матрица			Результаты параллельных экспериментов, y , °C	Среднее, $\overline{y}_{j,cp}$
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	ϕ	$t_{изл}$, °C	t_n , °C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	+1	+1	+1	-1	1	-1	-1	-1	0,4	80	-25	12,4	12,72
												13,1	
												12,2	
												13,2	
												12,7	
2	+1	-1	+1	-1	-1	1	-1	1	0,07	80	-25	-16,5	-17,24
												-16,7	
												-17,1	
												-18,1	
												-17,8	
3	+1	+1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,4	40	-25	-6,5	-6,28
												-5,8	
												-6,4	
												-6	
												-6,7	
4	+1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,07	40	-25	-21,9	-21,24
												-21,7	
												-21,7	
												-20,5	
												-20,4	
5	+1	+1	+1	1	1	1	1	1	0,4	80	8	36,2	35,52
												35,8	
												34,4	
												36	
												35,2	

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6	+1	-1	+1	1	-1	-1	1	-1	0,07	80	8	14,5	14,42
												14,1	
												14	
												14,7	
												14,8	
7	+1	+1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,4	40	8	18,5	18,4
												18,8	
												17,6	
												17,9	
												19,2	
8	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,07	40	8	10,5	10,36
												10,8	
												10	
												10,4	
												10,1	

Воспроизводимость опытов определяется при помощи критерия Кохрена, расчетное значение которого вычисляется по формуле [126-135]

$$G_p = \frac{\max s_j^2}{\sum_{j=1}^N s_j^2}, \quad (3.2)$$

где s_j^2 - оценка дисперсии для каждой j-й точки факторного пространства, определяемая по формуле

$$s_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_j - \overline{y_{j, \text{cp}}}), \quad (3.3)$$

где m - количество параллельных опытов;

y_j - значение выходного параметра в j-й строке,;

$\overline{y_{j, \text{cp}}}$ - среднее значение параметра в j-й строке.

Проверка однородности дисперсий выполняется по критерию Фишера [126-135]

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{S_{\text{min}}^2}. \quad (3.4)$$

Результаты расчетов дисперсий приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты расчетов дисперсий

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
S_j^2	0,187	0,478	0,137	0,528	0,532	0,127	0,425	0,103
S_j	0,4324	0,6914	0,3701	0,7266	0,7294	0,3564	0,6519	0,3209

Для определения погрешностей экспериментов используется критерий Стьюдента [82-85]

$$\frac{y_{\text{max(min)}} - \bar{y}}{S} \leq t_{\text{табл.}} \text{ или } t_{\text{расч.}} \leq t_{\text{табл.}}, \quad (3.5)$$

где t – критерий Стьюдента, его значение для пяти повторных опытов и доверительной вероятности $\alpha=0,95$ равно 2,78 [126-135].

Результаты расчетов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Расчетные значения критерия Стьюдента

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
y_{max}	13,2	-16,5	-5,8	-20,4	36,2	14,8	19,2	10,8
$t_{\text{расч}}$	1,11	1,07	1,297	1,156	0,932	1,066	1,227	1,371
y_{min}	12,2	-18,1	-6,7	-21,9	34,4	14	17,6	10
$t_{\text{расч}}$	1,203	1,244	1,135	0,908	1,536	1,178	1,227	1,122

Так как для всех значений, приведенных в таблице 3.6 $t_{\text{табл}} > t_{\text{расч}}$, следовательно, результаты параллельных опытов не могут считаться ошибочными.

Проверка однородности дисперсий по критерию Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,532}{0,103} = 5,16.$$

Число степеней свободы $f=n-1=5-1=4$. Из таблиц выбирается $F_{\text{табл.}}=6,4$ [84-85].

Так как $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$, следовательно, дисперсии однородны.

Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена:

$$G_{\text{расч.}} = \frac{0,49}{2,195} = 0,223.$$

Число степеней свободы $f_1=4$ и $f_2=N=8$. Из таблиц выбирается $G_{\text{табл.}}=0,396$ [126-135].

Так как $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл.}}$, следовательно, дисперсии однородны.

Уравнение математической экспериментально-статистической модели с учетом парных взаимодействий имеет вид

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3.6)$$

Коэффициенты регрессии при полном факторном эксперименте определяют по выражениям

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \hat{y}_u}{N}; \quad (3.7)$$

$$b_i = \frac{\sum_1^N x_{iu} \hat{y}_u}{N}; \quad (3.8)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} \hat{y}_u}{N}, i \neq j; \quad (3.9)$$

$$b_{ijk} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} x_{ku} \hat{y}_u}{N}, i \neq j \neq k, \quad (3.10)$$

где N – число опытов;

i, j, k – индексы при определении переменных.

Коэффициенты регрессии, рассчитанные по вышеприведенным выражениям, равны

$$b_0=5,8325;$$

$$b_1=9,2575;$$

$$b_2=5,5225;$$

$$b_3=13,8425;$$

$$b_{12}=3,5025;$$

$$b_{13}=-1,9725;$$

$$b_{23}=-0,2275;$$

$$b_{123}=-0,2475.$$

Дисперсия воспроизводимости рассчитывается по формуле [126-135]

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{N(n-1)} = \frac{\sum_1^N S_i^2}{N}, \quad (3.11)$$

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{2,517}{8} = 0,315.$$

С учетом значения дисперсии воспроизводимости определяются границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S_{\{y\}}}{\sqrt{N}}, \quad (3.12)$$

$$\Delta b_i = \pm \frac{2,78 \cdot \sqrt{0,315}}{\sqrt{8}} = \pm 0,551.$$

При сравнении коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов можно определить, что коэффициенты b_{23} и b_{123} незначимы. Так как эти коэффициенты стоят перед парными взаимодействиями факторов, принято решение их исключить. Таким образом, уравнение математической модели имеет вид

$$\hat{y} = 6,0475 + 7,8575x_1 + 5,1224x_2 + 12,3575x_3 + 3,1025x_1x_2 - 1,5425x_1x_3. \quad (3.13)$$

Проверяется адекватность полученного уравнения.

Вычисляются теоретические значения параметра оптимизации \hat{y} и величина ошибки $\Delta y = \bar{y} - \hat{y}$. Результаты вычислений занесены в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Определение величины ошибки

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
\hat{y}	12,25	-17,225	-5,81	-21,255	35,99	14,405	17,93	10,375
Δy	0,47	-0,015	-0,47	0,015	-0,47	0,015	0,47	-0,015
Δy^2	0,2209	0,000225	0,2209	0,000225	0,2209	0,000225	0,2209	0,000225

Рассчитывается дисперсия адекватности

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^N (\bar{y} - \hat{y})^2}{N - (k + 1)} = \frac{\sum_1^N \Delta y_i^2}{N - (k + 1)}, \quad (3.14)$$

$$S_{ад}^2 = \frac{0,8845}{8 - (3 + 1)} = 0,2211;$$

Адекватность экспериментально-статистической математической модели определяется по критерию Фишера

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (3.15)$$

$$F_{расч} = \frac{0,2211}{0,47} = 0,703;$$

$$F_{табл} = 6,4.$$

Так как $F_{расч} < F_{табл.}$, следовательно, модель адекватна.

Для записи математической модели в реальных физических величинах необходимо произвести обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив таким образом окончательный вид экспериментально-статистической модели

$$\tau_{\text{вн}} = 6,0475 + 7,8575 \cdot \frac{\varphi - 0,235}{0,165} + 5,1224 \cdot \frac{t_{\text{п}} - 60}{20} + 12,3575 \cdot \frac{t_{\text{н}} + 8,5}{16,5} + 3,1025 \cdot \frac{\varphi - 0,235}{0,165} \cdot \frac{t_{\text{п}} - 60}{20} - 1,5425 \cdot \frac{\varphi - 0,235}{0,165} \cdot \frac{t_{\text{н}} + 8,5}{16,5}. \quad (3.16)$$

Адекватность полученной модели подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически с применением разработанной математической модели лучистого теплообмена в помещении, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований. Различные значения среднего диффузного углового коэффициента достигались изменением расположения излучателя.

После упрощения выражение 3.16 приобретает следующий вид

$$\tau_{\text{вн}} = -0,3551 - 13,825 \cdot \varphi + 0,1702 \cdot t_{\text{п}} + 1,009 \cdot t_{\text{н}} - 0,7242 \cdot \varphi \cdot t_{\text{п}} + 1,063 \cdot \varphi \cdot t_{\text{н}}. \quad (3.17)$$

Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально определенных температур внутренней поверхности наружного ограждения представлено на рисунках 3.8–3.10.

Для каждой выборки экспериментальных значений, была произведена гипотеза о нормальности распределения данных

Математическое ожидание нормально распределённой случайной величины, а мы можем полагать, что в нашем случае мы имеем дело с нормальным распределением согласно центральной предельной теоремы, которая применима, так как объем выборки велик ($n=30$), доверительный интервал вычисляется по формуле

$$\bar{x} - t_y \frac{s}{\sqrt{n}} \leq a \leq \bar{x} + t_y \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3.18)$$

где \bar{x} – выборочное среднее значение;

t_y – квантиль распределение Стьюдента уровня значимости $\alpha=0,95$, при уровне свободы $f=n-1$ принимается $t_y=1,96$;

\bar{a} – среднее значение генеральной совокупности;

S – выборочное среднеквадратичное отклонение;

n – число элементов выборки.

Результаты проведенных исследований температур внутренних поверхностей ограждающих конструкций при различных режимах отопления и различных угловых коэффициентах приведены в приложении А.

3.3 Экспериментальные исследования температуры внутреннего воздуха в помещении с лучистым отоплением

В справочной литературе [23, 24, 26] при расчетах теплообмена в помещениях с лучистым отоплением принимается допущение, что температура внутреннего воздуха численно равна температуре внутренней поверхности наружного ограждения. При этом в работе [26] указывается, что на практике эти температуры могут незначительно отличаться, но разница не превышает 1 градус.

Автором настоящей работы были проведены экспериментальные исследования с целью подтвердить или опровергнуть это утверждение. Результаты проведенных исследований температур внутренних поверхностей ограждающих конструкций и температур внутреннего воздуха при различных режимах отопления и различных угловых коэффициентах приведены в приложении Б.

На основании результатов замеров были определены средние температуры воздуха и внутренней поверхности при разных температурах наружного воздуха, температурах поверхности отопительной панели и при разных значениях углового коэффициента. Средние температуры приведены на рисунках 3.11–3.19.

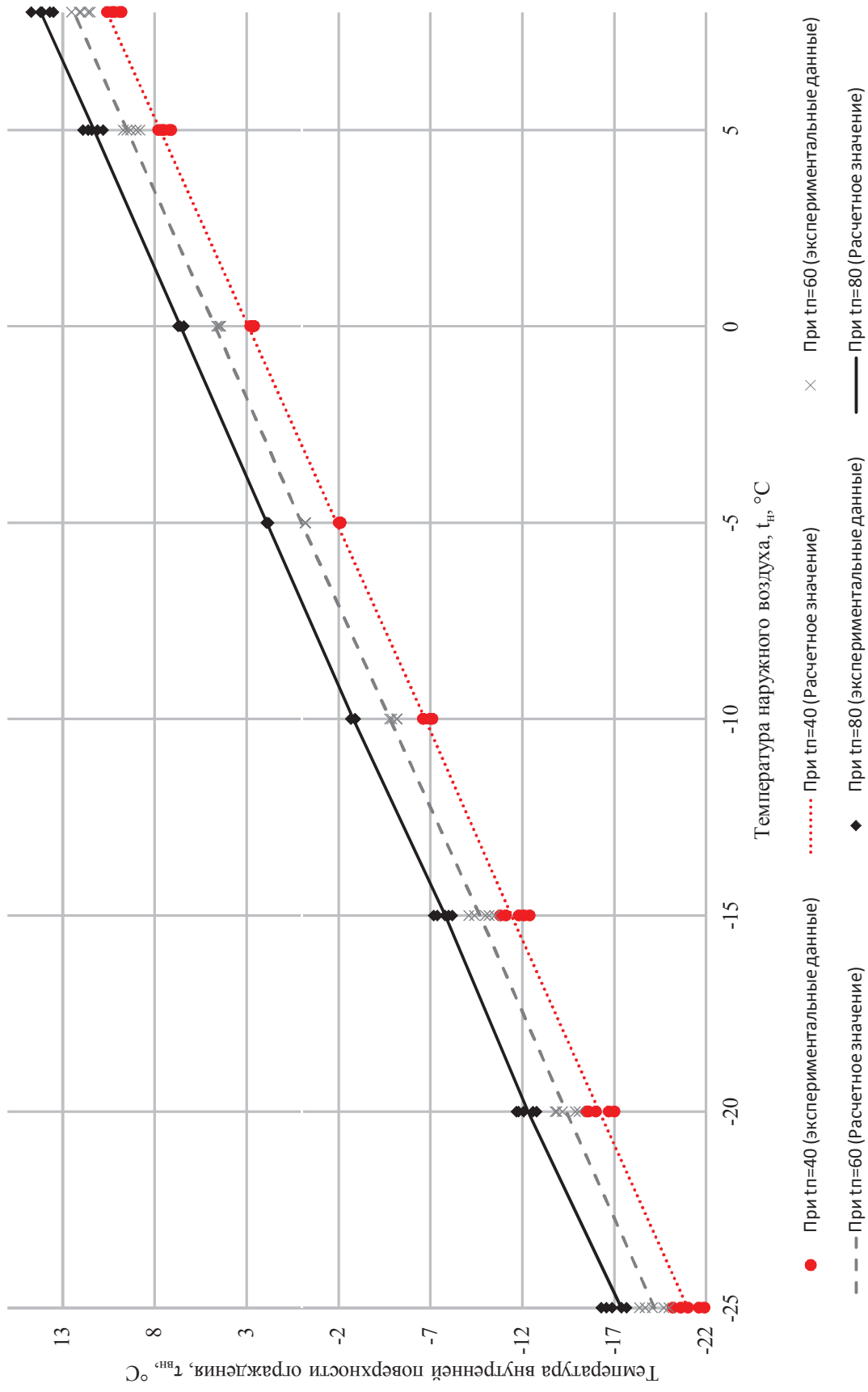


Рисунок 3.8 – Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально определенных температур внутренней поверхности наружного ограждения при $\phi=0,07$

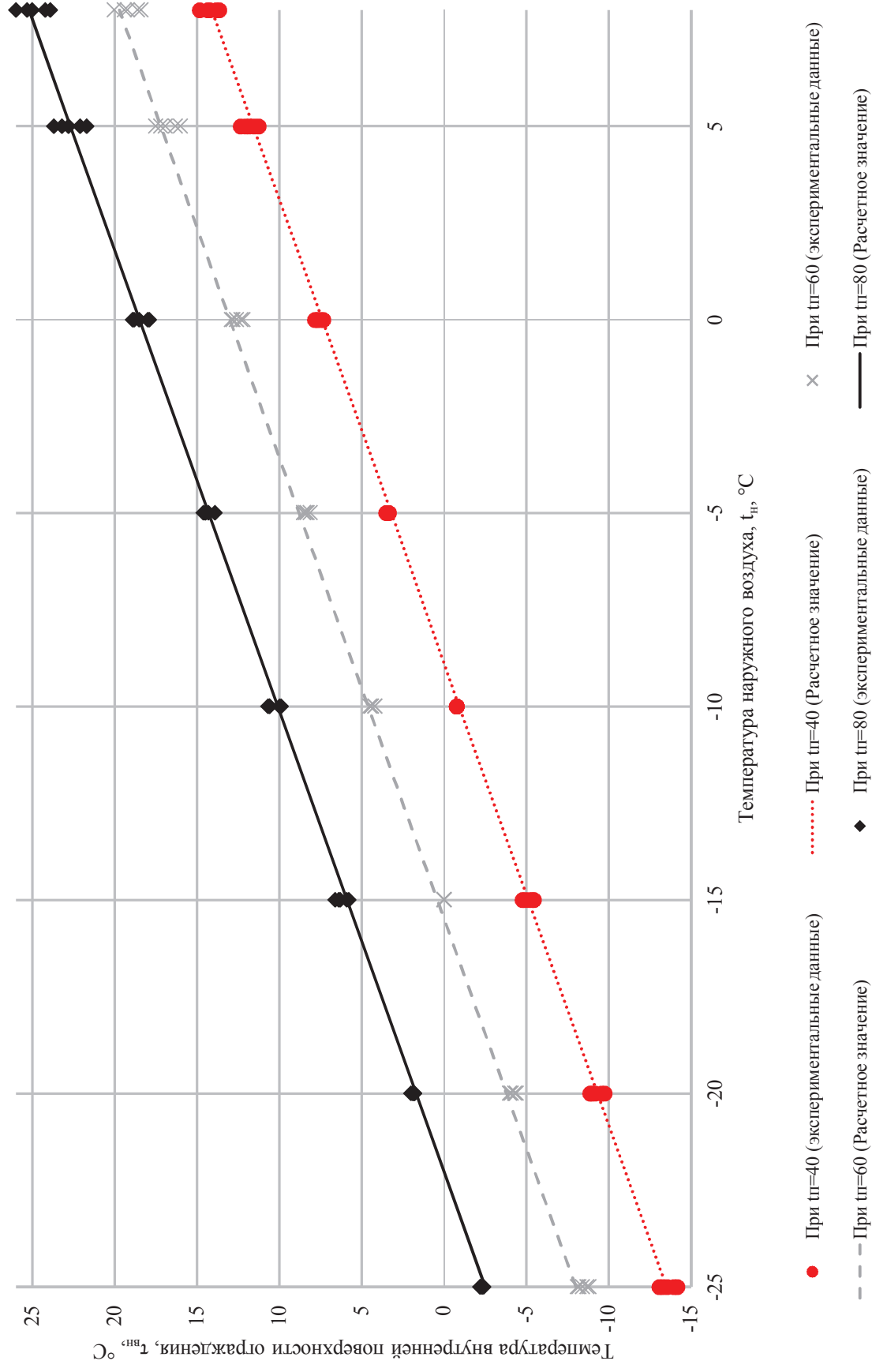


Рисунок 3.9 – Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально определенных температур внутренней поверхности наружного ограждения при $\phi=0,235$

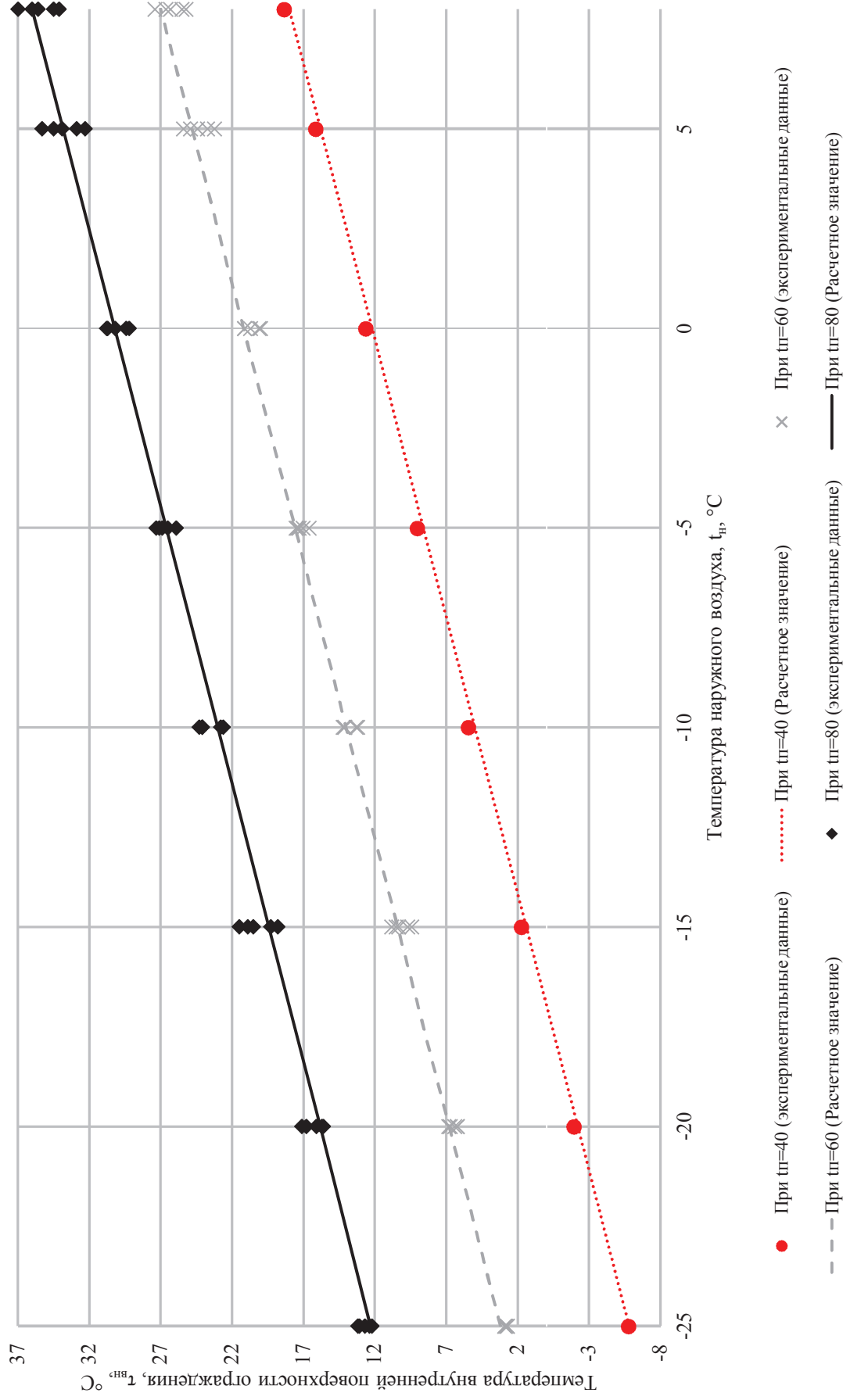


Рисунок 3.10 – Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально определенных температур внутренней поверхности наружного ограждения при $\phi=0,4$

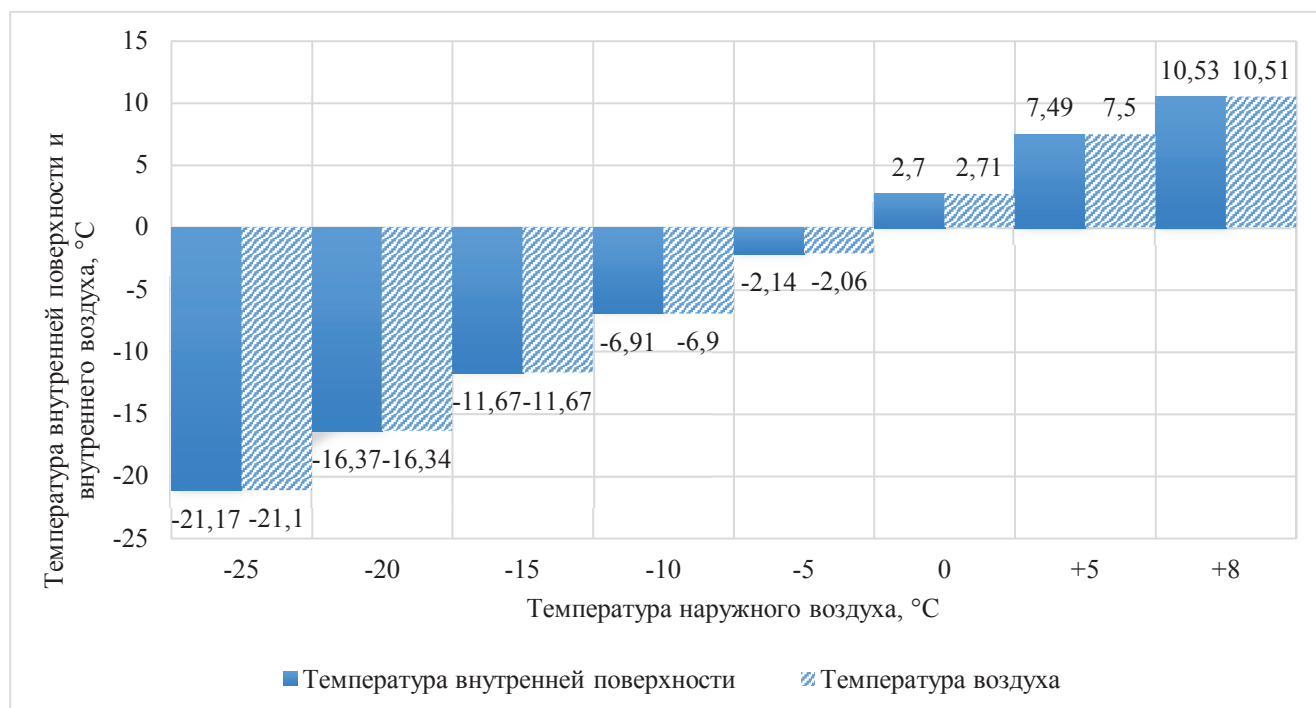


Рисунок 3.11 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\varphi=0,07$ и $t_n = 40^\circ\text{C}$

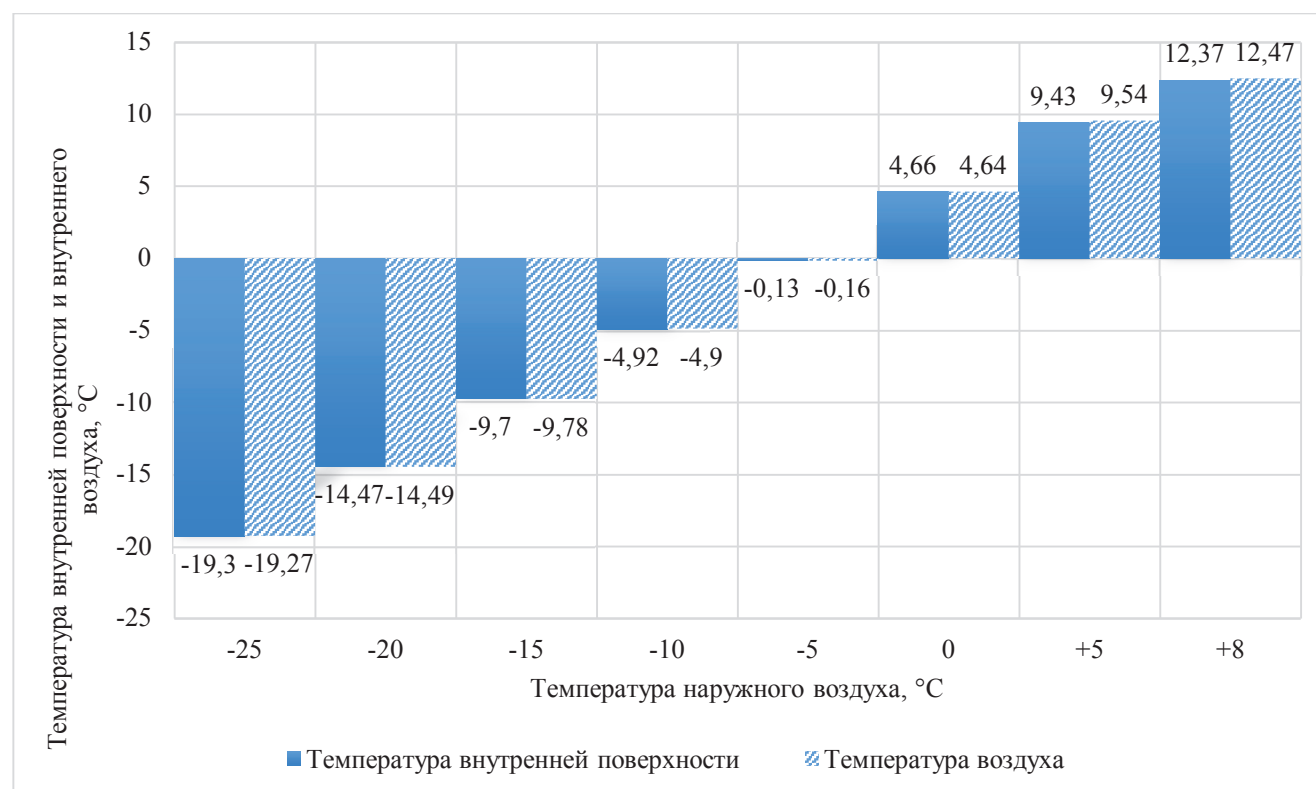


Рисунок 3.12 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\varphi=0,07$ и $t_n = 60^\circ\text{C}$

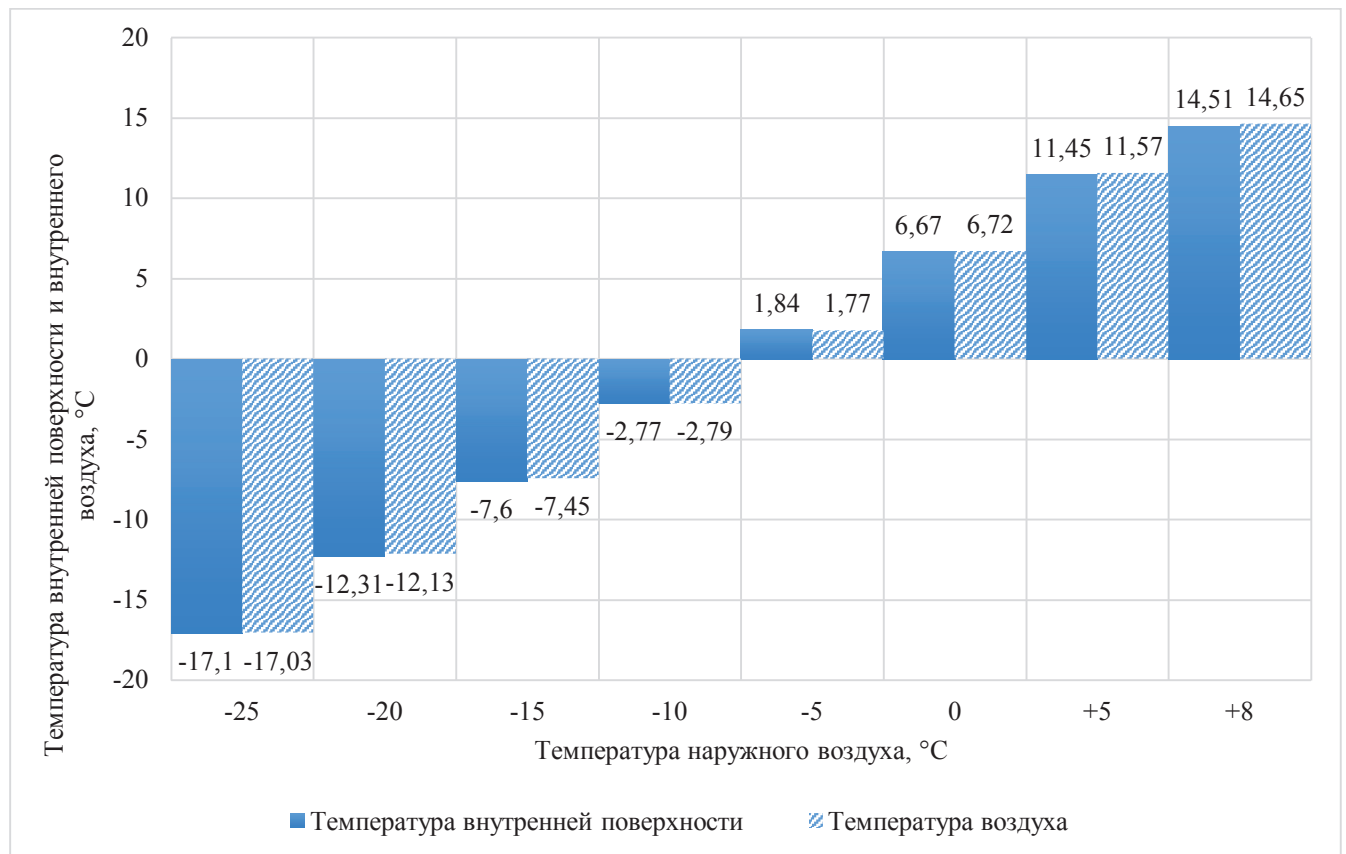


Рисунок 3.13 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\varphi=0,07$ и $t_n = 80^\circ\text{C}$

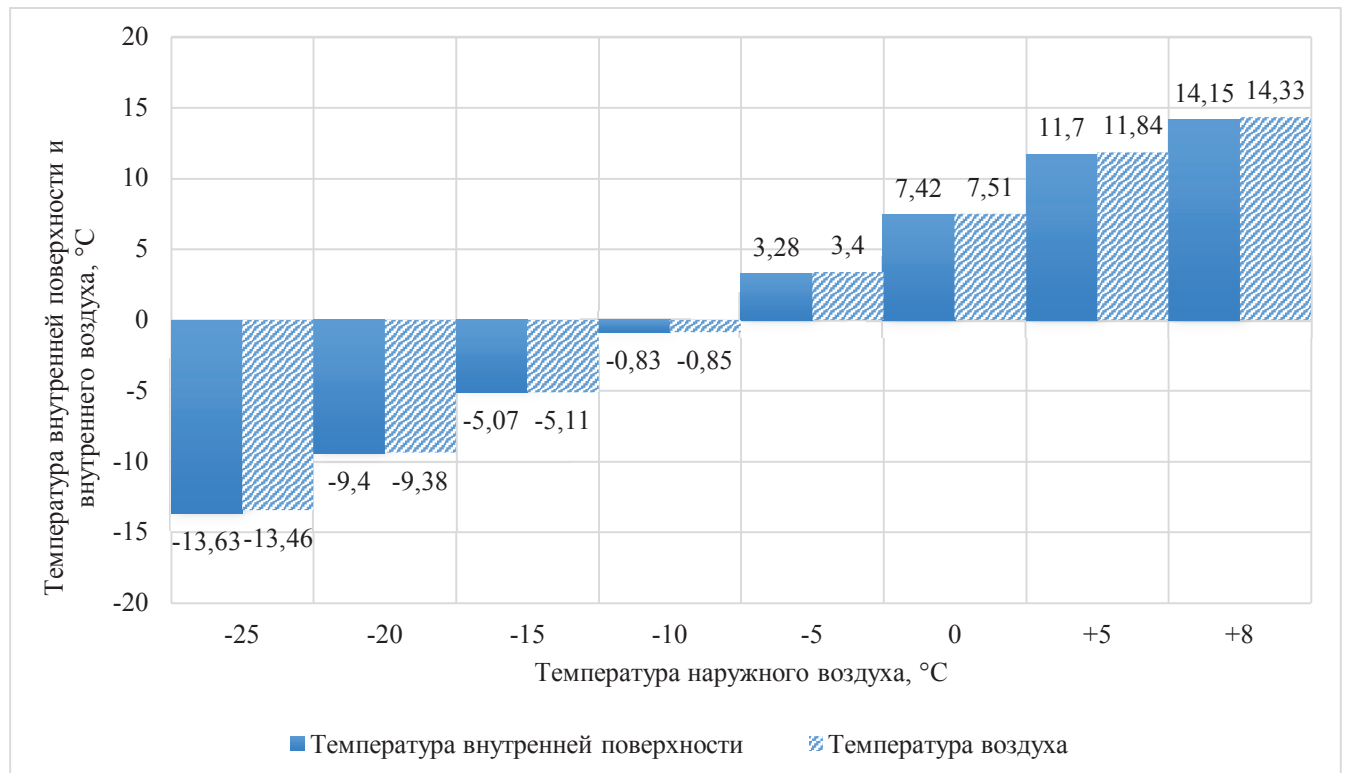


Рисунок 3.14 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\varphi=0,235$ и $t_n = 40^\circ\text{C}$

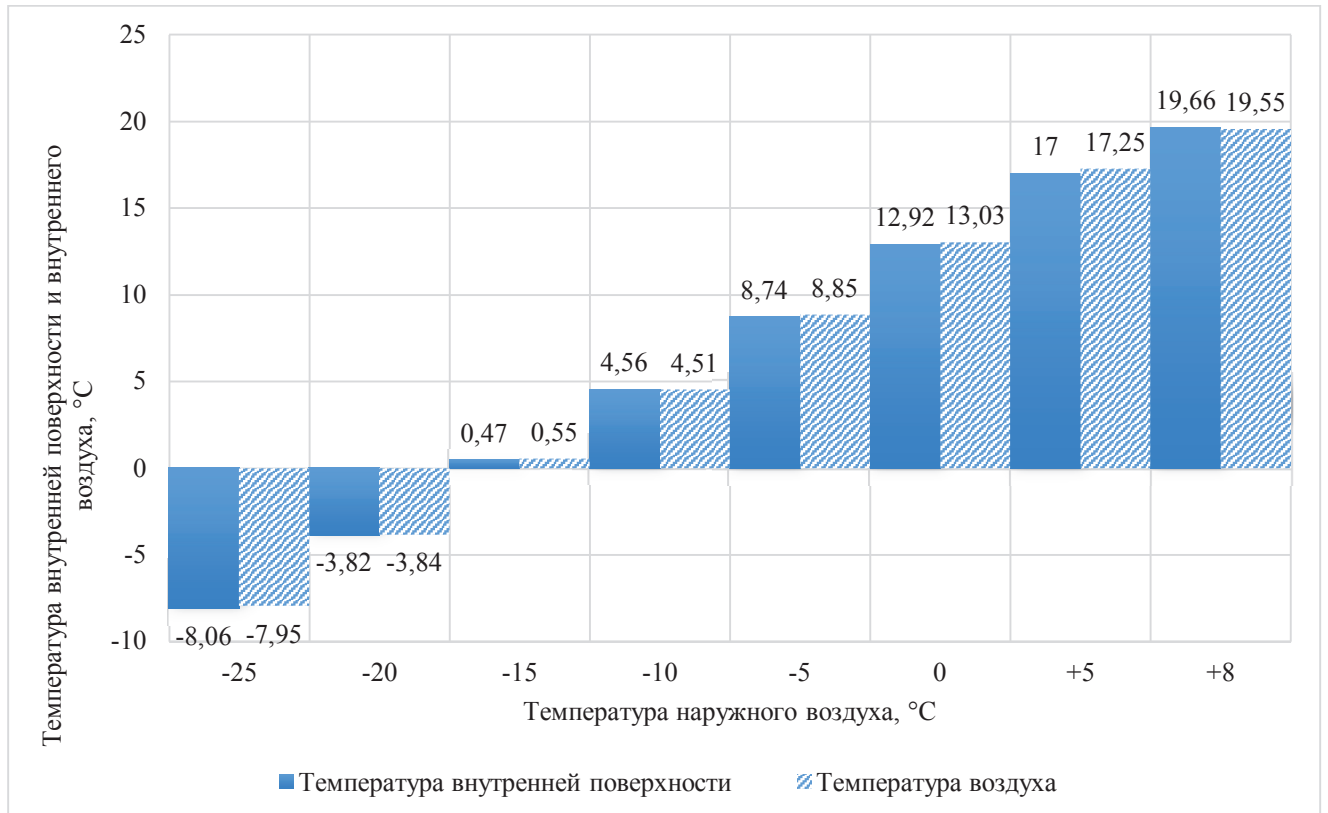


Рисунок 3.15 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\varphi=0,235$ и $t_n = 60^\circ\text{C}$

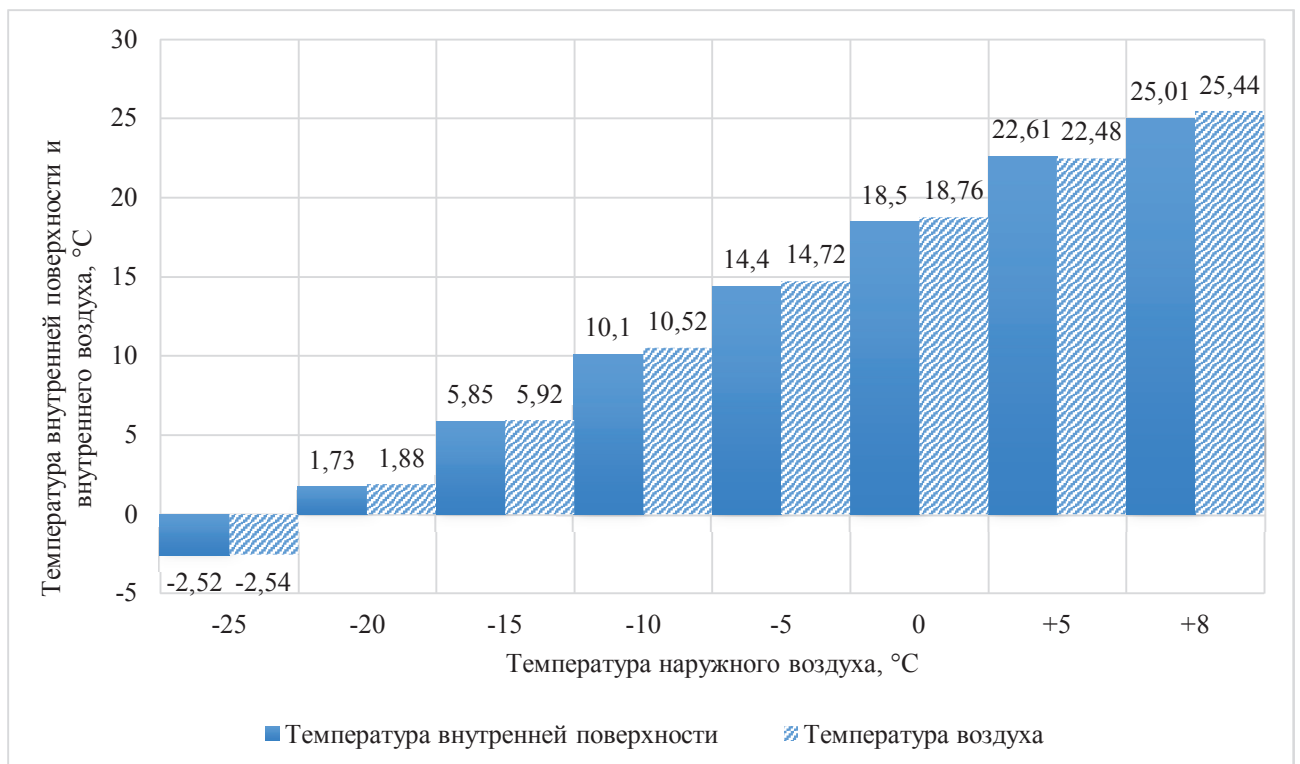


Рисунок 3.16 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\varphi=0,235$ и $t_n = 80^\circ\text{C}$

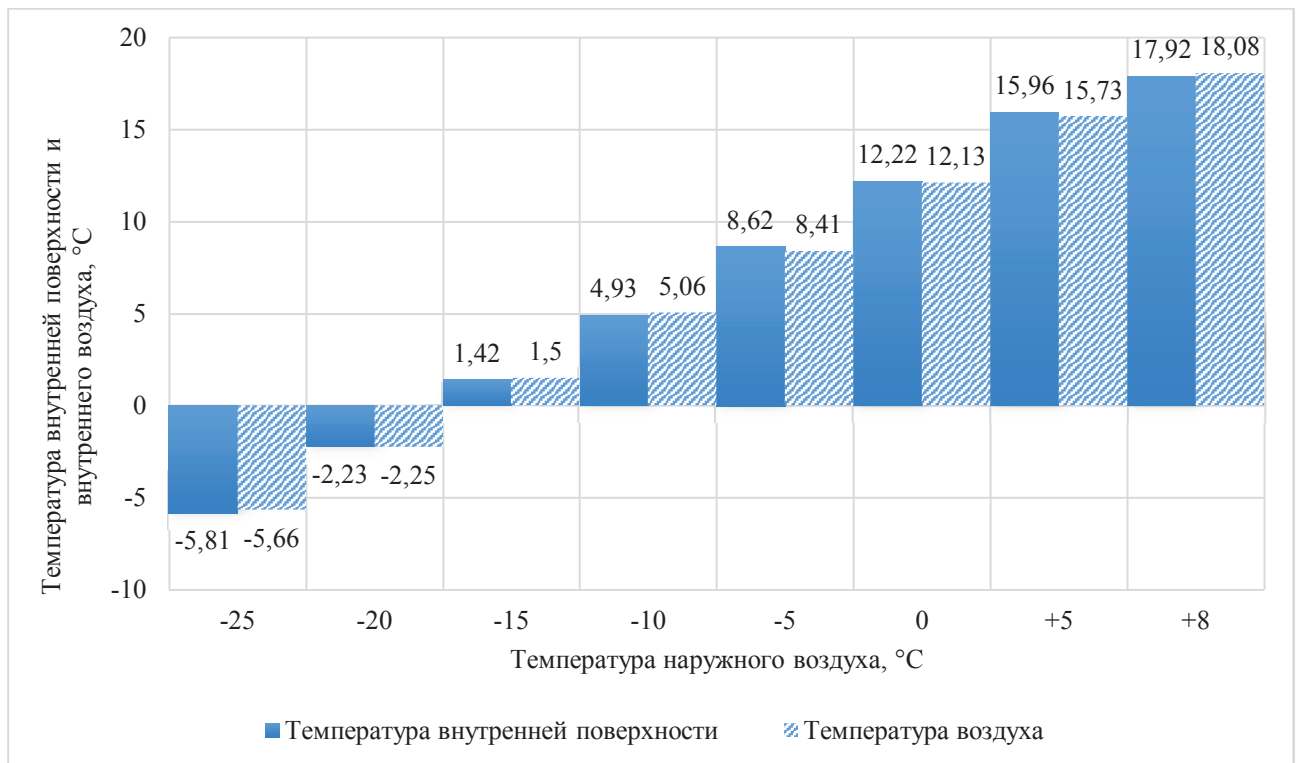


Рисунок 3.17 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\phi=0,4$ и $t_n = 40^\circ\text{C}$

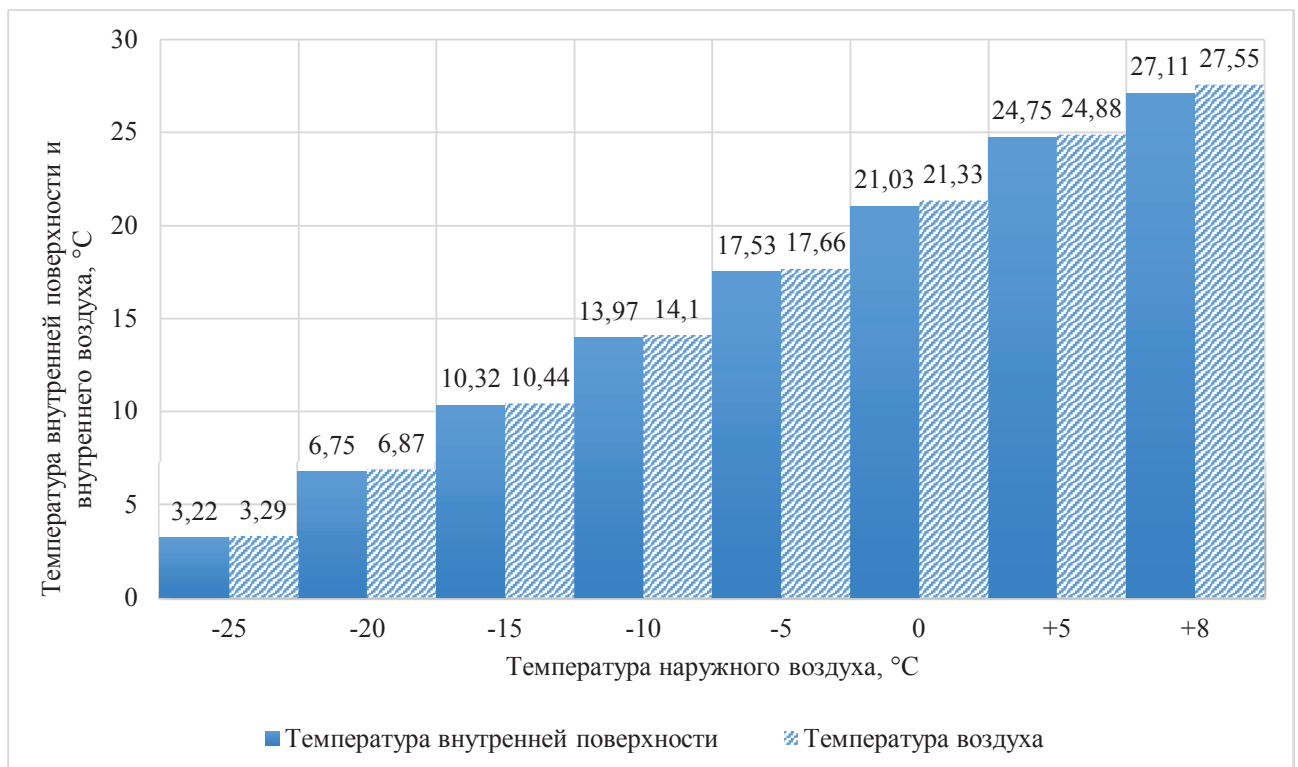


Рисунок 3.18 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\phi=0,4$ и $t_n = 60^\circ\text{C}$

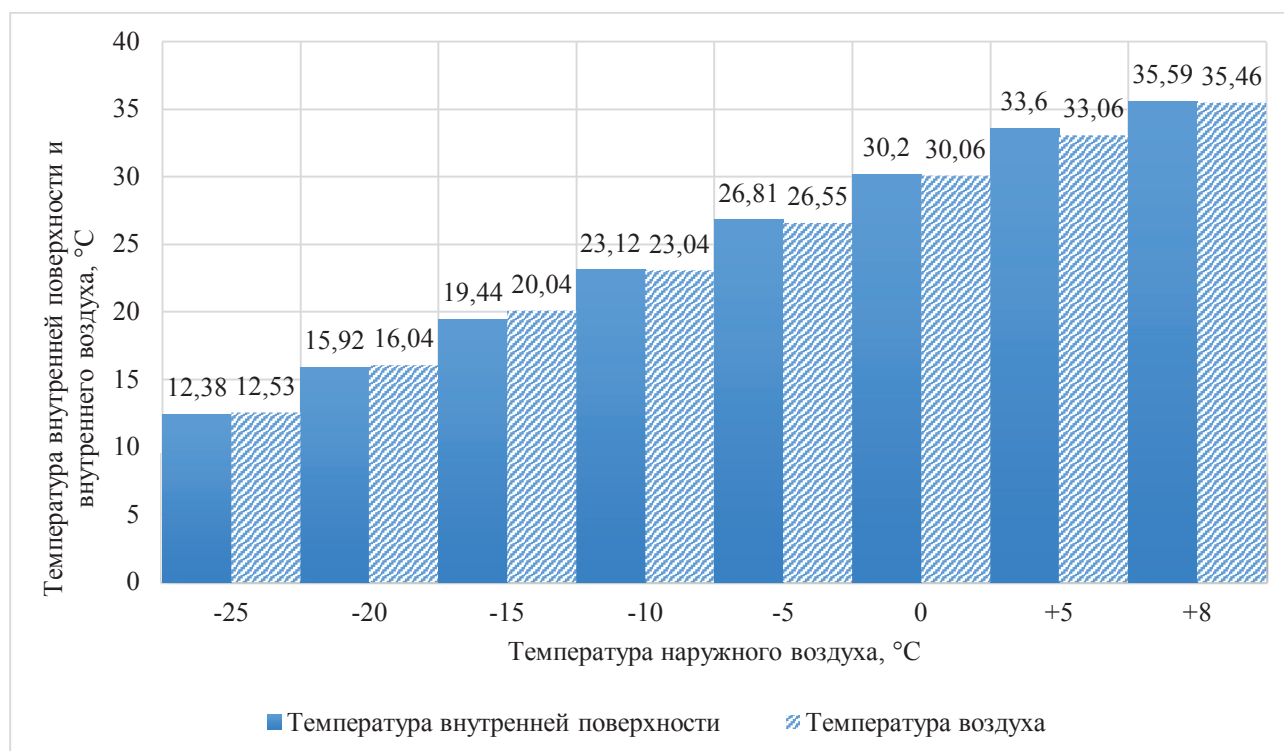


Рисунок 3.19 – Сравнение средних температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности при $\varphi=0,4$ и $t_{\text{п}} = 80^{\circ}\text{C}$

Проведенные исследования позволяют заключить, что температура внутреннего воздуха и температура внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций при низкотемпературном лучистом отоплении практически одинаковы, что наглядно иллюстрируют зависимости, приведенные на рисунках 3.11 – 3.19.

Для математической обработки полученных результатов можно воспользоваться критерием корреляции Пирсона [133], который показывает статистическую значимость выявленной связи между температурами внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружного ограждения.

Коэффициент корреляции Пирсона определяется по формуле

$$r = \frac{\sum(d_{\tau_{\text{вн}}} \cdot d_{t_{\text{в}}})}{\sqrt{\sum d_{\tau_{\text{вн}}}^2 \cdot \sum d_{t_{\text{в}}}^2}}, \quad (3.19)$$

где $d_{\tau_{\text{вн}}}$ – отклонение температуры внутренней поверхности наружного ограждения от среднего значения;

d_{t_B} – отклонение температуры внутреннего воздуха от среднего значения.

Оценка статистической значимости коэффициента корреляции r осуществляется при помощи критерия Стьюдента t_r , рассчитываемого по следующей формуле

$$t_r = \frac{r \cdot \sqrt{f}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (3.20)$$

где f – число степеней свободы.

Полученное значение t_r сравнивается с критическим значением при определенном уровне значимости. Если t_r превышает $t_{\text{крит}}$, то делается вывод о статистической значимости выявленной корреляционной связи.

Расчет корреляции Пирсона при значениях факторов $T_{\text{панели}}=40^\circ\text{C}$, $\phi=0,07$ и $t_n=-25^\circ\text{C}$ приведен ниже.

Среднее значение температур внутреннего воздуха и внутреннего ограждения вычисляется на основе экспериментальных данных, приведенных в приложении Б.

$$\overline{\tau_{\text{вн}}} = -21,097^\circ\text{C}, \quad \overline{t_{\text{в}}} = -21,0493^\circ\text{C}.$$

Отклонения значений экспериментальных данных от среднего значения параметров, а также квадраты этих отклонений приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Определение отклонений для каждой пары анализируемых значений

№ п/п	Температура внутренней поверхности ограждения , °C	Температура внутренней воздуха, °C	Отклонение $\tau_{\text{вн}}$ от среднего значения, $d_{\tau_{\text{вн}}}$	Отклонение $t_{\text{в}}$ от среднего значения, $d_{t_{\text{в}}}$	$d_{\tau_{\text{вн}}}^2$	$d_{t_{\text{в}}}^2$	$d_{\tau_{\text{вн}}} \cdot d_{t_{\text{в}}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-20,5	-20,2	0,67	0,8967	0,4489	0,8041	0,6008
2	-21,5	-21,6	-0,33	-0,5033	0,1089	0,2533	0,1661

Продолжение таблицы 3.8

1	2	3	4	5	6	7	8
3	-20,2	-20,1	0,97	0,9967	0,9409	0,9934	0,9668
4	-21,8	-21,8	-0,63	-0,7033	0,3969	0,4946	0,4431
5	-22,3	-22,2	-1,13	-1,1033	1,2769	1,2173	1,2467
6	-20,2	-20,1	0,97	0,9967	0,9409	0,9934	0,9668
7	-20,3	-20,2	0,87	0,8967	0,7569	0,8041	0,7801
8	-20,7	-20,3	0,47	0,7967	0,2209	0,6347	0,3744
9	-21,9	-21,8	-0,73	-0,7033	0,5329	0,4946	0,5134
10	-21,6	-21,5	-0,43	-0,4033	0,1849	0,1627	0,1734
11	-22,2	-22,1	-1,03	-1,0033	1,0609	1,0066	1,0334
12	-19,9	-19,8	1,27	1,2967	1,6129	1,6814	1,6468
13	-21,9	-21,9	-0,73	-0,8033	0,5329	0,6453	0,5864
14	-20,5	-20,4	0,67	0,6967	0,4489	0,4854	0,4668
15	-22,8	-22,7	-1,63	-1,6033	2,6569	2,5706	2,6134
16	-21,9	-21,8	-0,73	-0,7033	0,5329	0,4946	0,5134
17	-21,7	-21,6	-0,53	-0,5033	0,2809	0,2533	0,2667
18	-21,7	-21,7	-0,53	-0,6033	0,2809	0,364	0,3197
19	-20,5	-20,5	0,67	0,5967	0,4489	0,3561	0,3998
20	-20,4	-20,3	0,77	0,7967	0,5929	0,6347	0,6135
21	-21,5	-21,5	-0,33	-0,4033	0,1089	0,1627	0,1331
22	-21,2	-21,1	-0,03	-0,0033	0,0009	0	0,0001
23	-20,4	-20,4	0,77	0,6967	0,5929	0,4854	0,5365
24	-21,3	-21,5	-0,13	-0,4033	0,0169	0,1627	0,0524
25	-20,8	-20,7	0,37	0,3967	0,1369	0,1574	0,1468
26	-21,1	-21,1	0,07	-0,0033	0,0049	0	-0,0002
27	-21,8	-21,6	-0,63	-0,5033	0,3969	0,2533	0,3171
28	-20,5	-20,4	0,67	0,6967	0,4489	0,4854	0,4668
29	-20,5	-20,4	0,67	0,6967	0,4489	0,4854	0,4668
30	-21,5	-21,6	-0,33	-0,5033	0,1089	0,2533	0,1661
Σ					16,523	17,7898	16,977

На основании данных, полученных в таблице 3.8, рассчитывается значение коэффициента корреляции Пирсона.

$$r = \frac{16,977}{\sqrt{16,523 \cdot 17,7989}} = 0,9989.$$

Значение коэффициента корреляции свидетельствует о весьма высокой силе корреляционной связи, так как $r > 0,9$.

Значение коэффициента Стьюдента

$$t_r = \frac{0,9989 \cdot \sqrt{30-2}}{\sqrt{1-0,997^2}} = 112,7.$$

Критическое значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $f=28$ и уровне значимости $p=0,99$ составит $t_{\text{крит}}=2,763$. Так как $t_r > t_{\text{крит}}$, связь является статистически значимой [133].

Результаты расчетов коэффициента корреляции для остальных анализируемых значений приведены в таблице 3.9.

Анализ данных, приведенных в таблице позволяет сделать вывод, что, в независимости от значений факторов, сила корреляционной связи между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждения весьма высока.

Таблица 3.9 – Расчет корреляции Пирсона при различных значениях факторов t_n , φ и t_n

t_n , °C	При $t_n=40^\circ\text{C}$			При $t_n=60^\circ\text{C}$			При $T_n=80^\circ\text{C}$		
	При $\varphi=0,07$	При $\varphi=0,235$	При $\varphi=0,4$	При $\varphi=0,07$	При $\varphi=0,235$	При $\varphi=0,4$	При $\varphi=0,07$	При $\varphi=0,235$	При $\varphi=0,4$
-25	0,9989	0,9944	0,9856	0,924	0,9999	0,9996	0,9998	0,9994	0,9999
-20	0,9958	0,9993	0,9999	0,9955	0,9866	0,9973	0,968	0,9997	0,9897
-15	0,9971	0,9839	0,9998	0,9855	0,9719	0,9466	0,9989	0,9625	0,9999
-10	0,9959	0,9931	0,9552	0,9908	0,9999	0,9999	0,9994	0,9793	0,9887
-5	0,9983	0,8708	0,9973	0,9993	0,9575	0,9999	0,8058	0,9866	0,9495
0	0,9934	0,9824	0,9851	0,9538	0,9793	0,9419	0,9599	0,9463	0,9815
+5	0,9992	0,9645	0,9692	0,9584	0,932	0,9815	0,984	0,9956	0,9999
+8	0,9938	0,9829	0,9762	0,9567	0,9788	0,9999	0,9752	0,9756	0,9865

Для проверки статистической значимости корреляционной связи определяется критерий Стьюдента для разных значений факторов эксперимента. Результат приведен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Расчет критерия Стьюдента при различных значениях факторов t_n , φ и t_n

t_n , °C	При $t_n=40^\circ\text{C}$			При $t_n=60^\circ\text{C}$			При $t_n=80^\circ\text{C}$		
	При $\varphi=0,07$	При $\varphi=0,235$	При $\varphi=0,4$	При $\varphi=0,07$	При $\varphi=0,235$	При $\varphi=0,4$	При $\varphi=0,07$	При $\varphi=0,235$	При $\varphi=0,4$
-25	112,71	49,77	30,84	12,79	352,73	179,68	289,8	147,79	490,3
-20	57,67	139,21	467,37	55,49	31,98	72,14	20,42	203,9	36,52
-15	69,87	29,14	254,29	30,69	21,86	15,53	114,13	18,79	926,28
-10	58,55	44,77	17,09	38,69	406,6	542,01	159,21	25,58	34,89
-5	91,92	9,37	72,09	146,41	17,57	722,94	7,2	32	16,01
0	45,72	27,85	30,35	16,81	25,6	14,84	18,12	15,48	27,15
+5	131,54	19,32	20,83	17,76	13,6	27,1	29,26	56,31	2003,98
+8	47,32	28,22	23,84	17,39	25,27	1130,06	23,3	23,51	31,88

Результаты вычислений, приведенных в таблицах 3.9 и 3.10 говорят о высокой статистической значимости корреляционной связи между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности наружного ограждения в помещениях с лучистым отоплением.

3.4 Выводы по 3 разделу.

1. В результате математической обработки результатов, полученных в ходе проведения полного факторного эксперимента, получены уравнения регрессии, отображающие зависимость температуры внутренней поверхности наружного ограждения в зависимости от изменения наружной температуры и параметров излучателя. С помощью критерия Фишера и Стьюдента доказана адекватность полученных уравнений регрессии.

2. Экспериментально доказано, что температура внутреннего воздуха практически равна температуре внутренней поверхности наружного ограждения, что позволяет в дальнейших расчетах параметров микроклимата помещений,

использующих для отопления ИК-панели, пользоваться допущением о равенстве этих температур.

3. На основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований может быть разработана обоснованная и достоверная методика расчета систем низкотемпературного лучистого отопления.

4. Необходимо выполнить технико-экономическое обоснование эксплуатации систем низкотемпературного лучистого отопления для получения алгоритма технико-экономической оценки подобных систем и оценки целесообразности их внедрения в каждом конкретном случае.

4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Для количественной оценки затрат на покупку, монтаж и эксплуатацию системы низкотемпературного инфракрасного отопления необходимо решить задачу по рациональному размещению излучателей в помещении, определению требуемой единичной мощности и количества излучателей.

Методика проектирования панельного отопления, описанная в специализированной литературе [23, 24, 26, 121, 135-140] базируется на зависимости параметров отопительной панели от количества труб, параметров теплоносителя-воды, а также конструктивных особенностей панелей. Выбор типоразмеров панелей и их расположение ограничен тем, что такие приборы совмещаются с ограждающими конструкциями.

В настоящей работе разработана двухэтапная математическая модель проектирования систем инфракрасного отопления с электрическими инфракрасными излучателями. На первом этапе определяют тепловую мощность отопительных приборов. На втором – наиболее предпочтительное расположение излучателей в помещении и температуры внутренних поверхностей ограждений и внутреннего воздуха.

4.1 Постановка задачи расчета систем лучистого отопления

Как известно, существуют две основные постановки задачи расчета систем инфракрасного отопления помещений: прямая и обратная.

При прямой постановке задачи требуется по заданному количеству, типу, мощности и расположению излучателей определить распределение температур и тепловых потоков в рабочей зоне производственного помещения или в обслуживаемой зоне жилого (или общественного) помещения. Прямая постановка задачи характерна для расчета уже действующих систем отопления с целью проверки их соответствия действующим нормам.

При обратной постановке задачи по заданной температуре воздуха в рабочей (обслуживаемой) зоне помещения определяют мощность излучателей, их расположение в помещении. В качестве ограничения при решении обратной задачи следует учитывать максимально допустимые согласно нормативным документам значения температур и тепловых потоков.

При проектировании систем лучистого отопления решают обратную задачу.

При моделировании считаются заданными (входными) параметрами геометрические размеры помещения, расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы отопления, необходимая температура внутри помещения, конструктивные параметры излучателей.

В результате расчета требуется определить суммарную мощность излучателей, их расположение в помещении, распределение температур и падающих тепловых потоков при работе инфракрасных излучателей.

4.2 Теплотери помещения с лучистым отоплением

По строительным нормам температура внутреннего воздуха принимается не более чем на 1-3°C меньше температуры воздуха при конвективном отоплении [80, 88].

При этом, согласно справочной литературе [26] и экспериментальным исследованиям автора, температура внутреннего воздуха при лучистом отоплении практически равна температуре внутренней поверхности наружного ограждения.

Потери теплоты через ограждающие конструкции определяются по формуле

$$Q = A \cdot \frac{1}{R_0} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot n \cdot (1 + \sum \beta), \quad (4.1)$$

где R_0 – термическое сопротивление ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, определяемое по формуле

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (4.2)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплообмена на внутренней поверхности ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;

$\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплообмена на наружной поверхности ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Так как температура воздуха в помещении с лучистым отоплением равна температуре внутренней поверхности наружного ограждения, то трансмиссионные потери теплоты считаются без учета сопротивления теплообмена на внутренней поверхности ограждения

$$R_{0\text{л}} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}. \quad (4.3)$$

Потери теплоты наружной поверхностью ограждающей конструкции не зависят от способа отопления помещения, поэтому $\alpha_{\text{н}}$ можно принимать таким же, как и при традиционных системах отопления $\alpha_{\text{н}} = 23 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Отношение теплотерь через ограждающие конструкции при лучистом и конвективном отоплении равняются

$$\frac{Q_{\text{л}}}{Q_{\text{к}}} = \frac{A \cdot \frac{1}{R_{0\text{л}}} \cdot (t_{\text{вл}} - t_{\text{н}}) \cdot n \cdot (1 + \sum \beta)}{A \cdot \frac{1}{R_{0\text{к}}} \cdot (t_{\text{вк}} - t_{\text{н}}) \cdot n \cdot (1 + \sum \beta)} = \frac{R_{0\text{к}} \cdot (t_{\text{вл}} - t_{\text{н}})}{R_{0\text{л}} \cdot (t_{\text{вк}} - t_{\text{н}})}, \quad (4.4)$$

где $t_{\text{вк}}$ – нормативное значение температуры внутреннего воздуха при конвективном отоплении, $^{\circ}\text{С}$;

$t_{в,л}$ – нормативное значение температуры внутреннего воздуха, а, следовательно, и температуры внутренней поверхности наружного ограждения при лучистом отоплении, °С.

Если в выражение (4.4) подставить значения $\alpha_n=23$ Вт/м²·К и $\alpha_{вн}=8,7$ Вт/м²·К, то получится следующее выражение

$$\frac{Q_{л}}{Q_{к}} = \frac{(0,1584 + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}) \cdot (t_{в,л} - t_n)}{(0,1149 + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}) \cdot (t_{в,к} - t_n)}. \quad (4.5)$$

Если в формулу подставлять нормативные значения R_0 из нормативных документов [42], то формулу можно представить в виде

$$\frac{Q_{л}}{Q_{к}} = \frac{R_0 \cdot (t_{в,л} - t_n)}{(R_0 - 0,1149) \cdot (t_{в,к} - t_n)}. \quad (4.6)$$

Для города Макеевки при нормативных значениях R_0 и t_n [42], разница в потерях теплоты при использовании лучистого и конвективного отопления приведена на рис 4.1.

Для жилых и общественных зданий температуры воздуха составляют 20°С для конвективной и 17-19°С для лучистой системы отопления. Результаты расчетов потерь теплоты для г. Макеевка в зависимости от температуры внутреннего и наружного воздуха при прочих равных условиях приведены на рисунках 4.1 и 4.2. Значения температуры наружного воздуха и требуемого термического сопротивления принимались в соответствии с действующими нормативными документами. При этом потери теплоты при работе конвективного отопления приняты за 1 при всех значениях температуры наружного воздуха.

Анализ рисунков позволяет сделать вывод, что поддержание температуры внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружного ограждения при использовании лучистого отопления в 17-18°С позволяет уменьшить потери

теплоты в помещении, поэтому использование такого типа отопления можно рассматривать, как мероприятие по энергоресурсосбережению. При этом поддержание температуры в размере 19°C может быть экономически нецелесообразным.

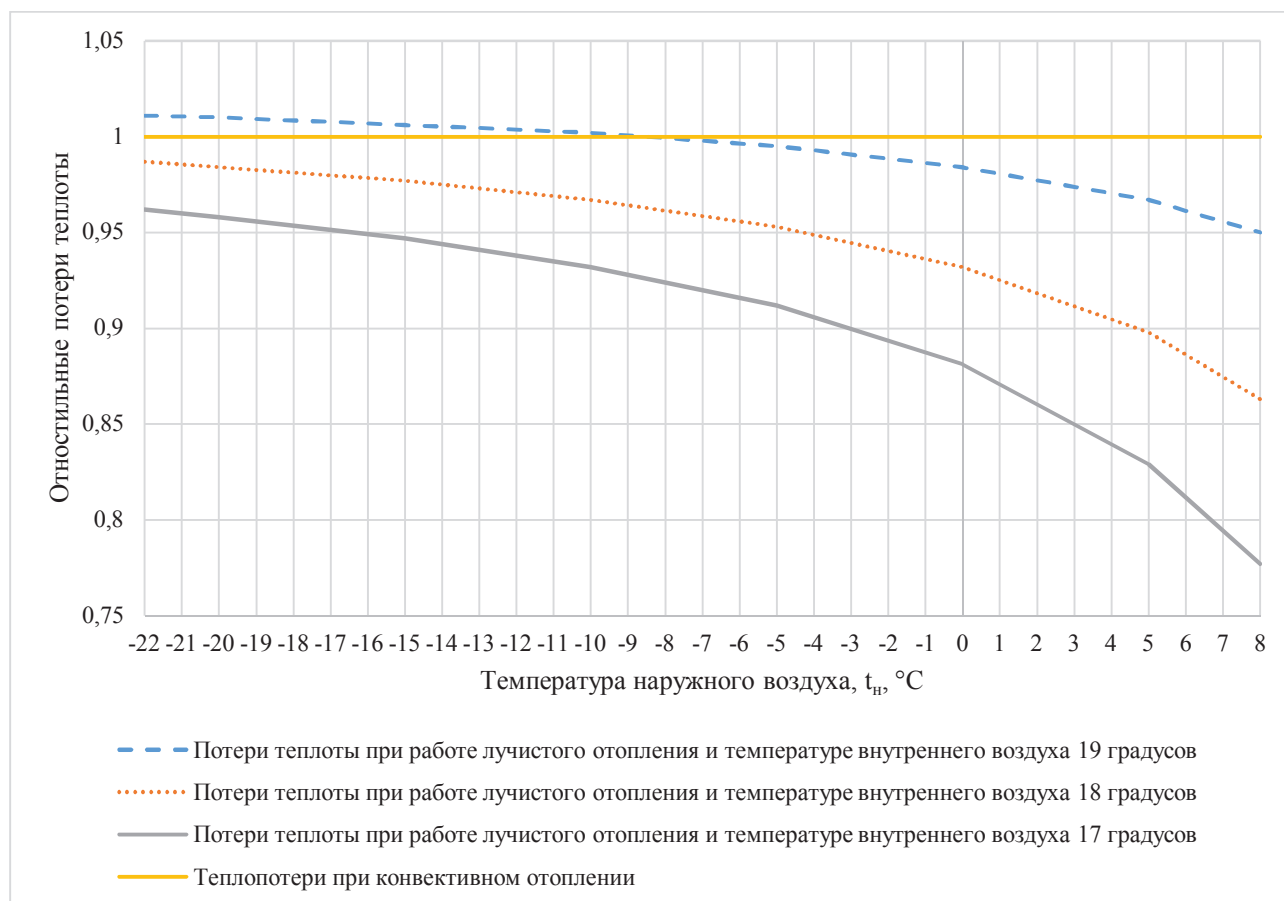


Рисунок 4.1 – Сравнение трансмиссионных теплопотерь при использовании различных систем отопления для жилого помещения в г. Макеевка

Потери теплоты на нагрев наружного воздуха, который компенсирует расход удаляемого системой вентиляции, определяется по формуле [23, 24]

$$Q_v = 0,337 \cdot A_{пл} \cdot h \cdot (t_v - t_n), \quad (4.7)$$

где $A_{пл}$ – площадь пола отапливаемого помещения, m^2 ;

h – высота помещения.

Отношение теплотерь на нагрев воздуха при лучистом и конвективном отоплении равняются

$$\frac{Q_{в.л.}}{Q_{в.к.}} = \frac{0,337 \cdot A_{пл} \cdot h \cdot (t_{в.л.} - t_{н.})}{0,337 \cdot A_{пл} \cdot h \cdot (t_{в.к.} - t_{н.})} = \frac{t_{в.л.} - t_{н.}}{t_{в.к.} - t_{н.}}. \quad (4.8)$$

Для г. Макеевка при нормативных значениях $t_{в.}$ разница теплотерь указана на рисунке 4.2.

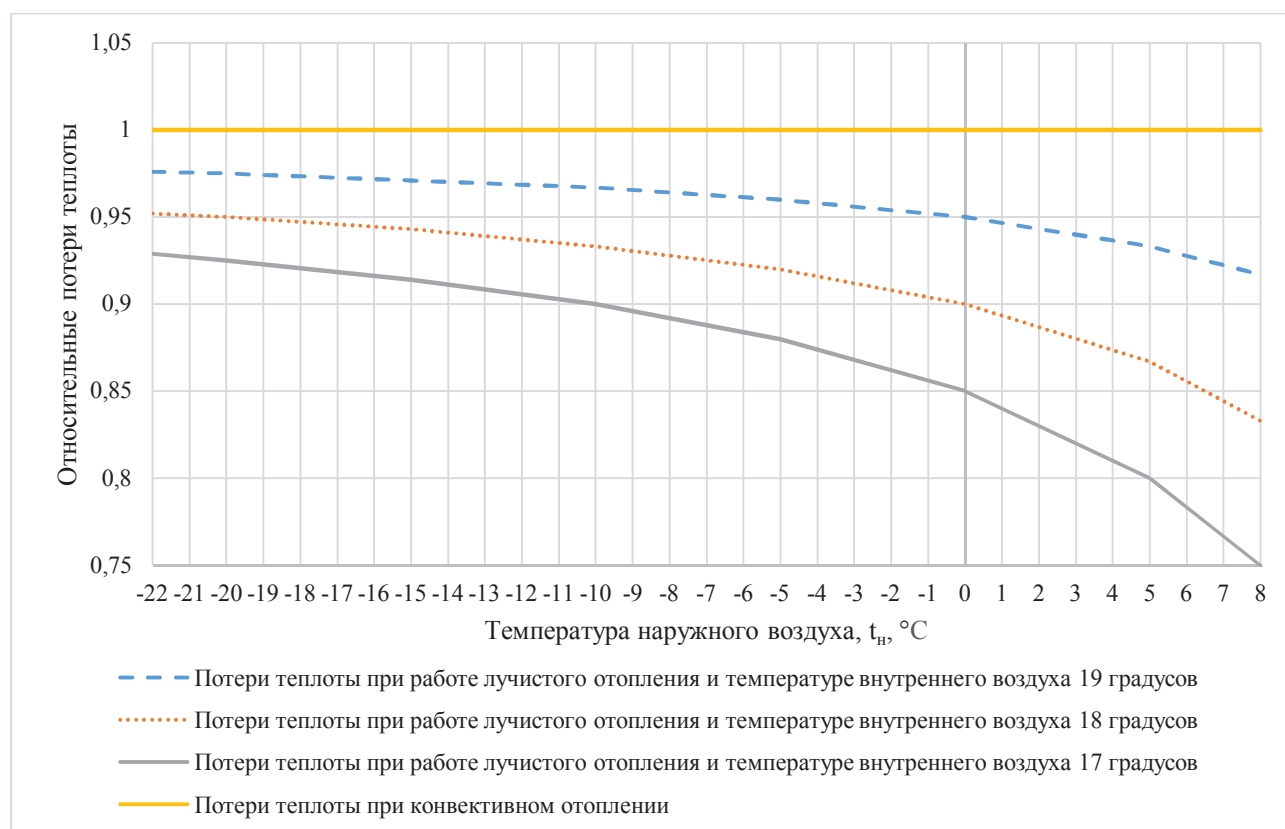


Рисунок 4.2 – Сравнение теплотерь на нагрев воздуха при использовании различных систем отопления для жилого помещения в г. Макеевка

Таким образом, уменьшение температуры внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружного ограждения может рассматриваться, как мероприятие по энергоресурсосбережению при отоплении жилых и общественных зданий. Следовательно, при проектировании систем лучистого отопления следует закладывать минимально возможную температуру воздуха

при соблюдении требуемого температурного комфорта в помещении для увеличения экономической эффективности.

4.3 Методика проектирования систем лучистого отопления

4.3.1 Подбор отопительных панелей

Плотность потока полусферического излучения серой поверхности определяется по формуле

$$E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4, \quad (4.9)$$

Таким образом, плотность потока зависит только от параметров излучающей поверхности: температуры и степени черноты. В то же время на радиационные свойства любой поверхности оказывает влияние исключительно внешний слой толщиной в несколько атомов. Подавляющее большинство современных низкотемпературных отопительных приборов покрываются красками, степень черноты которых составляет 0,92-0,96. При этом цвет краски никак не влияет на поглощение и испускание лучей инфракрасного спектра, что позволяет успешно эксплуатировать ИК-излучатели как с монохромной поверхностью (зачастую белой), так и с различными дизайнерскими решениями. Эти данные позволяют рассчитать плотность теплового потока, испускаемого 1 м² поверхности излучателя на основании его параметров, вне зависимости от производителя отопительного оборудования, что значительно упростит подбор отопительных панелей.

Конвективная составляющая теплоотдачи 1 м² отопительной панели определяется по формуле

$$Q_k = \alpha_k \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{вн}}), \quad (4.10)$$

где $t_{\text{п}}$ – температура поверхности панели, °C;

$\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент конвективного теплообмена для плоской вертикальной стенки, Вт/м²·°C, которая определяется по формуле

$$\alpha_{\text{к}} = 1,66 \cdot \sqrt[3]{(t_{\text{п}} - t_{\text{вн}})}, \quad (4.11)$$

Таким образом, выражение (4.10) можно записать в виде

$$Q_{\text{к}} = 1,66 \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{вн}})^{\frac{4}{3}}, \quad (4.12)$$

Суммарное количество теплоты, поступающей от 1 м² отопительной панели в помещение, определяется по формуле

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_{\text{п}}^4 + 1,66 \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{вн}})^{\frac{4}{3}}, \quad (4.13)$$

Анализ выражения (4.13) позволяет сделать вывод, что тепловая мощность панели зависит только от температуры и степени черноты поверхности. Зависимости плотности потока излучения и суммарной теплоотдачи панели от указанных параметров изображены соответственно на рис. 4.3 на рис. 4.4.

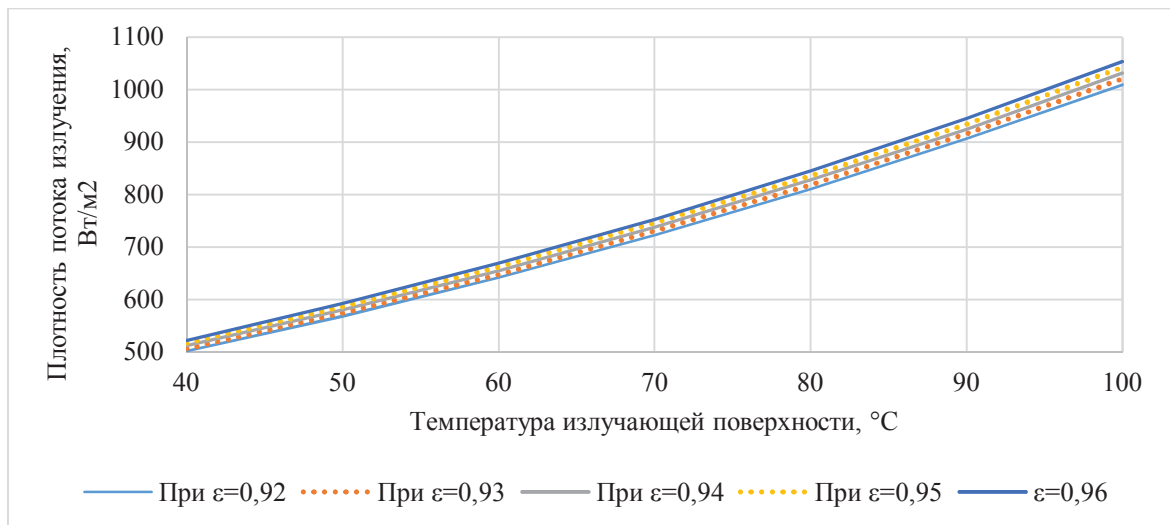


Рисунок 4.3 – Определение мощности 1 м² отопительных панелей в зависимости от параметров излучательной поверхности

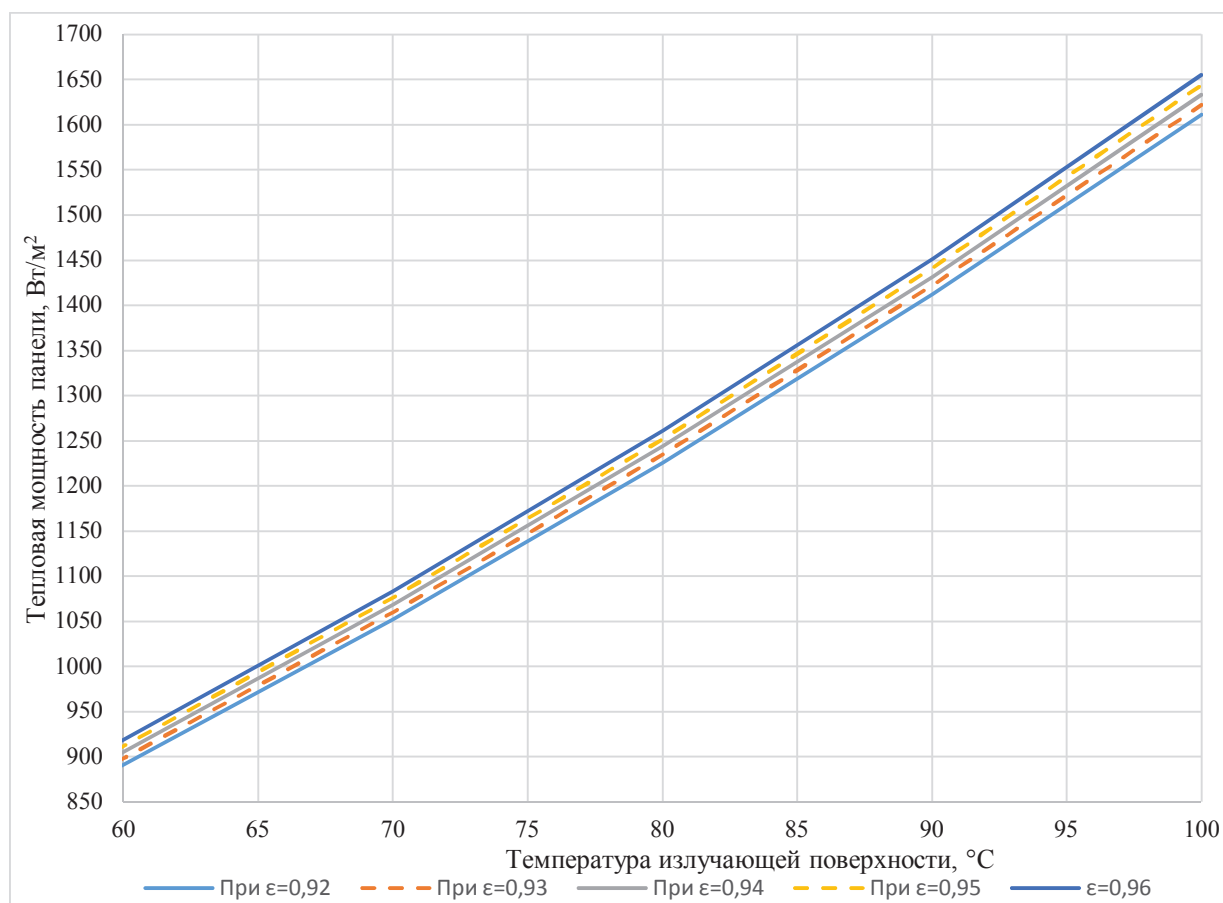


Рисунок 4.4 – Определение мощности 1 м² отопительных панелей в зависимости от температуры и степени черноты поверхности

Зная плотность теплового потока 1 м² излучательной поверхности и технические параметры отопительных панелей (рабочая температура, состояние поверхности панели, площадь) можно подобрать нужный отопительный прибор для обеспечения требуемых параметров микроклимата.

4.3.2 Выбор оптимального места установки прибора

Экспериментальные исследования теплообмена показали, что одним из самых важных показателей работы лучистых отопительных приборов является угловой коэффициент излучения. На основе анализа выражений 2.28 и 2.32 можно сделать вывод, что угловой коэффициент зависит исключительно от площади отопительной панели, площади ограждения и их взаимного расположения в пространстве, при этом размеры ограждения являются входным

параметром при проектировании отопления. Таким образом, угловой коэффициент можно изменить только сменой места установки прибора, либо подбором прибора с другой площадью излучающей поверхности.

Геометрические параметры поверхностей задаются координатами в декартовой системе. Всего в формулах 2.28 и 2.32 существует 16 комбинаций значений координат, поэтому вычисление углового коэффициента вручную весьма трудоемко. Расчет можно значительно облегчить, если использовать соответствующее программное обеспечение, например, Microsoft Excel. Пример определения координат панели и ограждения приведен на рисунке 4.5, а пример расчета среднего диффузного углового коэффициента излучения с помощью ПО Microsoft Excel приведен на рис. 4.6.

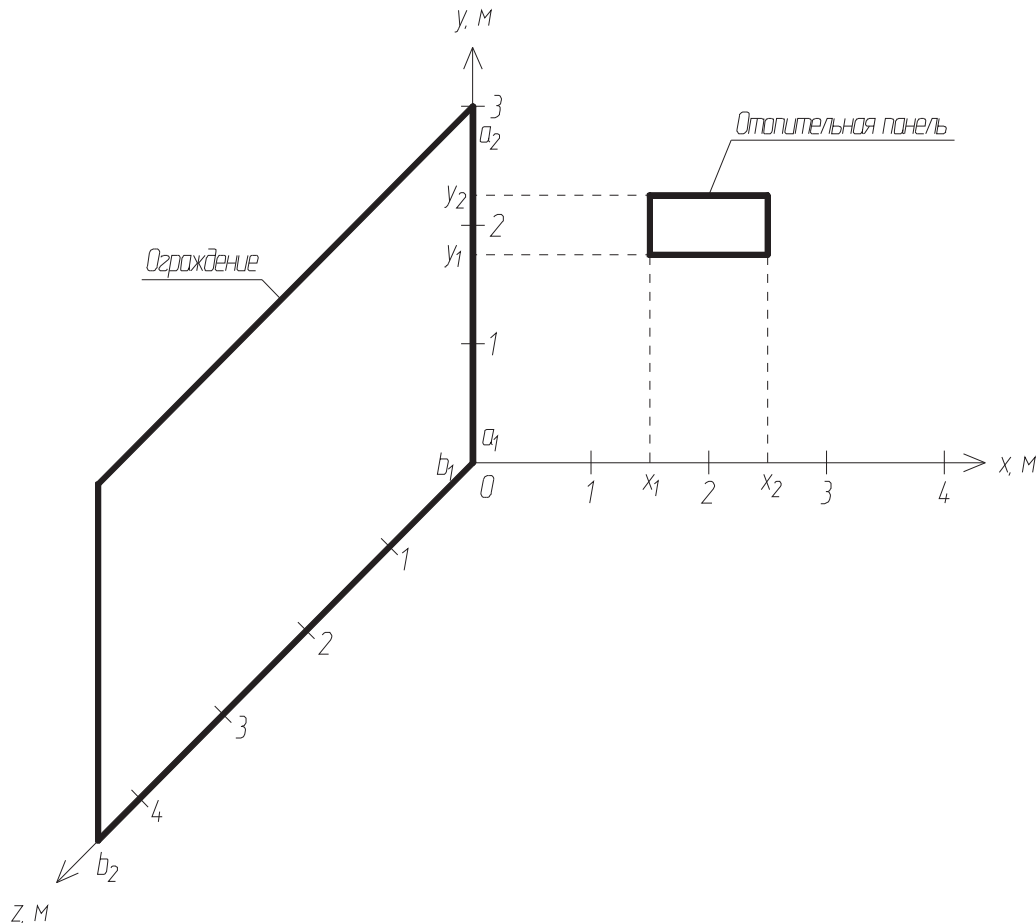


Рисунок 4.5 – Пример определения координат отопительного прибора и обогреваемой стены

На рисунке показан пример определения значений координат стены и отопительной панели в зависимости от их размеров и взаимного расположения.

Размеры стены 3х4,5 м, размеры панели 0,5х1 м, панель установлена на расстоянии 1,5 м от стены и на высоте 1,75 м от пола.

Координаты для расчета углового коэффициента:

- стены: $a_1 = 0$, $a_2 = 3$, $b_1 = 0$, $b_2 = 4,5$;

- панели: $c_1 = 1,75$; $c_2 = 2,25$; $d_1 = 1,5$; $d_2 = 2,5$.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1						a1	0	x1	1,5		
2						a2	3	x2	2,5		
3	ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫЕ ПЛОСКОСТИ					b1	0	y1	1,75		
4						b2	4,5	y2	2,25		
5											
6		a	b	x	y	φ					
7	1	0	0	1,5	1,75	0,24206					
8	2	0	4,5	1,5	1,75	2,36902					
9	3	0	0	2,5	1,75	-0,9515		Площадь панели		0,5	
10	4	0	4,5	2,5	1,75	-1,3812					
11	5	0	0	1,5	2,25	-0,0932		Площадь стены		13,5	
12	6	0	4,5	1,5	2,25	-2,6953					
13	7	0	0	2,5	2,25	0,86482					
14	8	0	4,5	2,5	2,25	1,69504		φ12	0,16		
15	9	3	0	1,5	1,75	-0,2421					
16	10	3	4,5	1,5	1,75	-2,369					
17	11	3	0	2,5	1,75	-0,0953					
18	12	3	4,5	2,5	1,75	2,85974					
19	13	3	0	1,5	2,25	0,0932					
20	14	3	4,5	1,5	2,25	2,69525					
21	15	3	0	2,5	2,25	0,28064					
22	16	3	4,5	2,5	2,25	-3,1924					
23											

Рисунок 4.6 – Пример расчета среднего диффузного углового коэффициента излучения с помощью ПО Microsoft Excel

Аналогично рассчитывается угловой коэффициент для параллельных плоскостей. Пример определения координат изображён на рисунке 4.7, пример расчета на рисунке 4.8.

На рисунке показан пример определения значений координат стены и отопительной панели в зависимости от их размеров и взаимного расположения. Размеры стены 3х4 м, размеры панели 0,5х1 м, панель установлена на расстоянии 1,5 м от стены и на высоте 1,75 м от пола, расстояние между обогреваемой стеной и стеной, на которой установлена панель, составляет 4,5 м.

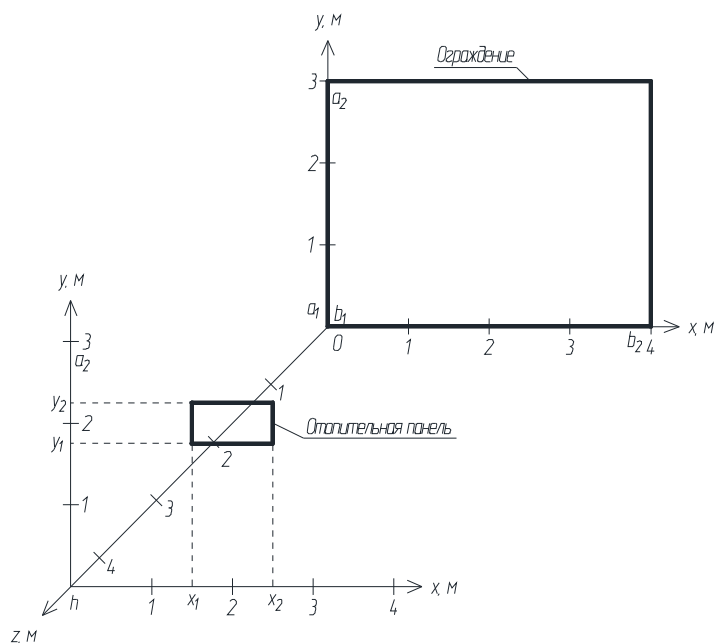


Рисунок 4.7 – Пример определения координат отопительного прибора и обогреваемой стены

Координаты для расчета углового коэффициента:

- стены: $a_1 = 0$, $a_2 = 3$, $b_1 = 0$, $b_2 = 4$;
- панели: $c_1 = 1,75$; $c_2 = 2,25$; $d_1 = 1,5$; $d_2 = 2,5$.
- расстояние между плоскостями $h=4,5$ м.

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
28					a1=	0	x1=	1,75			
29					a2=	3	x2=	2,25			
30	ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ПЛОСКОСТИ				b1=	0	y1=	1,5			
31					b2=	4	y2=	2,5			
32	Расстояние между плоскостями				h=	4,5					
33											
34		a	b	x	y	φ					
35	1	0	0	1,75	1,5	0,00497					
36	2	0	4	1,75	1,5	-1,1515					
37	3	0	0	2,25	1,5	-0,0446		Площадь стены		12	
38	4	0	4	2,25	1,5	1,21658					
39	5	0	0	1,75	2,5	-0,0446		Площадь панели		0,5	
40	6	0	4	1,75	2,5	1,21658					
41	7	0	4	2,25	2,5	-1,1515					
42	8	0	0	2,25	2,5	0,00497					
43	9	3	0	1,75	1,5	-0,6777					
44	10	3	4	1,75	1,5	0,08415		φ12		0,16	
45	11	3	0	2,25	1,5	0,73276					
46	12	3	4	2,25	1,5	-0,1256					
47	13	3	0	1,75	2,5	0,73276					
48	14	3	4	1,75	2,5	-0,1256					
49	15	3	0	2,25	2,5	0,08415					
50	16	3	0	2,25	2,5	-0,6777					
51											

Рисунок 4.8 – Пример расчета среднего диффузного углового коэффициента излучения с помощью ПО Microsoft Excel

За определением углового коэффициента следует расчет температуры внутренней поверхности наружного ограждения. Входными данными для этого расчета, кроме уже указанных выше параметров отопительного прибора и размера ограждения, являются:

- степень черноты внутренней поверхности наружного ограждения;
- термическое сопротивление наружного ограждения.

Во внутренней отделке жилых и общественных зданий в основном используются материалы, которые можно условное объединить в категорию «диэлектрики», степень черноты которых приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Степень черноты отделочных материалов

Наименование материала	Степень черноты
Асбестовый картон	0,96
Асбестовая бумага	0,93
Бумага тонкая, наклеенная на металлическую поверхность	0,924
Гипс	0,903
Дуб строганный	0,895
Кварц плавленный, шероховатый	0,932
Кирпич красный	0,93
Кирпич огнеупорный	0,9
Лак белый эмалевый на железной пластине	0,906
Лак черный блестящий на железной пластине	0,875
Лак черный матовый	0,96-0,98
Лак белый	0,8-0,95
Масляные краски различных цветов	0,92-0,96
Мрамор сероватый, полированный	0,931
Стекло гладкое	0,937
Штукатурка шероховатая, известковая	0,91
Эмаль белая на железной поверхности	0,91

Термическое сопротивление определяется с учетом того, что трансмиссионные потери идут с внутренней поверхности наружного ограждения.

Так как выражение 2.8 представляет собой уравнение четвертой и первой степени, вычисление температуры лучше производить с помощью соответствующего программного обеспечения, например, Math Cad с использованием вычислительного блока «Given /Find» [141], как показано на рис. 4.9.

```

Given

Коэффициент теплопередачи       $K := 0.303$ 
Угловой коэффициент             $Fi := 0.16$ 
Температура наружного воздуха    $Tn := -22 + 273$ 
Степень черноты панели          $e1 := 0.92$ 
Степень черноты вн. пов-сти      $e2 := 0.9$ 
Температура поверхности панели   $T1 := 50 + 273$ 

Уравнение


$$\frac{5.76}{10^8} \cdot e1 \cdot e2 \cdot Fi \cdot x^4 + K \cdot x - K \cdot Tn - \frac{5.76}{10^8} \cdot e1 \cdot e2 \cdot Fi \cdot T1^4 = 0$$


 $x > 0$ 

Find(x) → 291.23291416553522375

```

Рисунок 4.9 – Листинг ПО MathCad с расчетом температуры внутренней поверхности наружного ограждения

4.3.4 Окончание расчета системы лучистого отопления

Следующим шагом является расчет температуры внутренней поверхности адиабатных поверхностей, обращенных в помещение. Расчет аналогично произведен с помощью программного обеспечения MathCad с использованием вычислительного блока «Given/Find» (рис. 4.10).

Given	
Степень черноты панели	$e1 := 0.92$
Степень черноты внутр. пов-сти ограждений	$e2 := 0.9$
Температура поверхности панели	$Tp := 50 + 273$
Температура наружного в-ха	$Tn := -22 + 273$
Температура вн. пов-сти наружного ограждения	$Tx := 18.2 + 273$
Угловой коэффициент	$Fi := 0.16$
Площадь адиабатных поверхностей	$Fa := 73.5$
Площадь наружного ограждения	$Fx := 13.5$
Коэффициент конвективного теплообмена между адиабатной поверхностью и внутр. воздухом	$a := 0.99$
Площадь отопительной панели	$Fp := 0.5$
Уравнение для расчета температуры внутренней поверхности внутренних ограждений:	
$5.67 \cdot 10^{-8} \cdot e1 \cdot e2 \cdot (Tp^4 - x^4) \cdot (1 - Fi) \cdot Fp - 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot e1 \cdot e2 \cdot (x^4 - Tx^4) \cdot Fx - a \cdot Fa \cdot (x - Tx) - 1.16 \cdot (Tp - Tx)^{\frac{1}{3}} \cdot (Tp - Tx) \cdot Fp = 0$	
$x > 0$	
Find(x) → 291.38995497190334243	

Рисунок 4.10 – Листинг ПО MathCad с расчетом температуры внутренней поверхности адиабатных ограждений

Расчет показал, что при использовании панели с температурой поверхности 50°C при температуре наружного воздуха -22°C будет поддерживаться температура внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружного ограждения $18,2^{\circ}\text{C}$, а температура адиабатных поверхностей $18,4^{\circ}\text{C}$.

Для завершения расчета необходимо проверить выполнение первого условия комфортности

$$t_R = 29 - 0,57 \cdot t_b \pm 1,5, \quad (4.10)$$

где t_R – радиационная температура помещения, определяемая по формуле

$$t_R = \frac{\sum(F_i \cdot t_i)}{\sum F_i}, \quad (4.11)$$

где F_i – площадь поверхности i -того ограждения, м^2 ;

t_i – температура поверхности i -того ограждения, $^{\circ}\text{C}$.

$$t_R = \frac{73,5 \cdot 18,4 + 13,5 \cdot 18,2}{73,5 + 13,5} \approx 18,4^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{bmin} = \frac{29 - 18,4 - 1,5}{0,57} = 16,0^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{B_{max}} = \frac{29 - 18,4 + 1,5}{0,57} = 21,2^{\circ}\text{C}.$$

Температура внутреннего воздуха находится в допустимых пределах, и первое условие комфортности выполняется, следовательно, отопительные приборы подобраны правильно.

Таким образом, алгоритм расчета лучистого отопления можно представить в виде блок-схемы (рис. 4.11).

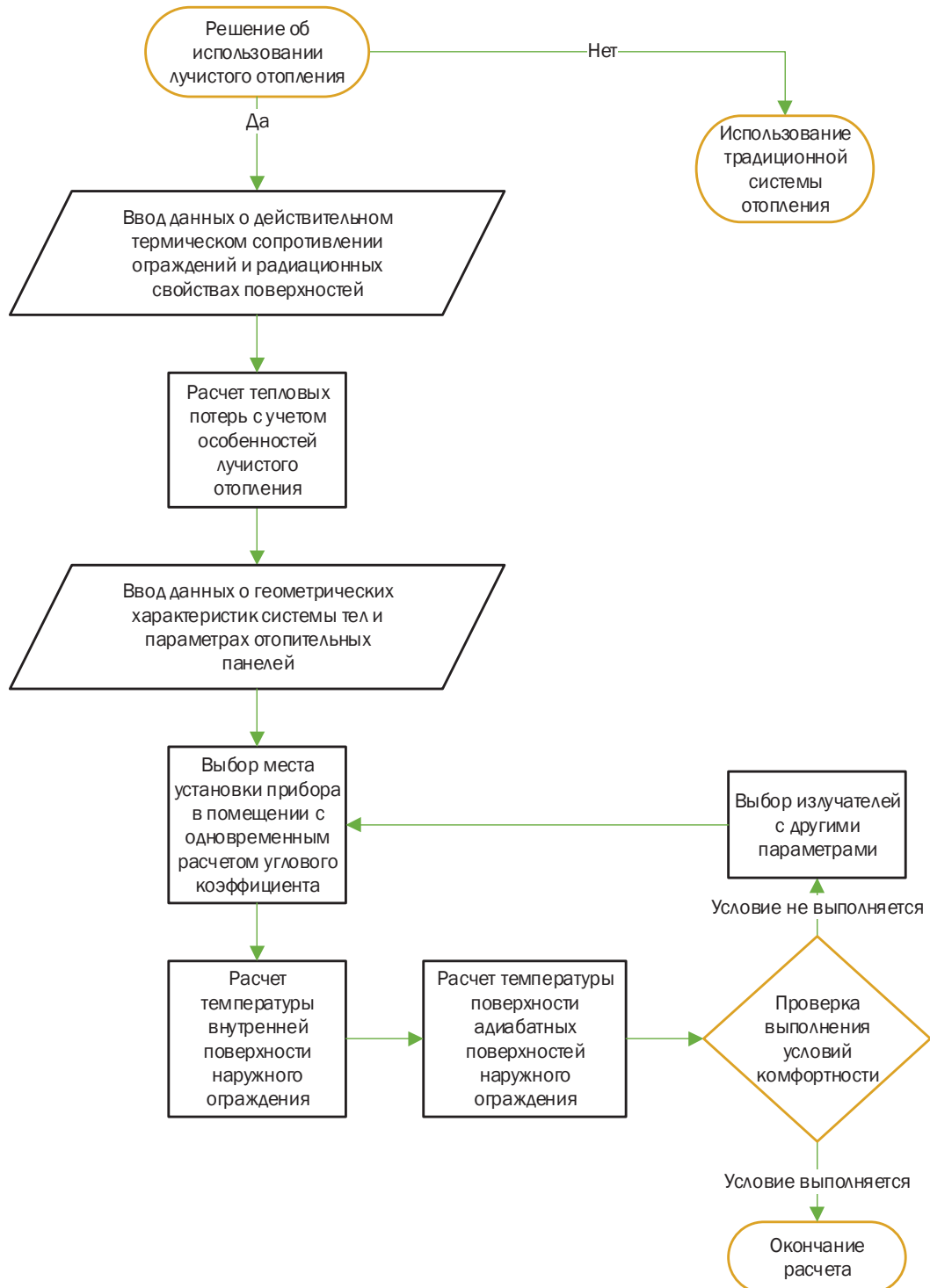


Рисунок 4.11 – Алгоритм расчета системы лучистого отопления

4.4 Технико-экономическая оценка внедрения лучистого отопления

В данной работе производится анализ экономической эффективности работы систем низкотемпературного лучистого отопления. Целью данного анализа будет определение экономической эффективности проекта реконструкции систем отопления жилых домов в с. Кожевня Шахтерского района Донецкой области, пострадавших в результате боевых действий в сравнении с проектом реконструкции систем отопления на базе твердотопливных котлов. В результате получены экономические характеристики обоих проектов (с котлом и с панелями). В качестве топлива выбран уголь Донецкого каменноугольного бассейна с низшей теплотой сгорания $Q_{н^p}=24,08$ Мдж/кг [144].

Экономическое обоснование выбора варианта заключается в определении экономического эффекта достигаемого в результате экономии расхода материальных и топливных ресурсов в течение эксплуатации системы отопления.

Для определения годовых эксплуатационных затрат и себестоимости выработки тепла необходимо определить:

1. Сметную стоимость монтажа оборудования (капитальные вложения);
2. Годовые эксплуатационные затраты.

Для определения сметной стоимости монтажа оборудования были произведены расчеты локальной сметы на строительно-монтажные работы и сводного сметного расчета.

Вышеперечисленные документы были составлены с использованием программного комплекса Смета-Профи в соответствии с действующей нормативной базой [143].

Годовые эксплуатационные затраты определяются по формуле

$$\Xi_3 = Z_T + Z_3 + Z_B, \quad (4.12)$$

где Z_T – затраты на топливо, руб.;

$З_э$ – затраты на электроэнергию, руб.;

$З_в$ – затраты на воду, руб.

Годовые затраты на топливо определяются по формуле

$$З_т = P_т \cdot C_т, \quad (4.13)$$

где $P_т$ – годовой расход топлива, (т);

$C_т$ – стоимость топлива, (руб./т).

Годовые затраты на электроэнергию определяются по формуле

$$З_э = M_д \cdot t_с \cdot t_г \cdot T_п, \quad (4.14)$$

где $M_д$ – мощность электродвигателей, кВт;

$t_с$ – время работы двигателя засутки, ч;

$t_г$ – время работы двигателя в году, дни;

$T_п$ – тариф за потребляемую энергию, руб./кВт·ч [145].

Годовые затраты на воду, определяем по формуле

$$З_в = B \cdot C_в, \quad (4.15)$$

где B – объем воды необходимый для заполнения системы, м³;

$C_в$ – стоимость м³ воды, руб. [100].

Экономический эффект определяется по формуле

$$Э = З_1 - З_2, \quad (4.16)$$

где $Э$ – экономический эффект от применения оптимального варианта, руб;

Z_1, Z_2 – приведенные затраты по 1-му и 2-му вариантам, руб.

Приведенные затраты определяются по формуле

$$Z = C_i + E \cdot K_i, \quad (4.17)$$

где Z_i – приведенные затраты по сравниваемым вариантам, руб.;

C_i – ежегодные затраты, руб.;

E – коэффициент экономической эффективности ($E = 1/T$);

K_i – капитальные вложения i -го варианта, руб.

Локальные сметы, сводные сметные расчеты по каждому из вариантов приведены в приложении В. Расчет производился для мансардного дома площадью 99,3 м², двухкомнатного жилого дома площадью 49,4 м² и однокомнатного жилого дома площадью 30,1 м² в с. Кожевня.

4.4.1 Экономическое обоснование выбора оптимального варианта отопления мансардного дома площадью 99,3 м²

Произведены расчеты по двум следующим вариантам:

Вариант 1 – твердотопливный котел ДАНКО-12,5ТН мощность 12,5кВт;

Вариант 2 – Электрическая панель UDEN-700, мощность 682Вт.

Годовые затраты на топливо составляют:

$$Z_T = 5,200 \cdot 2800 = 14560,0 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на электроэнергию равны:

$$Z_K = 0,250 \cdot 24 \cdot 175 \cdot 0,48 = 504,00 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{до 5000}}^{\text{эл}} = 8,184 \cdot 7 \cdot 175 \cdot 0,48 = 4812,19 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на воду:

$$Z_B = 0,60 \cdot 11,02 = 6,61 \text{ руб.}$$

Определяются годовые эксплуатационные затраты

$$З_{ГОД1} = 14560,00 + 504,00 + 6,61 = 15070,61 \text{ руб.}$$

$$З_{ГОД2} = 0,00 + 4812,19 + 0,00 = 4812,19 \text{ руб.}$$

Приведенные затраты равны:

$$З_1 = 15,071 + 0,05 \cdot 123,270 = 21,235 \text{ тыс.руб.}$$

$$З_2 = 4,812 + 0,05 \cdot 58,757 = 7,750 \text{ тыс.руб.}$$

Годовой экономический эффект от использования системы отопления с электрическими панелями равен

$$Э = 21,235 - 7,750 = 13,485 \text{ тыс.руб.}$$

Срок окупаемости системы составит

$$СО = 58,757 / 13,485 = 4,4 \text{ года}$$

4.4.2 Экономическое обоснование выбора оптимального варианта отопления двухкомнатного дома площадью 49,4 м²

Произведены расчеты по двум следующим вариантам:

Вариант 1 – твердотопливный котел ЭванWarmos ТК-9 мощность 9кВт;

Вариант 2 – Электрическая панель UDEN-700, мощность 682 Вт.

Годовые затраты на топливо составляют:

$$З_{т} = 2,500 \cdot 2800 = 7000 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на электроэнергию равны

$$З_{э}^к = 0,200 \cdot 24 \cdot 175 \cdot 0,48 = 403,20 \text{ руб.}$$

$$З_{э}^{эп}_{до5000} = 4,092 \cdot 7 \cdot 175 \cdot 0,48 = 2406,10 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на воду

$$З_{в} = 0,60 \cdot 11,02 = 6,61 \text{ руб.}$$

Определяются годовые эксплуатационные затраты

$$З_{ГОД1} = 7000,00 + 403,20 + 6,61 = 7409,81 \text{ руб.}$$

$$З_{ГОД2} = 0,00 + 2406,10 + 0,00 = 2406,10 \text{ руб.}$$

Приведенные затраты равны

$$З_1 = 7,410 + 0,05 \cdot 75,710 = 11,196 \text{ тыс.руб.}$$

$$З_2 = 2,406 + 0,05 \cdot 34,942 = 4,153 \text{ тыс.руб.}$$

Годовой экономический эффект от использования системы отопления с электрическими панелями равен

$$\mathcal{E} = 11,196 - 4,153 = 7,043 \text{ тыс.руб.}$$

Срок окупаемости системы составит:

$$CO = 34,942 / 7,043 = 5,0 \text{ лет}$$

4.4.3 Экономическое обоснование выбора оптимального варианта отопления однокомнатного дома площадью 30,1 м²

Произведены расчеты по двум следующим вариантам:

Вариант 1 – твердотопливный котел ЭванWarmos ТК-9 мощность 9кВт;

Вариант 2 – Электрическая панель UDEN-700, мощность 682 Вт.

Годовые затраты на топливо составляют

$$З_{\text{т}} = 1,500 \cdot 2800 = 4200 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на электроэнергию равны

$$З_{\text{э}}^{\text{к}} = 0,100 \cdot 24 \cdot 175 \cdot 0,48 = 201,60 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{э}}^{\text{эл}}_{\text{до } 5000} = 2,046 \cdot 7 \cdot 175 \cdot 0,48 = 1203,05 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на воду

$$З_{\text{в}} = 0,60 \cdot 11,02 = 6,61 \text{ руб.}$$

Определяются годовые эксплуатационные затраты

$$З_{\text{ГОД1}} = 4200,00 + 201,60 + 6,61 = 4408,21 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{ГОД2}} = 0,00 + 1203,05 + 0,00 = 1203,05 \text{ руб.}$$

Приведенные затраты равны:

$$З_1 = 4,408 + 0,05 \cdot 66,109 = 7,713 \text{ тыс.руб.}$$

$$З_2 = 1,203 + 0,05 \cdot 23,335 = 2,370 \text{ тыс.руб.}$$

Годовой экономический эффект от использования системы отопления с электрическими панелями равен

$$\mathcal{E} = 7,713 - 2,370 = 5,343 \text{ тыс.руб.}$$

Срок окупаемости системы составит

$$CO = 23,335 / 5,343 = 4,4 \text{ года}$$

4.5 Выводы по 4 разделу

1. Разработана методика проектирования систем низкотемпературного лучистого отопления для жилых и общественных зданий

2. Годовой экономический эффект от использования системы отопления с электрическими панелями для мансардного дома площадью 99,3 м² составляет 13845 руб./год; для двухкомнатного дома площадью 49,4 м² составляет 7043 руб./год; для однокомнатного дома 5343 руб./год.

3. Проведенные расчетно-аналитические исследования для различных типовых проектов жилых зданий позволяют заключить, что экономический эффект от внедрения систем низкотемпературного лучистого отопления составит до 140 руб./год на 1 м² отапливаемой площади за отопительный период. И экономический эффект будет еще более значительным при использовании в системах отопления дорогостоящего газообразного топлива.

4. Следует также отметить, что внедрение систем автономного лучистого низкотемпературного отопления, безусловно, позволит улучшить экологическую обстановку в селитебной зоне.

5. Срок окупаемости систем лучистого отопления в для домов площадью от 30 до 100 м² не превышает 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена прикладная научно-техническая задача по повышению эффективности систем низкотемпературного отопления жилых и общественных зданий.

1. Проведенные аналитические исследования доказали эффективность использования лучистых отопительных приборов, которая достигается повышением теплового комфорта в обслуживаемых помещениях, снижением тепловых потерь, а также позитивным воздействием длинноволнового инфракрасного излучения на здоровье человека.

2. Разработана математическая модель определения средних диффузных угловых коэффициент для расчета лучистого теплообмена в помещении на основании геометрических параметров отопительных приборов и внутренних поверхностей помещения при их различном взаимном расположении.

3. На основании экспериментальных исследований определены особенности теплообмена в помещении с лучистым отоплением, получено уравнение регрессии для инженерного расчета температуры внутренней поверхности наружного ограждения, выведены аналитические выражения для расчета лучистого теплообмена.

4. Разработаны методика расчета температурного режима отапливаемого помещения и методика расчета теплопотерь при низкотемпературном лучистом отоплении.

5. Определен экономический эффект внедрения лучистого отопления при реконструкции жилых домов в с. Кожевня. Экономический эффект от использования лучистого отопления составил до 140 руб. на каждый 1 м² отапливаемого помещения за отопительный период при сроке окупаемости 4,4 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лепеш, Г.В. Энергосбережение в системах жизнеобеспечения зданий и сооружений / Г. В. Лепеш. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного экономического университета, 2014. – 437 с.
2. Сравнение различных способов отопления зданий: [Электронный ресурс] // ЭСКО: Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2006. – № 9. URL: http://www.journal.esco.co.ua/2006_9/art_157.htm (дата обращения 26.09.2017)
3. Энергетическая стратегия России до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 года N 1715-р): [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 26.09.2017)
4. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями): [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/12171109/> (дата обращения 26.09.2017)
5. Указ Президента РФ от 04.06.2008 года №889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики»: [Электронный ресурс]. URL: <http://graph.document.kremlin.ru/page.aspx7963479> (дата обращения 26.09.2017).
6. Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 года №2446-р Программа РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года»: [Электронный ресурс]. URL: <http://news.sfu-kras.ru/node/7289> (дата обращения 26.09.2017).
7. Низовцев, М.И. Тепло- и массоперенос в энергоэффективных ограждающих конструкциях и климатическом оборудовании зданий [Текст]: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 01.04.14 – Новосибирск, 2011. – 40 с.

8. Гаряев, А.Б. Энергосбережение в энергетике и технологиях. Энергосбережение в низкотемпературных процессах и технологиях [Текст]: учебное пособие / А.Б. Гаряев, О.Л. Данилов, А.Л. Ефимов, И.В. Яковлев. – М.: Изд. МЭИ, 2002. – 60 с.
9. Распоряжение Кабинета Министров Украины от 28 сентября 2006 года № 502-р «О переводе населенных пунктов на отопление электроэнергией»: [Электронный ресурс]. URL: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/KR060502.html (дата обращения 26.09.2017).
10. Электрические инфракрасные обогреватели: [Электронный ресурс] // Издание С.О.К.-онлайн – 2007. – №5. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/elektricheskie-infrakrasnye-obogrevateli> (дата обращения 26.09.2017).
11. Богуславский, Л.Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ Пособие [Текст] / Л.Д. Богуславский, В.И. Ливчак, В.П. Титов и др. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.
12. Богуславский, Л.Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] / Л.Д. Богуславский. – М.: Стройиздат, 1982. – 256 с.
13. Николаев, Н.А. Эффективность систем лучистого отопления в промышленности и энергетике [Текст] / Н.А. Николаев, Б.М. Зиганшин // Труды Академэнерго. – 2006. – №3. – С. 38-48.
14. Брюханов, О.Н. Радиационный газовый нагрев [Текст] / О.Н. Брюханов, Э.В. Крайний, Б.С. Мاستрюков. – Л: Недра, 1989. – 296 с.
15. Пенкин, А. А. Разработка устройства инфракрасного излучения для термической обработки зерна и локального обогрева [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Пенкин Александр Александрович. Москва, 2005. – 258 с.

16. Идрисов, А.З. Системы лучистого обогрева с газовыми инфракрасными излучателями [Текст] / А.З. Идрисов // АВОК. – М.: АВОК. – 1996. – №1. – С. 25-27.
17. Бухмиров, В.В. Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений [Текст] / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, Ю.С. Солнышкова // Вестник ИГЭУ. – 2010. – №4. – С. 23-25.
18. Инфракрасное отопление производственных помещений – от проекта до внедрения: [Электронный ресурс] // Издание С.О.К.-онлайн, 2003, №2. URL: <http://www.c-o-k.ru/showtext/?id=184&from=online> (дата обращения 26.09.2017).
19. Инфракрасные электрообогреватели: [Электронный ресурс] // Издание С.О.К.-онлайн, 2010, №3. URL: <http://www.c-o-k.ru/showtext/?id=2503&from=online> (дата обращения 26.09.2017).
20. Медведь, П. А. Инфракрасный обогрев – экономичное тепло: [Электронный ресурс] // Издание сок-онлайн. – 2004. – №2. URL: <http://www.c-o-k.ru/showtext/?id=564&from=online> (дата обращения 26.09.2017).
21. Применение систем инфракрасного отопления – эффективное средство сбережения газа: [Электронный ресурс // Издание С.О.К.-онлайн. – 2002. – №7. URL: <http://www.c-o-k.ru/showtext/?id=163&from=online> (дата обращения 26.09.2017).
22. Водяные, воздушные, газовые системы отопления: проблема выбора: [Электронный ресурс] // Издание С.О.К.-онлайн – 2002. – №7. URL: <http://www.c-o-k.ru/showtext/?id=170&from=online> (дата обращения 26.09.2017).
23. Сканави, А.Н. Отопление [Текст] / А.Н. Сканави, Л.М. Махов. – М.: АСВ, 2002. – 522 с.
24. Богословский, В.Н. Отопление [Текст] / В.Н. Богословский, А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.
25. Миссенар, А. Лучистое отопление и охлаждение [Текст]: [пер. с франц.] / А. Миссенар. – М.: Госстройиздат, 1961. – 299 с.

26. Мачкаши, А. Лучистое отопление [Текст]: [пер. с венгерского В.М. Беляева, под ред. В.Н. Богословского и Л.М. Махова] / А. Мачкаши, Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1985. – 464 с.
27. Наумейко, А.В. Энергоэффективные системы отопления: Учебное пособие [Текст] / А.В. Наумейко, П.В., Кузнецов, Ю.И. Толстова, Р.Н. Шумилов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – 106 с.
28. Ициксон, Б.С. Инфракрасные газовые излучатели [Текст] / Б.С. Ициксон, Ю. Л. Денисов. – М.: Недра, 1969. – 277с.
29. Левитин, И.Б. Инфракрасная техника [Текст] / И.Б. Левитин. – Л.: Энергия, 1973. – 158 с.
30. Родин, А.К. Газовое лучистое отопление [Текст] / А.К. Родин. – Л.: Недра, 1987. – 191 с.
31. Богуславский, Л.Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] / Л.Д. Богуславский. – М.: Стройиздат, 1982. – 256 с.
32. Брюханов, О.Н. Радиационный газовый нагрев [Текст] / О.Н. Брюханов, Э.В. Крайний, Б.С. Мاستрюков. – Л: Недра, 1989. – 296 с.
33. Панельно-лучистые системы отопления и охлаждения зданий: [Электронный ресурс]. URL:https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6169 (дата обращения 26.09.2017).
34. Системы лучистого отопления и охлаждения Часть 1. Отопление излучающими панелями: [Электронный ресурс]. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2162 (дата обращения 26.09.2017).
35. Болотских, Н.Н. Совершенствование методики расчета систем отопления газовыми трубчатыми инфракрасными нагревателями [Текст] / Н.Н. Болотских // Науковий вісник будівництва. – ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2009. – №54. – С. 76-91.

36. Болотских, Н.Н. Облучение при инфракрасном способе отопления производственных помещений [Текст] / Н.Н. Болотских // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2010. - №59. – С. 268-278.
37. Болотских, Н.Н. Особенности лучистого отопления производственных помещений [Текст] / Н.Н. Болотских // Науковий вісник будівництва. – ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2010. – №57 – С. 320-328.
38. Худенко, А.А. Радіаційне опалення і охолодження. Навчальний посібник [Текст] / А.А. Худенко. – К.: КНУБА, 2004. – 152 с.
39. Желих, В.М. Особливості опалення виробничих приміщень [Текст] / В.М. Желих, В.Б. Шепітчак // Науковий вісник: Національний університет “Львівська політехніка”. – 2013. – №24. – С. 144-147.
40. Банхиди, Л. Тепловой микроклимат помещений [Текст] / Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1981. – 241 с.
41. Бураковский, Т. Инфракрасные излучатели [Текст]: [Пер. с польск.] / Т. Бураковский, Е. Гизиньский, А. Саля. – Л.: Энергия, 1978. – 408 с.
42. Борхерт, Р. Техника инфракрасного нагрева [Текст]: [пер. с нем. под ред. И. Б. Левитина] / Р. Борхерт, В. Юбиц. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 278 с.
43. Sattari, S. A parametric study on radiant floor heating system performance / S. Sattari, B. Farhanieh // Renewable Energy. – 2006. – Vol. 31, Issue 10. – P. 1617-1626.
44. Bjarne. W. Olesen. Radiant floor heating in theory and practice / Bjarne W. Olesen // ASHRAE Journal. – 2002. – Vol. 44.7. – P. 19-24.
45. HuJ, R. A review of the application of radiant cooling & heating systems in Mainland China / R. HuJ. L. Niu // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 52. – P. 11-19.
46. Bjarne, W. Olesen. Part 1: History of Radiant Heating & Cooling Systems / Bjarne W. Olesen, Bean R., W. K. Kwang // ASHRAE Journal. – 2010. – Vol. 52.1. – P. 40-47.

47. Rhee, Kyu-Nam. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment / Kyu-Nam Rhee, Kwang Woo Kim // Building and Environment. – 2015. – Vol. 91. – P. 166-190
48. Электрические инфракрасные обогреватели: [Электронный ресурс] // Издание С.О.К.-онлайн – 2007. – №5. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/elektricheskie-infrakrasnye-obogrevateli> (дата обращения 27.09.2017).
49. Сперроу, Э.М. Теплообмен излучением [Текст] / Э.М. Сперроу, Р.Д. Сесс. – М.: Энергия, 1971. – 282 с.
50. Michael F. Modest. Radiative heat transfer [Third edition] / Michael F. Modest. – San Diego: Academic Press, 2013. – 822 P.
51. Зигель, Р. Теплообмен излучением [Текст]: [пер. с англ.] / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М.: Мир, 1975. – 934 с.
52. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. – Л.: Машгиз, 1962. – 456 с.
53. Афонин, А.В. Излучения в инфракрасном диапазоне волн и их измерения [Текст] / А.В. Афонин, А.И. Таджикибаев, В.В. Титков. – Спб.: ПЭИПК, 2007. – 120 с.
54. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
55. Мучник, Г.Ф. Методы теории теплообмена. Тепловое излучение [Текст] / Г.Ф. Мучник, И.Б. Рубашов. – М.: Высшая школа, 1974. – 272 с.
56. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
57. Оцисик, М. Н. Сложный теплообмен [Текст] / М. Н. Оцисик. – М.: Мир, 1976. – 616 с.
58. John H. Lienhard IV. A Heat Transfer Textbook / John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. – Cambridge: Phlogiston Press, 2000. – 696 p.
59. Блох, А. Г. Теплообмен излучением [Текст]: справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

60. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования [Текст] / Е.И. Казанцев. – М.: Metallurgy, 1975. – 368 с.
61. Задоя, Н.И. Электромагнитная безопасность. Учебное пособие [Текст] / Н.И. Задоя. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2014. – 108 с.
62. Wavelength Considerations: [Electronic source] // International Commission on Illumination. URL: https://www.techstreet.com/standards/bs-iso-20473-2007?product_id=1513087 (дата обращения 26.09.2017).
63. Летавет, А.А. Исследования по радиационному теплообмену с окружающей средой [Текст] / А.А. Летавет, А.Е. Малышева // Гигиена и санитария. – М.: Медицина, 1941. – №4. – С. 25-33.
64. Пономарева, Н.К. Основные гигиенические параметры систем лучистого отопления [Текст] / Н.К. Пономарева // Водоснабжение и санитарная техника. – М.: Изд-во ВСТ, 1957. – №8. – С. 19-24.
65. Царюк, Н.Б. Особенности теплообмена детей в условиях высоких температур помещения [Текст] / Н.Б. Царюк // Гигиена и санитария. – М.: Медицина, 1963. – №4. – С.37-41.
66. Гвозденко, Л.А. Обоснование допустимых нормативов облученности инфракрасным излучением в зависимости от его спектрального состава [Текст] / Л.А. Гвозденко // Медицина труда и промышленная экология. – М.: Учреждение РАМН НИИ медицины труда РАМН, 1999. – №12. – С. 13-18.
67. Губернский, Ю.Д. Биологическое действие инфракрасной радиации и гигиеническое нормирование микроклимата при лучистом обогреве жилищ [Текст] / Ю.Д. Губернский // Гигиена и санитария. – М.: Медицина, 1965. – №4. – С. 81-85.
68. Ковалёв, А.Е. Расчет необходимого потока на тело человека при лучистом обогреве [Текст] / А.Е. Ковалёв, В.Н. Шамарин // Гигиена труда и профессиональные заболевания. – М.: 1980. – №7. – С. 6-7.

69. Бычков, В.Я. О влиянии инфракрасного излучения на организм человека и эффективности применения индивидуальных средств защиты [Текст] / В.Я. Бычков // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов: Материалы докладов V международной науч.-практич. конференции. – М.: НИТУ «МИСиС», 2010. – С. 106 - 108.

70. Алексеенко, Е.А. Анализ воздействия инфракрасного излучения с использованием интегрального метода его оценки [Текст] / Е.А. Алексеенко // Оптимизация производственных процессов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. – Вып. 3. – С. 167-171.

71. Ничкова, Л.А. Постановка энергетической задачи по воздействию инфракрасного излучения на биологические объекты с целью дозового нормирования [Текст] / Л.А. Ничкова, А.Г. Лукьянчук, В.Г. Каширцев // Вестн. СевГТУ.Сер. Автоматизация производств, процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2002. – Вып. 36. – С. 207-212.

72. Ничкова, Л.А. Энергетическая оценка потока инфракрасного излучения незащищенного объекта при дозовом нормировании [Текст] / Л.А. Ничкова, А.Г. Лукьянчук, Л.В. Квасова // Вестн. СевГТУ.Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2002 – Вып. 39. – С. 77-82.

73. Ничкова, Л.А. Оценка энергии инфракрасного излучения защищенного объекта от нескольких источников при дозовом нормировании [Текст] / Л.А. Ничкова, Л.В. Квасова, Э.Е. Стрежекуров // Вестник СевГТУ. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2003. – Вып. 48: Механика, энергетика, экология. – С. 159-165.

74. Миллер, К.Л. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения красного и дальнего инфракрасного диапазонов на кровь [Текст] / К.Л. Миллер, И.В. Сергеев, Д.П. Дворецкий // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – Спб: ООО «СП Минимакс», 2011. – №2. – С. 90-94.

75. Рахимов, Р.Х. Дальнее узкоспектральное ИК-излучение - новые возможности в лечении заболеваний: [Электронный ресурс] / Р.Х. Рахимов,

Н.Н. Тихонова // Современные научные исследования и инновации. – 2011. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2011/10/4845> (дата обращения 26.09.2017).

76. Язовцев, В. В. Безопасность систем газового лучистого отопления [Текст] / В.В. Язовцев, В. А. Миридонов, В. А. Вершилович // АВОК. – М.: АВОК - ПРЕСС, 2011. – №1. – с. 64-67.

77. Ардашников, С.Н. Общая курортотерапия [Текст] / С. Н. Ардашников, М. С. Беленький, Л. С. Вишневский. – М.: «Медгиз», 1959. – 500 с.

78. Губернский, Ю.Д. Биологическое действие инфракрасной радиации и гигиеническое нормирование микроклимата при лучистом обогреве жилищ [Текст] / Ю.Д. Губернский // Гигиена и санитария. – М.: Медицина, 1965. – №4. – С.81-85.

79. Рахимов, Р.Х. Дальнее узкоспектральное ИК-излучение - новые возможности в лечении заболеваний: [Электронный ресурс] / Р.Х. Рахимов, Н.Н. Тихонова // Современные научные исследования и инновации. – 2011. – №6. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2011/10/4845> (дата обращения 26.09.2017)

80. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Текст] (чинні з 01.01.2014): – К.: Мінрегіонбуд, 2013. – 232 с.

81. ДБН В.2.2-15-2005. Житлові будинки. Основні положення [Текст] (чинні з 01.01.2006): – К.: Мінрегіонбуд, 2006. – 45 с.

82. ДСТУ-Н Б В.2.5-62:2012. Настанова з проектування та монтажу систем опалення [Текст] (чинні з 01.04.20013): – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 24 с.

83. ДСТУ Б EN 12831. Системи опалення будівель

84. ДСТУ Б EN 15251:2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень [Текст] (чинні з 01.01.2013): – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 71 с.

85. ДСТУ Б EN 15316-1:2011 Системи теплозабезпечення будівель [Текст] (чинні з 01.01.2013): – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 44 с.

86. ДСТУ Б EN 15316-2-1:2011 Системи теплозабезпечення будівель [Текст] (чинні з 01.01.2013): – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 72 с.

87. ДСТУ Б EN 15316-2-3:2011 Системи теплозабезпечення будівель [Текст] (чинні з 01.01.2013): – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 81 с.

88. ГОСТ 12.1.005-88* ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Текст] (дата актуализации текста 01.10.2008): М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 70 с.

89. СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 [Текст] (действует с 16.12.2016): – М.: Минрегион России, 2016 – 67 с.

90. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. [Текст] (действует с 01.03.1999): - М.: ГУП ЦЦП, 1999. – 14 с.

91. СанПиН 2.1.2.1002 Санитарно -эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. [Текст] (действует с 1.07.2001): - М.: Минздрав, 2000. – 13 с.

92. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно- гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. (Изменения №1 20.06.2000). - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 6 с.

93. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных предприятий [Текст] (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 01.10.1996 №21): - М.: Изд-во стандартов, 1997. - 17 с.

94. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. [Текст] (действует с 01.07.2013): – М. Минрегион, 2012. – 139 с.

95. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно- гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. (Изменения №1 20.06.2000). - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 6 с.

96. СанПиН 2.2.4.548-96. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных предприятий [Текст] (утв.

постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 01.10.1996 №21): - М.: Изд-во стандартов, 1997. - 17 с.

97. МУК 4.3.1895-04 Оценка теплового состояния человека с целью обоснования гигиенических требований к микроклимату рабочих мест и мерам профилактики охлаждения и перегревания [Текст] / Методические указания. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 20 с.

98. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика [Текст] / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

99. Табунщиков, Ю.А. Расчёты температурного режима помещения и требуемой мощности для его отопления или охлаждения [Текст] / Ю.А. Табунщиков. – М.: Стройиздат, 1981. – 82 с.

100. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий [Текст] / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-Пресс, 2002. – 194 с.

101. Табунщиков, Ю.А. Расчет теплотерь помещения при раздельном учете конвективного и лучистого теплообмена [Текст] / Ю.А. Табунщиков // АВОК. – 2007. – №8. – С. 64-66.

102. Бродач, М.М. Повышение тепловой эффективности зданий оптимизационными методами [Текст]: автореф. ... дисс. канд. техн. наук: 05.23.03 – Москва, 1998. – 23 с.

103. Бугер, П. Оптический трактат о градации света [Текст] / П. Бугер. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 484 с.

104. EN 12831 Heating systems in buildings - Method for calculation of the design heat load [Text]. – CEN, 2003 – 76 p.

105. EN7730 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria [Text]. – CEN, 2005. – 11 p.

106. EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings - addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics [Text]. – CEN, 2010. – 10 p.

107. Fanger, P.O. Thermal comfort [Text] / P.O. Fanger. – New York: McGraw Hill Book Co, 1973 – 244 p.

108. Критерии теплового комфорта при проектировании систем отопления: [Электронный ресурс]. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4355 (дата обращения 26.09.2017).

109. Беликов, А.С. Влияние микроклимата на безопасность жизнедеятельности [Текст] / А.С. Беликов, И.А. Колесник, И.Л. Ветвицкий, Е.В. Рабич, И.Ф. Зибров // Сборник научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение» – 2015. – Вып. 84. – С. 22-27.

110. Hamilton, D.C. Radiant Interchange Configuration Factors [Text] / D.C. Hamilton, W.R. Morgan. – Washington, D.C.: US Government Printing Office, 1952. – 54 p.

111. Leuenberger, H. Compilation of Radiant Shape Factors for Cylindrical Assemblies [Text] / H. Leuenberger, R. A. Pearson. – ASME Paper, 1956. – 19 p.

112. Kreith, F. Radiation Heat Transfer for Spacecraft and Solar Power Design [Text] / F. Kreith – Scranton: International Textbook Co, 1962. – 236 p.

113. Якоб, М. Вопросы теплопередачи [Текст] / М. Якоб. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 517 с.

114. Эккерт, Э.М. Теория тепло- и массообмена [Текст] : [перевод с английского] / Э.М. Эккерт, Р.М. Дрейк. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961 – 423 с.

115. Крейт, Ф., Блэк У. Основы теплопередачи [Текст] : [перевод. с английского] / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.

116. Поляк, Г.Л. Анализ теплообмена излучением между диффузными поверхностями методом сальдо [Текст] / Г.Л. Поляк // – «Журн. техн. физ.». – 1935. – т. 5, вып. 3. – С. 436.

117. Criffith, P. The Effect of Surface Thermal Properties and Finish on Dropwise Condensation [Text] / P. Criffith, M.S. Lee // Int. J. Heat Mass Transfer – 1967. – Vol. 10, issue 5. – P. 697-707.
118. Nusselt, W. Graphische Bestimmung des Winkelverhältnisses bei der Wärmestrahlung [Text] / W. Nusselt // VDIZ. – 1928. – Vol. 72. – P. 673.
119. Moon, P. Scientific Basic of Illuminating Engineering [Text] / P. Moon. – New York: McGraw-Hill Book Co., 1936. – 608 p.
120. Малявина, Е.Г. Теплотери здания. Справочное пособие [Текст] / Е.Г. Малявина. – М.: АВОК-Пресс, 2007. – 265 с.
121. Рекомендации АВОК Р НП «АВОК» 4.1.6–2009 «Системы отопления с потолочными подвесными излучающими панелями» [Текст] / Рекомендации. – М.: АВОК-Пресс, 2009. – 39 с.
122. Богословский, В.Н. Тепловой режим здания [Текст] / В.Н. Богословский. – М.: Стройиздат., 1979. – 248 с.
123. Сканави, А.Н. Конструирование и расчет водяного и воздушного отопления зданий [Текст]: 2-е изд. – перераб. и доп. / А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1983. – 304 с.
124. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства в трех частях. Часть первая. Отопление, водопровод, канализация [Текст] // под. ред. И.Г. Старовойтова. – М.: Стройиздат, 1975. – 429 с.
125. Латыев, Л.Н. Излучательные свойства материалов [Текст] / Л.Н. Латыев, В.А. Петров, В.Я. Чеховский, Е.Н. Шестаков. – М.: Энергия, 1974. – 470 с.
126. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
127. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс [Текст] : [пер. с англ.] / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
128. Лавров, В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента [Текст] / В.В. Лавров, Н.А., Спирин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

129. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
130. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
131. Сидняев, Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента: учебное пособие [Текст] / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 463 с.
132. Абомелик, Т.П. Методология планирования эксперимента: сборник лабораторных работ [Текст] / Т.П. Абомелик. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 36 с.
133. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] / Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
134. Львовский, Е.Н. Статистические методы построение эмпирических формул: учебное пособие для вузов [Текст] / Е.Н. Львовский. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
135. Энергосбережение в ЖКХ: Учебно-практическое пособие [Текст] / Под ред. Л.В. Примака, Л.Н. Чернышева. – М.: Академический Проект; Альма Матер, 2011. - 622 с.
136. Стомахина, И.Г. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: Жилые здания со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения и стоянками автомобилей. Коттеджи [Текст] / И.Г. Стомахина, И.И. Бобровицкий, Е.Г. Малявина, Л.В. Плотникова. – М.: Пантори, 2003. – 308 с.
137. Матюхин, Л.М. Теплогазоснабжение и вентиляция с основами теплотехники [Текст]: учеб. пособие / Л.М. Матюхин, С.А. Пришвин, Г.Г. Тер-Мкртчян. – М.: МАДИ, 2016. – 136 с.
138. Ананикян, Л.П. Системы лучистого и панельного отопления [Текст] / Л.П. Ананикян. – М.: Профтехиздат, 1962. – 87 с.

139. Свистунов, В.М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства [Текст] учебник для вузов / В.М. Свистунов – Спб.: Политехника, 2001. – 423 с.

140. Тарабаров, М.Б. Особенности напольного водяного панельно-лучистого отопления [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / М.Б. Тарабаров – СПб., 2004 – 128 с.

141. Кирьянов, Д. В. K43 Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. [Текст] / Д.В. Кирьянов – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

142. Бартенев, В.Г., Модернизация отопительной системы спортивно-зрелищного комплекса [Текст] / В.Г. Бартенев, Г.В. Бартенев, М.Ю. Чернов // Энергосбережение. – 2005. – №3. – С. 42-46.

143. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013. Правила определения стоимости строительства [Текст] (чинні з 01.01.2014) – Киев: Минрегион Украины, 2013.

144. Роддатис, К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности [Текст]/ К.Ф. Роддатис, А.Н. Полтарецкий – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488с

145. Указ Главы ДНР от 17.04.2015г. №147 «О тарифах на электроэнергию, которая отпускается населению»: [Электронных ресурс]. URL: <http://gorod-donetsk.com/tarify-zhkkh> (дата обращения 01.02.2018).

Приложение А. Экспериментальные исследования работы системы лучистого отопления в жилом помещении в г. Макеевка.

Таблица А.1 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,07$ и $t_{\text{панели}}=40^{\circ}\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-20,5	-15,9	-11,3	-6,6	-2	3,2	7,3	10,2
2	-21,5	-16,7	-11,9	-7	-2,1	2,8	7,7	10,7
3	-20,2	-15,7	-10,4	-6,5	-2	2,6	7,2	10
4	-21,8	-17	-12,1	-7,1	-2,2	2,8	7,8	10,9
5	-22,3	-16,2	-11,5	-6,8	-2,1	2,1	7,5	10,4
6	-20,2	-15,6	-11,1	-6,5	-2,4	2,6	7,1	10
7	-20,3	-15,7	-11,2	-8	-2	2,6	6,9	10,1
8	-20,7	-16,1	-11,4	-6,7	-2	2,7	7,4	10,3
9	-21,9	-17,1	-12,1	-7,1	-2,2	2,8	8,1	10,9
10	-21,6	-16,8	-11,9	-7	-2,1	2,8	7,7	10,8
11	-22,2	-17,2	-12,2	-7,2	-2,2	2,9	7,9	10,9
12	-19,9	-15,5	-11	-6,5	-2	2,6	7,1	11,1
13	-21,9	-16,9	-12	-7	-2,1	2,3	7,7	10,8
14	-20,5	-15,9	-11,3	-6,6	-2	2,6	7,3	10,2
15	-22,8	-17,7	-12,6	-7,4	-2,2	2,9	8,1	11,4
16	-21,9	-17,1	-12,1	-7,1	-2,2	2,8	7,8	10,9
17	-21,7	-16,9	-13,1	-7	-3,2	2,8	7,6	10,8
18	-21,7	-16,9	-12	-7	-2,8	2,8	7,7	9,9
19	-20,5	-16	-11,3	-6,7	-1,7	2,6	7,3	10,2
20	-20,4	-15,8	-11,3	-6,6	-2	2,6	6,7	10,2
21	-21,5	-16,7	-11,8	-7	-2,1	2,8	7,6	10,7
22	-21,2	-16,5	-11,7	-6,9	-2,1	3,3	7,6	10,6
23	-20,4	-15,8	-10,5	-6,6	-2	2,6	7,3	9,9
24	-21,3	-16,6	-11,8	-6,9	-2,1	2,7	7,6	10,6
25	-20,8	-16,2	-11,5	-6,8	-2,1	2,7	7,1	10,4

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
26	-21,1	-16,4	-11,7	-7,4	-2,1	2,7	7,5	10,5
27	-21,8	-16	-11,3	-6,7	-2	2,6	7,3	11
28	-20,5	-15,9	-12,2	-6,6	-2	2,6	7,3	10,2
29	-20,5	-16,7	-11,8	-7	-2,1	2,8	7,7	10,7
30	-21,5	-15,5	-11,9	-7	-2,1	2,4	7,7	10,7

Таблица А.2 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	-21,17	-16,37	-11,67	-6,91	-2,14	2,7	7,49	10,53
D_{cp}	16,523	10,067	9,247	3,067	2,052	1,49	3,155	4,367
S^2	0,5508	0,3356	0,3082	0,1022	0,0684	0,0497	0,1052	0,1456
S	0,7422	0,5793	0,5552	0,3197	0,2615	0,2229	0,3243	0,3816
$\bar{x} - \varepsilon$	-21,44	-16,58	-11,87	-7,02	-2,23	2,62	7,37	10,39
$\bar{x} + \varepsilon$	-20,9	-16,16	-11,47	-6,8	-2,05	2,78	7,61	10,67

Таблица А.3 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,07$ и $t_{панели}=60^{\circ}\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-18,7	-14,8	-9,4	-4,8	0,1	4,5	9,2	12
2	-19,7	-14,8	-9,9	-5	0,2	4,8	9,6	12,6
3	-18,4	-13,8	-9,3	-4,7	0	4,5	9	11,8
4	-20	-15	-10	-5,1	-0,1	4,8	9,8	12,8
5	-19,1	-14,4	-9,6	-4,9	-0,1	4,6	9,3	12,2
6	-18,3	-13,8	-9,2	-4,7	-0,2	4,4	9	11,8
7	-18,5	-13,9	-9,3	-4,7	-0,1	4,5	9,1	11,9
8	-18,9	-14,2	-9,5	-4,8	0,1	4,6	9,3	12,1
9	-20,1	-14,1	-10,1	-5,1	-0,2	4,8	9,8	12,9
10	-19,8	-14,9	-9,9	-5	-0,1	4,8	9,7	12,7
11	-20,3	-15,2	-10,2	-5,2	-0,3	4,9	9,9	13

Продолжение таблицы А.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	-18,2	-13,7	-9,1	-4,6	-0,2	4,4	8,9	11,7
13	-19,9	-14,9	-10	-5,1	0,1	4,8	9,7	12,7
14	-18,7	-14,1	-9,4	-4,8	-0,2	4,5	9,1	12
15	-20,8	-15,7	-10,5	-5,3	-0,3	5	10,2	13,4
16	-20,1	-15,1	-10,1	-5,1	-0,1	4,8	9,8	12,9
17	-19,9	-14,9	-10	-5,1	-0,3	4,8	9,7	12,7
18	-19,9	-14,9	-10	-5,1	-0,3	4,8	9,7	12,7
19	-18,8	-14,1	-9,4	-4,8	-0,1	4,5	9,2	12
20	-18,6	-14,4	-9,4	-4,8	-0,2	4,5	9,1	11,9
21	-19,6	-14,7	-9,9	-5	-0,1	4,7	9,6	12,6
22	-19,4	-14,6	-9,7	-4,9	-0,2	4,7	9,5	12,4
23	-18,6	-13,9	-9,4	-4,7	-0,1	4,5	9,1	11,9
24	-19,5	-14,6	-9,8	-5	0	4,7	9,5	12,5
25	-19,1	-14,3	-9,6	-4,9	-0,1	4,6	9,3	12,2
26	-19,3	-14,5	-9,7	-4,9	-0,3	4,7	9,4	12,4
27	-18,8	-14,2	-9,4	-4,8	-0,3	4,5	9,2	12
28	-18,7	-14	-9,4	-4,8	0	4,5	9,1	12
29	-19,6	-14,7	-9,9	-5	-0,2	4,7	9,6	12,6
30	-19,7	-13,8	-9,9	-5	-0,3	4,8	9,6	12,6

Таблица А.4 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	-19,3	-14,47	-9,7	-4,92	-0,13	4,66	9,43	12,37
D_{cp}	13,36	7,227	3,4	0,854	0,563	0,734	3,047	5,447
S^2	0,4453	0,2409	0,1133	0,0285	0,0188	0,0245	0,1016	0,1816
S	0,6673	0,4908	0,3366	0,1688	0,1371	0,1565	0,3187	0,4261
$\bar{x} - \varepsilon$	-19,54	-14,65	-9,82	-4,98	-0,18	4,6	9,32	12,22
$\bar{x} + \varepsilon$	-19,06	-14,29	-9,58	-4,86	-0,08	4,72	9,54	12,52

Таблица А.5 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,07$ и $t_{\text{панели}}=80^{\circ}\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-16,6	-11,9	-7,4	-2,7	1,5	6,5	11,1	14,1
2	-17,4	-12,5	-7,8	-2,9	1,9	6,8	11,7	14,8
3	-16,3	-11,7	-7,3	-2,7	1,8	6,4	10,9	13,9
4	-17,7	-12,7	-7,9	-2,9	2	6,9	11,9	15
5	-16,9	-12,2	-7,5	-2,8	1,9	6,6	11,3	14,4
6	-16,2	-11,7	-7,2	-3	1,8	6,3	10,9	13,8
7	-16,4	-11,8	-7,3	-2,7	1,4	6,4	11	13,9
8	-16,8	-12,1	-7,4	-2,7	1,5	6,5	11,2	14,2
9	-17,8	-12,8	-7,9	-2,9	2	6,9	11,9	15,1
10	-17,5	-12,6	-7,8	-2,9	1,9	6,8	11,7	14,9
11	-18	-12,9	-8	-2,9	2	7	12	15,3
12	-16,1	-11,6	-7,2	-2,6	1,7	6,3	10,8	13,7
13	-17,6	-12,7	-7,8	-2,9	2,1	6,9	11,8	14,9
14	-16,6	-11,9	-7,4	-2,7	1,8	6,5	11,1	14,1
15	-18,5	-13,3	-8,2	-3	2,1	7,2	12,4	15,7
16	-17,8	-12,8	-7,9	-2,9	1,4	6,9	11,9	15,1
17	-17,6	-12,7	-7,8	-2,9	2	6,9	11,8	14,9
18	-17,6	-12,7	-7,8	-2,3	2	6,9	11,8	14,9
19	-16,6	-12	-7,4	-2,7	1,8	6,5	11,1	14,1
20	-16,5	-11,9	-7,3	-2,7	2,1	6,5	11,1	14
21	-17,4	-12,5	-7,7	-2,8	1,9	6,8	11,6	14,8
22	-17,2	-12,4	-7,6	-2,8	1,9	6,7	11,5	14,6
23	-16,5	-11,9	-7,3	-2,7	2,1	6,4	11	14
24	-17,3	-12,4	-7,7	-2,4	1,9	6,9	11,6	14,7
25	-16,9	-12,2	-7,5	-2,8	1,9	6,6	11,3	14,3
26	-17,1	-12,3	-7,6	-2,8	1,9	6,2	11,5	14,5
27	-16,6	-12	-7,4	-2,7	1,8	6,5	11,1	14,1
28	-16,5	-11,9	-7,3	-2,5	1,7	6,5	11,1	14

Продолжение таблицы А.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
29	-17,4	-12,5	-7,7	-2,8	1,9	6,8	11,6	14,8
30	-17,5	-12,6	-7,8	-2,9	1,4	7	11,7	14,8

Таблица А.6 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	-17,1	-12,31	-7,6	-2,77	1,84	6,67	11,45	14,51
D_{cp}	10,69	5,319	2,05	0,767	1,29	1,863	4,715	7,475
S^2	0,3563	0,1773	0,0683	0,0256	0,043	0,0621	0,1572	0,2492
S	0,5969	0,4211	0,2613	0,16	0,2074	0,2492	0,3965	0,4992
$\bar{x} - \varepsilon$	-17,31	-12,46	-7,69	-2,83	1,77	6,58	11,31	14,33
$\bar{x} + \varepsilon$	-16,89	-12,16	-7,51	-2,71	1,91	6,76	11,59	14,69

Таблица А.7 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,235$ и $t_{панели}=40^{\circ}\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-13,2	-9,1	-4,9	-1,2	4	7,2	11,3	13,8
2	-13,9	-9,6	-5,2	-0,7	3,3	7,6	11,9	14,5
3	-13	-9	-5,3	-0,6	3	7,1	11,2	13,6
4	-14,1	-9,7	-4,7	-0,9	3,3	7,7	12,1	14,7
5	-13,5	-9,3	-5	-0,8	3,2	7,3	11,6	14,1
6	-12,9	-8,9	-4,8	-1	3	7	11,1	13,5
7	-13,1	-9	-4,9	-0,9	3,1	7,1	11,2	13,6
8	-13,3	-9,2	-5	-0,8	3,1	7,3	11,5	13,9
9	-14,2	-9,8	-5,3	-0,6	3,3	7,7	12,2	14,8
10	-14	-9,6	-5,2	-1	3,3	7,6	12	14,6
11	-14,3	-9,9	-5,4	-0,9	3,4	7,8	12,3	14,9
12	-12,8	-8,9	-4,8	-0,7	3	7	11	13,4
13	-14	-9,7	-5,2	-1	3,3	7,6	12	14,6
14	-13,2	-9,1	-4,9	-0,9	3,1	7,2	11,3	13,8

Продолжение таблицы А.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	-14,7	-10,2	-5,5	-0,9	3,4	8	12,6	15,3
16	-14,2	-9,8	-5,3	-0,9	3,3	7,7	12,2	14,8
17	-14	-9,7	-5,5	-0,6	3,3	7,6	12,1	14,6
18	-14	-9,7	-5,3	-0,8	3,3	7,6	12,1	14,6
19	-13,3	-9,1	-5	-1,1	3,1	7,2	11,4	13,8
20	-13,2	-9,1	-4,9	-0,8	3,1	7,2	11,3	13,7
21	-13,9	-9,6	-5,2	-0,3	3,2	7,5	11,9	14,4
22	-13,7	-9,4	-5,1	-1	3,2	7,5	11,8	14,3
23	-13,1	-9,1	-4,9	-0,9	3,5	7,2	11,3	13,7
24	-13,8	-9,5	-5,2	-0,8	3,2	7,5	11,8	14,3
25	-13,5	-9,3	-5	-0,8	3,2	8	11,6	14
26	-13,6	-9,4	-4,4	-1,2	3,2	7,4	11,7	14,2
27	-13,3	-9,1	-5	-0,7	3,5	7,2	11,4	13,8
28	-13,2	-9,1	-4,9	-0,9	4	7,2	11,3	13,7
29	-13,9	-9,6	-5,2	-0,8	3,2	7,5	11,9	14,4
30	-13,9	-9,6	-5,2	-0,4	3,3	7,1	11,9	13,2

Таблица А.8 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	-13,63	-9,4	-5,07	-0,83	3,28	7,42	11,7	14,15
D_{cp}	6,619	3,29	1,739	1,183	1,608	2,268	4,9	7,815
S^2	0,2206	0,1097	0,058	0,0394	0,0536	0,0756	0,1633	0,2605
S	0,4697	0,3312	0,2408	0,1985	0,2315	0,275	0,4041	0,5104
$\bar{x} - \varepsilon$	-13,8	-9,52	-5,16	-0,9	3,2	7,32	11,56	13,97
$\bar{x} + \varepsilon$	-13,46	-9,28	-4,98	-0,76	3,36	7,52	11,84	14,33

Таблица А.9 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,235$ и $t_{\text{панели}}=60^{\circ}\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-7,8	-3,7	0,7	4,4	8,5	12,5	16,5	19,1
2	-8,2	-3,9	0,6	4,7	8,9	13,2	17,7	20,1
3	-7,7	-3,6	0,5	4,4	8,3	12,3	16,5	18,8
4	-8,3	-3,9	0,5	4,7	9	13,4	17,8	20,3
5	-8	-3,8	0,7	4,5	8,7	12,8	17,1	19,5
6	-7,6	-3,6	0,7	4,3	8,3	12,3	16,4	18,7
7	-7,7	-3,7	0,5	4,4	8,4	12,4	16,5	18,9
8	-7,9	-3,7	0,5	4,5	8,6	12,7	16,6	19,3
9	-8,4	-4	0,5	4,8	9,1	13,4	18,3	20,4
10	-8,3	-3,9	0,3	4,7	9	13,2	17,7	20,2
11	-8,5	-4	0,5	4,8	9,2	13,6	18,1	20,7
12	-7,6	-3,6	0,6	4,3	8,2	12,2	16,4	18,5
13	-8,3	-3,9	0,5	4,7	9	13,3	17,9	20,2
14	-7,8	-3,7	0,5	4,4	8,5	12,5	16,7	19,1
15	-8,7	-4,1	0,5	4,9	9,4	13,9	18,6	21,2
16	-8,4	-4	0,5	4,8	9,1	13,4	17,9	20,4
17	-8,3	-3,9	0,6	4,7	9	13,3	17,7	20,2
18	-8,3	-3,9	0,7	4,7	9	13,3	17,9	20,2
19	-7,8	-3,7	0,5	4,4	8,5	12,6	16,8	19,1
20	-7,8	-3,7	0,6	4,4	8,4	12,5	16,6	19
21	-8,2	-3,9	0,6	4,6	8,9	13,1	17,5	20
22	-8,1	-3,8	0,6	4,6	8,8	13	17,3	19,8
23	-7,8	-3,7	0,6	4,4	8,4	12,5	16,6	19
24	-8,1	-3,8	0,3	4,6	8,8	13	17,6	19,9
25	-8	-3,8	0,5	4,5	8,6	12,8	17	19,4
26	-8,1	-3,8	0,5	4,6	8,7	12,9	17,2	19,7
27	-7,8	-4	0,5	4,4	8,5	12,6	16,9	19,1
28	-7,8	-3,7	0,5	4,4	8,5	12,5	16,7	19

Продолжение таблицы А.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
29	-8,2	-3,9	0,5	4,6	8,9	13,1	17,5	20
30	-8,2	-3,9	0,8	4,7	8,9	13,2	17,6	20,1

Таблица А.10 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	-8,06	-3,82	0,55	4,56	8,74	12,92	17,25	19,66
D_{cp}	2,394	0,528	0,335	0,81	2,71	5,582	11,615	13,19
S^2	0,0798	0,0176	0,0112	0,027	0,0903	0,1861	0,3872	0,4397
S	0,2825	0,1327	0,1058	0,1643	0,3005	0,4314	0,6223	0,6631
$\bar{x} - \varepsilon$	-8,16	-3,87	0,51	4,5	8,63	12,77	17,03	19,42
$\bar{x} + \varepsilon$	-7,96	-3,77	0,59	4,62	8,85	13,07	17,47	19,9

Таблица А.11 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,235$ и $t_{панели}=80^{\circ}\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-3	2,2	5,7	9,8	14	17,9	21,9	24,3
2	-2,6	1,7	6	10,3	14,7	18,9	23,1	25,5
3	-2,4	1,6	5,6	9,6	13,8	17,7	21,6	23,9
4	-2,6	1,8	6,1	10,5	14,9	19,1	23,4	25,9
5	-2,5	1,7	5,8	10	14,3	18,3	22,4	24,8
6	-2,4	1,6	5,6	9,6	13,7	17,6	21,5	23,8
7	-2,4	1,6	5,6	9,7	13,8	17,8	21,7	24
8	-2,5	1,7	5,7	9,9	14,1	18,1	22,1	24,5
9	-2,6	1,9	6,1	10,5	15	19,2	23,5	26
10	-2,6	1,7	6	10,4	14,8	19	23,2	25,6
11	-2,6	1,8	6,2	10,6	15,1	19,4	23,8	26,3
12	-2,4	1,6	5,5	9,5	13,6	17,4	21,3	23,6
13	-2,6	1,7	6	10,4	14,8	19	23,3	25,7
14	-2,4	1,6	5,7	9,8	14	17,9	21,9	24,2

Продолжение таблицы А.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	-2,7	2	6,3	10,9	15,6	20	24,4	27
16	-2,2	1,8	6,1	10,5	15	19,2	23,5	26
17	-2,6	1,8	6	10,4	14,8	19,1	23,3	25,8
18	-2,6	1,8	6	10,4	14,8	19,1	23,3	25,8
19	-2,4	1,7	5,7	9,8	14	18	22	24,3
20	-2,4	1,6	5,7	9,8	13,9	17,9	21,8	24,2
21	-2,6	1,8	6	10,3	14,6	18,8	23	25,4
22	-2,5	1,7	5,9	10,2	14,5	18,6	22,7	25,1
23	-2,4	1,6	5,7	9,7	13,9	17,9	21,8	24,1
24	-2,5	1,7	5,4	10,2	14,5	18,7	22,8	25,3
25	-2,5	1,7	5,8	10	14,2	18,3	22,3	24,7
26	-2,7	1,7	5,9	10,1	14,4	18,5	22,6	25
27	-2,4	1,7	5,7	9,8	14	18	22	24,3
28	-2,4	1,6	5,7	9,8	13,9	17,9	21,9	24,2
29	-2,6	1,7	6	10,3	14,6	18,8	23	25,4
30	-2,6	1,9	6	10,3	14,7	18,9	23,1	25,5

Таблица А.12 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	-2,52	1,73	5,85	10,1	14,4	18,5	22,61	25,01
D_{cp}	0,614	0,527	1,395	3,69	7,2	11,86	18,199	21,739
S^2	0,0205	0,0176	0,0465	0,123	0,24	0,3953	0,6066	0,7246
S	0,1432	0,1327	0,2156	0,3507	0,4899	0,6287	0,7788	0,8512
$\bar{x} - \varepsilon$	-2,57	1,68	5,77	9,97	14,22	18,28	22,33	24,71
$\bar{x} + \varepsilon$	-2,47	1,78	5,93	10,23	14,58	18,72	22,89	25,31

Таблица А.13 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,4$ и $t_{панели}=40^{\circ}\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-5,6	-2,7	1,7	4,8	8,4	11,9	15,5	19,3

Продолжение таблицы А.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	-5,9	-2,2	1,4	5,1	8,8	12,5	16,3	18,2
3	-5,5	-2,1	1,3	4,8	8,2	11,7	15,3	17,1
4	-6	-2,3	1,5	5,2	8,9	12,6	16,5	18,5
5	-5,7	-2,2	1,1	4,9	8,5	12,1	15,8	17,7
6	-5,5	-2,1	1,3	4,7	8,2	11,6	15,2	17
7	-5,6	-2,1	1,3	4,8	8,3	11,7	15,3	17,1
8	-5,7	-2,1	1,4	4,4	8,4	12	15,7	17,5
9	-6	-2,3	1,5	5,2	9	12,7	16,6	18,6
10	-5,9	-2,2	1,4	5,1	8,8	12,5	16,4	18,3
11	-6,1	-2,3	1,5	5,2	9	12,8	16,8	18,8
12	-5,5	-2,1	1,3	4,7	8,1	11,5	15,1	16,8
13	-6	-2,3	1,4	5,1	8,9	12,6	16,4	18,4
14	-5,6	-2,1	1,4	4,8	8,3	11,8	15,5	17,3
15	-6,3	-2,4	1,5	5,4	9,3	13,2	17,2	19,3
16	-6	-2,3	1,5	4,3	9	12,7	16,6	18,6
17	-6	-2,3	1,4	5,1	8,9	12,6	16,4	19,3
18	-6	-2,3	1,5	5,1	8,9	12,6	16,4	18,4
19	-5,6	-2,7	1,4	4,8	8,4	11,9	15,5	17,4
20	-5,6	-2,1	1,2	4,8	8,3	11,8	15,4	17,3
21	-5,9	-2,2	1,4	5,1	8,8	12,4	16,2	18,2
22	-6,3	-2,2	1,4	5	8,7	12,3	16	17,9
23	-5,6	-2,1	1,4	4,8	8,3	11,8	15,4	17,2
24	-5,9	-2,2	1,4	5	8,7	12,3	16,1	18
25	-5,7	-2,2	1,5	4,9	8,5	12,1	15,8	17,6
26	-5,8	-2,2	1,4	5	8,6	12,2	16	17,9
27	-5,6	-2,1	1,3	4,8	8,4	11,9	15,5	17,4
28	-5,6	-2,1	1,4	4,8	8,3	11,8	15,4	17,3
29	-5,9	-2,2	1,6	5,1	8,8	12,4	16,2	18,2
30	-5,9	-2,2	1,7	5,1	8,8	12,5	16,3	17,1

Таблица А.14 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	-5,81	-2,23	1,42	4,93	8,62	12,22	15,96	17,92
D_{cp}	1,507	0,683	0,462	1,623	2,742	5,182	8,592	15,254
S^2	0,0502	0,0228	0,0154	0,0541	0,0914	0,1727	0,2864	0,5085
S	0,2241	0,151	0,1241	0,2326	0,3023	0,4156	0,5352	0,7131
$\bar{x} - \varepsilon$	-5,89	-2,28	1,38	4,85	8,51	12,07	15,77	17,66
$\bar{x} + \varepsilon$	-5,73	-2,18	1,46	5,01	8,73	12,37	16,15	18,18

Таблица А.15 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,4$ и $t_{панели}=60^\circ\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3,1	6,5	10	13,4	17	20,5	24	26,3
2	3,3	6,9	10,5	14,3	17,9	21,5	25,2	27,6
3	3	6,4	9,9	13,4	16,8	20,2	23,6	25,9
4	3,3	7	10,7	14,5	18,2	21,8	25,6	28
5	3,2	6,7	10,2	13,9	17,4	20,9	24,5	26,8
6	3	6,4	9,8	13,3	16,7	20	23,5	25,7
7	3,1	6,5	9,9	13,5	16,8	20,3	23,8	26
8	3,1	6,6	10,1	13,7	17,2	20,7	24,3	26,6
9	3,3	7	10,7	14,6	18,2	21,9	25,7	28,2
10	3,3	6,9	10,6	14,4	18	19,8	25,4	27,8
11	3,4	7,1	10,9	14,7	18,4	22,2	26	28,5
12	3	6,4	9,7	13,2	16,5	19,9	23,3	25,6
13	3,3	6,9	10,6	14,4	18	21,7	25,5	27,9
14	3,1	6,5	10	13,6	17	20,4	24	26,3
15	3,4	7,3	11,2	15,1	18,9	22,8	26,7	29,3
16	3,3	7	10,7	14,6	18,2	21,9	25,7	28,2
17	3,3	7	10,6	14,4	18,1	21,7	25,5	27,9
18	3,3	7	10,6	14,4	18,1	21,7	25,5	27,9
19	3,1	6,6	10,1	13,6	17,1	20,5	24,1	26,4

Продолжение таблицы А.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	3,1	6,5	10	13,5	16,9	20,4	23,9	26,2
21	3,2	6,9	10,5	14,3	17,8	21,5	25,2	27,6
22	3,2	6,8	10,4	14,1	17,6	21,2	24,9	27,2
23	3,1	6,5	10	13,5	16,9	20,4	23,9	26,2
24	3,2	6,8	10,4	14,2	17,7	21,3	25	27,4
25	3,2	6,7	10,2	13,9	17,3	20,8	24,5	26,8
26	3,2	6,8	10,3	14	17,5	21,1	24,8	27,1
27	3,1	6,6	10,1	13,6	17,1	20,5	24,1	26,4
28	3,1	6,5	10	13,6	17	20,4	23,9	26,2
29	3,2	6,9	10,5	14,3	17,8	21,5	25,2	27,6
30	4,2	6,9	10,5	13,2	17,9	21,5	25,3	27,7

Таблица А.16 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	3,22	6,75	10,32	13,97	17,53	21,03	24,75	27,11
D_{cp}	1,354	1,695	3,694	7,599	10,527	16,627	21,355	25,627
S^2	0,0451	0,0565	0,1231	0,2533	0,3509	0,5542	0,7118	0,8542
S	0,2124	0,2377	0,3509	0,5033	0,5924	0,7444	0,8437	0,9242
$\bar{x} - \varepsilon$	3,14	6,66	10,19	13,79	17,32	20,76	24,45	26,78
$\bar{x} + \varepsilon$	3,3	6,84	10,45	14,15	17,74	21,3	25,05	27,44

Таблица А.17 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения при $\varphi=0,4$ и $t_{панели}=80^{\circ}\text{C}$.

№ опыта	Температура наружного воздуха							
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	12	15,4	18,9	22,4	26	29,3	32,6	34,5
2	12,6	16,2	19,8	23,6	27,3	30,8	34,3	36,3
3	11,8	15,2	18,6	22,1	25,6	28,8	32,1	34
4	12,8	16,4	20,1	23,9	27,7	31,3	34,8	36,8
5	12,3	15,7	19,3	22,9	26,5	29,9	33,3	35,2

Продолжение таблицы А.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	11,8	15,1	18,5	22	25,5	28,7	31,9	33,8
7	11,9	17,1	18,7	22,2	25,7	29	32,3	34,2
8	12,1	15,6	19,1	22,7	26,3	29,6	32,9	34,9
9	12,9	16,5	20,2	24	27,9	31,4	34,9	37
10	12,7	16,3	19,9	23,7	27,5	31	34,4	36,5
11	13	16,7	20,4	24,3	28,2	31,7	35,3	37,4
12	11,7	15	18,3	21,8	25,3	28,5	31,7	33,6
13	12,7	16,3	20	23,8	27,6	31,1	34,6	36,6
14	12	15,4	18,8	22,4	26	29,3	32,6	34,5
15	13,4	17,1	21	25	28,9	32,6	36,3	38,4
16	12,9	16,5	20,2	24	27,9	31,4	34,9	37
17	12,8	16,3	20	23,8	27,6	31,1	34,6	36,7
18	12,8	16,3	20	23,8	27,6	31,1	34,6	36,7
19	12	15,4	18,9	22,5	26,1	29,4	32,7	34,6
20	12	15,3	18,8	22,3	25,9	29,2	32,5	34,4
21	12,6	16,1	19,8	23,5	27,3	30,7	34,2	36,2
22	12,4	15,9	19,5	23,2	26,9	30,4	33,8	35,8
23	11,9	15,3	18,8	22,3	25,9	29,1	32,4	34,4
24	12,5	16	19,6	23,4	27,1	30,5	33,9	36
25	12,2	15,7	19,2	22,8	26,5	29,8	33,2	35,2
26	12,4	15,9	19,5	23,1	26,8	30,2	33,6	35,6
27	12	15,4	18,9	22,5	26,1	29,4	32,7	34,6
28	12	15,3	18,8	22,4	25,9	29,2	32,5	34,4
29	12,6	16,1	19,8	23,5	27,3	30,7	34,2	36,2
30	12,6	16,2	19,9	23,6	27,4	30,8	34,3	36,3

Таблица А.18 Расчет доверительного интервала для температуры внутренней поверхности

\bar{x}	12,38	15,92	19,44	23,12	26,81	30,2	33,6	35,59
D_{cp}	5,488	9,574	12,874	18,522	24,927	31,78	39,13	43,879
S^2	0,1829	0,3191	0,4291	0,6174	0,8309	1,0593	1,3043	1,4626
S	0,4277	0,5649	0,6551	0,7857	0,9115	1,0292	1,1421	1,2094
$\bar{x} - \varepsilon$	12,23	15,72	19,21	22,84	26,48	29,83	33,19	35,16
$\bar{x} + \varepsilon$	12,53	16,12	19,67	23,4	27,14	30,57	34,01	36,02

Приложение Б. Экспериментальные исследования температуры внутреннего воздуха при лучистом отоплении в жилом помещении в г. Макеевка.

Таблица Б.1 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения и внутреннего воздуха при $\phi=0,07$ и $t_{\text{панели}}=40^{\circ}\text{C}$

Номер опыта	Результаты замеров													
	При $t_{\text{н}}=-25$		При $t_{\text{н}}=-20$		При $t_{\text{н}}=-15$		При $t_{\text{н}}=-10$		При $t_{\text{н}}=-5$		При $t_{\text{н}}=0$		При $t_{\text{н}}=+5$	
	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-20,5	-20,2	-15,9	-15,7	-11,3	-11,2	-6,6	-6,5	-2	-1,9	3,2	3,1	7,3	7,2
2	-21,5	-21,6	-16,7	-16,8	-11,9	-12	-7	-7	-2,1	-2,1	2,8	2,8	7,7	7,8
3	-20,2	-20,1	-15,7	-15,6	-10,4	-10,3	-6,5	-6,5	-2	-1,9	2,6	2,6	7,2	7,2
4	-21,8	-21,8	-17	-16,9	-12,1	-12	-7,1	-7,1	-2,2	-2,1	2,8	2,8	7,8	7,8
5	-22,3	-22,2	-16,2	-16,2	-11,5	-11,5	-6,8	-6,8	-2,1	-2	2,1	2,2	7,5	7,5
6	-20,2	-20,1	-15,6	-15,5	-11,1	-11	-6,5	-6,5	-2,4	-2,3	2,6	2,6	7,1	7,2
7	-20,3	-20,2	-15,7	-15,7	-11,2	-11,2	-8	-7,9	-2	-1,9	2,6	2,6	6,9	6,9
8	-20,7	-20,3	-16,1	-15,7	-11,4	-11,2	-6,7	-6,6	-2	-1,9	2,7	2,6	7,4	7,3
9	-21,9	-21,8	-17,1	-17,3	-12,1	-12,3	-7,1	-7,2	-2,2	-2,1	2,8	2,9	8,1	8
10	-21,6	-21,5	-16,8	-16,8	-11,9	-11,9	-7	-7	-2,1	-2,1	2,8	2,8	7,7	7,7
11	-22,2	-22,1	-17,2	-17,2	-12,2	-12,2	-7,2	-7,2	-2,2	-2,1	2,9	2,8	7,9	7,9
													10,9	10,9
													16	17
													10,2	10,1
													10,7	10,8
													10	10
													10,9	10,8
													10,4	10,4
													10	9,9
													10,1	10,1
													10,3	10,1
													10,9	11,1
													10,8	10,7
													10,9	11

Продолжение таблицы Б.1

12	-19,9	-19,8	-15,5	-15,6	-11	-11,1	-6,5	-6,5	-2	-1,9	2,6	2,6	7,1	7,2	11,1	11,2
13	-21,9	-21,9	-16,9	-17	-12	-12,1	-7	-7,1	-2,1	-2,1	2,3	2,3	7,7	7,8	10,8	10,9
14	-20,5	-20,4	-15,9	-15,8	-11,3	-11,3	-6,6	-6,6	-2	-1,9	2,6	2,6	7,3	7,3	10,2	10,1
15	-22,8	-22,7	-17,7	-17,7	-12,6	-12,5	-7,4	-7,4	-2,2	-2,2	2,9	2,9	8,1	8,1	11,4	11,3
16	-21,9	-21,8	-17,1	-17	-12,1	-12,1	-7,1	-7,1	-2,2	-2,1	2,8	2,8	7,8	7,8	10,9	10,9
17	-21,7	-21,6	-16,9	-16,8	-13,1	-13	-7	-7	-3,2	-3,1	2,8	2,8	7,6	7,6	10,8	10,8
18	-21,7	-21,7	-16,9	-17	-12	-12,1	-7	-7,1	-2,8	-2,8	2,8	2,8	7,7	7,8	9,9	9,9
19	-20,5	-20,5	-16	-15,9	-11,3	-11,3	-6,7	-6,6	-1,7	-1,6	2,6	2,6	7,3	7,3	10,2	10,2
20	-20,4	-20,3	-15,8	-15,8	-11,3	-11,2	-6,6	-6,6	-2	-1,9	2,6	2,6	6,7	6,7	10,2	10,1
21	-21,5	-21,5	-16,7	-16,6	-11,8	-11,8	-7	-6,9	-2,1	-2	2,8	2,8	7,6	7,7	10,7	10,6
22	-21,2	-21,1	-16,5	-16,4	-11,7	-11,7	-6,9	-6,9	-2,1	-2	3,3	3,2	7,6	7,6	10,6	10,5
23	-20,4	-20,4	-15,8	-15,8	-10,5	-10,6	-6,6	-6,6	-2	-1,9	2,6	2,6	7,3	7,3	9,9	9,8
24	-21,3	-21,5	-16,6	-16,7	-11,8	-11,9	-6,9	-7	-2,1	-2	2,7	2,8	7,6	7,7	10,6	10,7
25	-20,8	-20,7	-16,2	-16,2	-11,5	-11,5	-6,8	-6,7	-2,1	-2	2,7	2,7	7,1	7,1	10,4	10,3
26	-21,1	-21,1	-16,4	-16,4	-11,7	-11,6	-7,4	-7,4	-2,1	-2	2,7	2,7	7,5	7,5	10,5	10,5
27	-21,8	-21,6	-16	-16,1	-11,3	-11,4	-6,7	-6,7	-2	-2	2,6	2,7	7,3	7,4	11	11,1
28	-20,5	-20,4	-15,9	-15,8	-12,2	-12,3	-6,6	-6,6	-2	-1,9	2,6	2,6	7,3	7,3	10,2	10,1
29	-20,5	-20,4	-16,7	-16,6	-11,8	-11,8	-7	-6,9	-2,1	-2	2,8	2,8	7,7	7,7	10,7	10,6
30	-21,5	-21,6	-15,5	-15,5	-11,9	-11,9	-7	-7	-2,1	-2	2,4	2,5	7,7	7,7	10,7	10,7

Таблица Б.2 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения и внутреннего воздуха при $\varphi=0,07$ и $t_{\text{панели}}=60^{\circ}\text{C}$

Номер опыта	Результаты замеров															
	При $t_{\text{н}}=-25$		При $t_{\text{н}}=-20$		При $t_{\text{н}}=-15$		При $t_{\text{н}}=-10$		При $t_{\text{н}}=-5$		При $t_{\text{н}}=0$		При $t_{\text{н}}=+5$		При $t_{\text{н}}=+8$	
	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	-18,7	-18,5	-14,8	-14,9	-9,4	-9,4	-4,8	-4,7	0,1	0,1	4,5	4,4	9,2	9,1	12	12
2	-19,7	-19,8	-14,8	-15	-9,9	-10,1	-5	-5	0,2	0	4,8	4,8	9,6	9,8	12,6	12,8
3	-18,4	-18,4	-13,8	-13,9	-9,3	-9,3	-4,7	-4,7	0	-0,1	4,5	4,4	9	9,1	11,8	11,9
4	-20	-19,9	-15	-15	-10	-10,1	-5,1	-5,1	-0,1	0	4,8	4,8	9,8	9,9	12,8	12,9
5	-19,1	-19	-14,4	-14,4	-9,6	-9,7	-4,9	-4,9	-0,1	-0,1	4,6	4,6	9,3	9,4	12,2	12,3
6	-18,3	-18,3	-13,8	-13,8	-9,2	-9,3	-4,7	-4,7	-0,2	-0,3	4,4	4,4	9	9,1	11,8	11,8
7	-18,5	-18,5	-13,9	-13,9	-9,3	-9,4	-4,7	-4,7	-0,1	-0,1	4,5	4,4	9,1	9,1	11,9	12
8	-18,9	-18,5	-14,2	-14	-9,5	-9,4	-4,8	-4,7	0,1	0,2	4,6	4,5	9,3	9,2	12,1	12
9	-20,1	-20,4	-14,1	-14,1	-10,1	-10,3	-5,1	-5,2	-0,2	-0,3	4,8	4,9	9,8	10,1	12,9	13,2
10	-19,8	-19,7	-14,9	-14,9	-9,9	-10	-5	-5	-0,1	-0,1	4,8	4,7	9,7	9,8	12,7	12,8
11	-20,3	-20,2	-15,2	-15,3	-10,2	-10,3	-5,2	-5,1	-0,3	-0,2	4,9	4,9	9,9	10	13	13,1
12	-18,2	-18,3	-13,7	-13,8	-9,1	-9,3	-4,6	-4,7	-0,2	-0,1	4,4	4,4	8,9	9,1	11,7	11,9
13	-19,9	-20	-14,9	-14,8	-10	-10,1	-5,1	-5,1	0,1	0,1	4,8	4,8	9,7	9,9	12,7	12,9
14	-18,7	-18,6	-14,1	-14,1	-9,4	-9,5	-4,8	-4,7	-0,2	-0,2	4,5	4,5	9,1	9,2	12	12,1

Продолжение таблицы Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15	-20,8	-20,8	-15,7	-15,7	-10,5	-10,5	-5,3	-5,3	-0,3	-0,3	5	5	10,2	10,3	13,4	13,4
16	-20,1	-20	-15,1	-15,1	-10,1	-10,2	-5,1	-5,1	-0,1	-0,1	4,8	4,8	9,8	9,9	12,9	12,9
17	-19,9	-19,8	-14,9	-15	-10	-10,1	-5,1	-5	-0,3	-0,4	4,8	4,8	9,7	9,8	12,7	12,8
18	-19,9	-20	-14,9	-15,1	-10	-10,2	-5,1	-5,1	-0,3	-0,4	4,8	4,8	9,7	9,9	12,7	12,9
19	-18,8	-18,7	-14,1	-14,1	-9,4	-9,5	-4,8	-4,8	-0,1	-0,1	4,5	4,5	9,2	9,3	12	12,1
20	-18,6	-18,6	-14,4	-14,4	-9,4	-9,4	-4,8	-4,7	-0,2	-0,2	4,5	4,5	9,1	9,2	11,9	12
21	-19,6	-19,6	-14,7	-14,8	-9,9	-9,9	-5	-5	-0,1	-0,1	4,7	4,7	9,6	9,7	12,6	12,7
22	-19,4	-19,3	-14,6	-14,6	-9,7	-9,8	-4,9	-4,9	-0,2	-0,2	4,7	4,7	9,5	9,6	12,4	12,5
23	-18,6	-18,6	-13,9	-13,8	-9,4	-9,4	-4,7	-4,7	-0,1	-0,1	4,5	4,5	9,1	9,2	11,9	12
24	-19,5	-19,6	-14,6	-14,8	-9,8	-10	-5	-5	0	-0,1	4,7	4,7	9,5	9,7	12,5	12,7
25	-19,1	-19	-14,3	-14,3	-9,6	-9,6	-4,9	-4,8	-0,1	-0,2	4,6	4,6	9,3	9,4	12,2	12,3
26	-19,3	-19,2	-14,5	-14,5	-9,7	-9,8	-4,9	-4,9	-0,3	-0,3	4,7	4,6	9,4	9,5	12,4	12,5
27	-18,8	-18,9	-14,2	-14,1	-9,4	-9,6	-4,8	-4,8	-0,3	-0,4	4,5	4,6	9,2	9,4	12	12,2
28	-18,7	-18,6	-14	-14	-9,4	-9,4	-4,8	-4,7	0	-0,1	4,5	4,5	9,1	9,2	12	12
29	-19,6	-19,6	-14,7	-14,8	-9,9	-9,9	-5	-5	-0,2	-0,3	4,7	4,7	9,6	9,7	12,6	12,7
30	-19,7	-19,6	-13,8	-13,7	-9,9	-10	-5	-5	-0,3	-0,4	4,8	4,7	9,6	9,7	12,6	12,7

Продолжение таблицы Б.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
14	-16,6	-16,5	-11,9	-11,7	-7,4	-7,2	-2,7	-2,7	1,8	1,7	6,5	6,5	11,1	11,2	14,1	14,2
15	-18,5	-18,4	-13,3	-13,1	-8,2	-8	-3	-3,1	2,1	2	7,2	7,3	12,4	12,5	15,7	15,8
16	-17,8	-17,7	-12,8	-12,6	-7,9	-7,7	-2,9	-2,9	1,4	1,3	6,9	7	11,9	12	15,1	15,2
17	-17,6	-17,5	-12,7	-12,5	-7,8	-7,7	-2,9	-2,9	2	1,9	6,9	6,9	11,8	11,9	14,9	15,1
18	-17,6	-17,7	-12,7	-12,6	-7,8	-7,7	-2,3	-2,3	2	1,9	6,9	7	11,8	12	14,9	15,2
19	-16,6	-16,5	-12	-11,8	-7,4	-7,2	-2,7	-2,8	1,8	1,8	6,5	6,5	11,1	11,2	14,1	14,2
20	-16,5	-16,4	-11,9	-11,7	-7,3	-7,2	-2,7	-2,7	2,1	2,1	6,5	6,5	11,1	11,2	14	14,1
21	-17,4	-17,3	-12,5	-12,3	-7,7	-7,6	-2,8	-2,9	1,9	1,8	6,8	6,8	11,6	11,7	14,8	14,9
22	-17,2	-17,1	-12,4	-12,2	-7,6	-7,5	-2,8	-2,8	1,9	1,8	6,7	6,8	11,5	11,6	14,6	14,7
23	-16,5	-16,4	-11,9	-11,7	-7,3	-7,2	-2,7	-2,7	2,1	2,1	6,4	6,5	11	11,1	14	14,1
24	-17,3	-17,3	-12,4	-12,3	-7,7	-7,6	-2,4	-2,4	1,9	1,8	6,9	6,9	11,6	11,8	14,7	14,9
25	-16,9	-16,8	-12,2	-12	-7,5	-7,3	-2,8	-2,8	1,9	1,8	6,6	6,5	11,3	11,4	14,3	14,4
26	-17,1	-17	-12,3	-12,1	-7,6	-7,4	-2,8	-2,8	1,9	1,8	6,2	6,1	11,5	11,6	14,5	14,6
27	-16,6	-16,7	-12	-11,9	-7,4	-7,3	-2,7	-2,8	1,8	1,8	6,5	6,6	11,1	11,4	14,1	14,4
28	-16,5	-16,4	-11,9	-11,7	-7,3	-7,2	-2,5	-2,5	1,7	1,7	6,5	6,5	11,1	11,2	14	14,1
29	-17,4	-17,3	-12,5	-12,3	-7,7	-7,6	-2,8	-2,9	1,9	1,8	6,8	6,8	11,6	11,7	14,8	14,9
30	-17,5	-17,4	-12,6	-12,4	-7,8	-7,6	-2,9	-2,9	1,4	1,4	7	7,1	11,7	11,8	14,8	14,9

Продолжение таблицы Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15	-14,7	-14,5	-10,2	-10,1	-5,5	-5,5	-0,9	-0,8	3,4	3,6	8	8,1	12,6	12,8	15,3	15,5
16	-14,2	-14	-9,8	-9,7	-5,3	-5,3	-0,9	-0,9	3,3	3,4	7,7	7,8	12,2	12,3	14,8	14,9
17	-14	-13,8	-9,7	-9,7	-5,5	-5,5	-0,6	-0,6	3,3	3,4	7,6	7,7	12,1	12,2	14,6	14,8
18	-14	-14	-9,7	-9,7	-5,3	-5,3	-0,8	-0,8	3,3	3,4	7,6	7,8	12,1	12,3	14,6	14,9
19	-13,3	-13,1	-9,1	-9,1	-5	-5	-1,1	-1,1	3,1	3,2	7,2	7,3	11,4	11,5	13,8	14
20	-13,2	-13	-9,1	-9,1	-4,9	-4,9	-0,8	-0,8	3,1	3,2	7,2	7,2	11,3	11,4	13,7	13,9
21	-13,9	-13,7	-9,6	-9,5	-5,2	-5,2	-0,3	-0,4	3,2	3,4	7,5	7,6	11,9	12	14,4	14,6
22	-13,7	-13,5	-9,4	-9,4	-5,1	-5,2	-1	-1	3,2	3,3	7,5	7,5	11,8	11,9	14,3	14,4
23	-13,1	-13	-9,1	-9	-4,9	-4,9	-0,9	-0,9	3,5	3,6	7,2	7,2	11,3	11,4	13,7	13,8
24	-13,8	-13,7	-9,5	-9,6	-5,2	-5,2	-0,8	-0,8	3,2	3,4	7,5	7,7	11,8	12,1	14,3	14,6
25	-13,5	-13,3	-9,3	-9,3	-5	-5,1	-0,8	-0,8	3,2	3,3	8	8	11,6	11,7	14	14,2
26	-13,6	-13,4	-9,4	-9,4	-4,4	-4,3	-1,2	-1,2	3,2	3,3	7,4	7,5	11,7	11,8	14,2	14,4
27	-13,3	-13,2	-9,1	-9,2	-5	-5	-0,7	-0,7	3,5	3,6	7,2	7,4	11,4	11,6	13,8	14,1
28	-13,2	-13	-9,1	-9,1	-4,9	-4,9	-0,9	-0,9	4	4	7,2	7,3	11,3	11,4	13,7	13,9
29	-13,9	-13,7	-9,6	-9,5	-5,2	-5,2	-0,8	-0,8	3,2	3,4	7,5	7,6	11,9	12	14,4	14,6
30	-13,9	-13,7	-9,6	-9,6	-5,2	-5,2	-0,4	-0,4	3,3	3,4	7,1	7,1	11,9	12,1	13,2	13,3

Продолжение таблицы Б.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15	-8,7	-8,6	-4,1	-4,1	0,4	0,5	4,9	4,9	9,4	9,5	13,9	14	18,4	18,6	21,2	21,1
16	-8,4	-8,2	-4	-4	0,4	0,5	4,8	4,7	9,1	9,2	13,4	13,5	17,7	17,9	20,4	20,3
17	-8,3	-8,2	-3,9	-3,9	0,6	0,6	4,7	4,6	9	9,1	13,3	13,4	17,5	17,7	20,2	20,1
18	-8,3	-8,2	-3,9	-4	0,7	0,7	4,7	4,7	9	9,2	13,3	13,5	17,5	17,9	20,2	20,3
19	-7,8	-7,7	-3,7	-3,7	0,4	0,5	4,4	4,4	8,5	8,6	12,6	12,6	16,5	16,8	19,1	19
20	-7,8	-7,7	-3,7	-3,7	0,5	0,6	4,4	4,3	8,4	8,5	12,5	12,6	16,4	16,6	19	18,9
21	-8,2	-8,1	-3,9	-3,9	0,6	0,6	4,6	4,6	8,9	9	13,1	13,2	17,3	17,5	20	19,9
22	-8,1	-8	-3,8	-3,8	0,5	0,6	4,6	4,5	8,8	8,9	13	13,1	17,1	17,3	19,8	19,6
23	-7,8	-7,7	-3,7	-3,7	0,5	0,6	4,4	4,3	8,4	8,5	12,5	12,5	16,4	16,6	19	18,8
24	-8,1	-8,1	-3,8	-3,9	0,3	0,3	4,6	4,6	8,8	9	13	13,3	17,2	17,6	19,9	19,9
25	-8	-7,8	-3,8	-3,8	0,4	0,5	4,5	4,4	8,6	8,7	12,8	12,8	16,8	17	19,4	19,3
26	-8,1	-7,9	-3,8	-3,8	0,4	0,5	4,6	4,5	8,7	8,8	12,9	13	17	17,2	19,7	19,5
27	-7,8	-7,8	-4	-4	0,4	0,5	4,4	4,4	8,5	8,7	12,6	12,8	16,5	16,9	19,1	19,2
28	-7,8	-7,7	-3,7	-3,7	0,4	0,5	4,4	4,4	8,5	8,5	12,5	12,6	16,4	16,7	19	18,9
29	-8,2	-8,1	-3,9	-3,9	0,5	0,5	4,6	4,6	8,9	9	13,1	13,2	17,3	17,5	20	19,9
30	-8,2	-8,1	-3,9	-3,9	0,8	0,8	4,7	4,6	8,9	9	13,2	13,3	17,4	17,6	20,1	19,9

Продолжение таблицы Б.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15	-2,7	-2,7	2	2	6,3	6,4	10,9	11,3	15,6	15,9	20	20,2	24,4	24,2	27	27,4
16	-2,2	-2,2	1,8	1,9	6,1	6,2	10,5	10,9	15	15,3	19,2	19,5	23,5	23,3	26	26,4
17	-2,6	-2,6	1,8	1,9	6	6,1	10,4	10,8	14,8	15,1	19,1	19,3	23,3	23,1	25,8	26,2
18	-2,6	-2,6	1,8	1,9	6	6,2	10,4	10,9	14,8	15,3	19,1	19,5	23,3	23,3	25,8	26,4
19	-2,4	-2,5	1,7	1,8	5,7	5,8	9,8	10,2	14	14,3	18	18,2	22	21,8	24,3	24,7
20	-2,4	-2,4	1,6	1,8	5,7	5,7	9,8	10,1	13,9	14,2	17,9	18,1	21,8	21,7	24,2	24,5
21	-2,6	-2,6	1,8	1,9	6	6	10,3	10,7	14,6	14,9	18,8	19	23	22,8	25,4	25,8
22	-2,5	-2,5	1,7	1,9	5,9	6	10,2	10,6	14,5	14,8	18,6	18,8	22,7	22,6	25,1	25,5
23	-2,4	-2,4	1,6	1,8	5,7	5,7	9,7	10,1	13,9	14,2	17,9	18,1	21,8	21,7	24,1	24,5
24	-2,5	-2,6	1,7	1,9	5,4	5,4	10,2	10,7	14,5	15	18,7	19,1	22,8	22,9	25,3	25,9
25	-2,5	-2,5	1,7	1,8	5,8	5,9	10	10,4	14,2	14,5	18,3	18,5	22,3	22,2	24,7	25,1
26	-2,7	-2,7	1,7	1,9	5,9	5,9	10,1	10,5	14,4	14,7	18,5	18,7	22,6	22,5	25	25,4
27	-2,4	-2,5	1,7	1,8	5,7	5,8	9,8	10,3	14	14,5	18	18,4	22	22,1	24,3	25
28	-2,4	-2,4	1,6	1,8	5,7	5,7	9,8	10,2	13,9	14,2	17,9	18,1	21,9	21,7	24,2	24,6
29	-2,6	-2,6	1,7	1,9	6	6	10,3	10,7	14,6	14,9	18,8	19	23	22,8	25,4	25,8
30	-2,6	-2,6	1,9	2	6	6,1	10,3	10,7	14,7	15	18,9	19,1	23,1	22,9	25,5	25,9

Продолжение таблицы Б.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15	-6,3	-6,1	-2,4	-2,4	1,5	1,6	5,4	5,5	9,3	9,1	13,2	13,1	17,2	17	19,3	19,4
16	-6	-5,9	-2,3	-2,3	1,5	1,6	4,3	4,3	9	8,7	12,7	12,6	16,6	16,3	18,6	18,7
17	-6	-5,8	-2,3	-2,3	1,4	1,5	5,1	5,3	8,9	8,7	12,6	12,5	16,4	16,2	19,3	19
18	-6	-5,9	-2,3	-2,3	1,5	1,6	5,1	5,3	8,9	8,7	12,6	12,6	16,4	16,3	18,4	18,7
19	-5,6	-5,5	-2,7	-2,8	1,4	1,5	4,8	5	8,4	8,2	11,9	11,8	15,5	15,3	17,4	17,5
20	-5,6	-5,4	-2,1	-2,1	1,2	1,2	4,8	4,9	8,3	8,1	11,8	11,7	15,4	15,2	17,3	17,4
21	-5,9	-5,7	-2,2	-2,2	1,4	1,5	5,1	5,2	8,8	8,5	12,4	12,3	16,2	16	18,2	18,3
22	-6,3	-6,3	-2,2	-2,2	1,4	1,5	5	5,1	8,7	8,4	12,3	12,2	16	15,8	17,9	18,1
23	-5,6	-5,4	-2,1	-2,1	1,4	1,4	4,8	4,9	8,3	8,1	11,8	11,7	15,4	15,2	17,2	17,4
24	-5,9	-5,7	-2,2	-2,3	1,4	1,5	5	5,2	8,7	8,6	12,3	12,3	16,1	16	18	18,4
25	-5,7	-5,6	-2,2	-2,2	1,5	1,6	4,9	5	8,5	8,3	12,1	12	15,8	15,5	17,6	17,8
26	-5,8	-5,6	-2,2	-2,2	1,4	1,5	5	5,1	8,6	8,4	12,2	12,1	16	15,7	17,9	18
27	-5,6	-5,5	-2,1	-2,2	1,3	1,3	4,8	5	8,4	8,3	11,9	11,9	15,5	15,4	17,4	17,7
28	-5,6	-5,4	-2,1	-2,1	1,4	1,5	4,8	4,9	8,3	8,1	11,8	11,7	15,4	15,2	17,3	17,4
29	-5,9	-5,7	-2,2	-2,2	1,6	1,7	5,1	5,2	8,8	8,5	12,4	12,3	16,2	16	18,2	18,3
30	-5,9	-5,7	-2,2	-2,3	1,7	1,8	5,1	5,2	8,8	8,6	12,5	12,4	16,3	16	17,1	17,2

Таблица Б.8 – Экспериментальные исследования температуры внутренней поверхности наружного ограждения и внутреннего воздуха при $\varphi=0,4$ и $t_{\text{панели}}=60^{\circ}\text{C}$

Номер опыта	Результаты замеров													
	При $t_{\text{н}}=-25$		При $t_{\text{н}}=-20$		При $t_{\text{н}}=-15$		При $t_{\text{н}}=-10$		При $t_{\text{н}}=-5$		При $t_{\text{н}}=0$		При $t_{\text{н}}=+5$	
	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$	$\tau_{\text{вн}}$	$t_{\text{в}}$
	При $t_{\text{н}}=+8$													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3,1	3,1	6,5	6,6	10	10	13,4	13,2	17	16,9	20,5	20,5	24	23,8
2	3,3	3,3	6,9	7,1	10,5	10,7	14,3	14,5	17,9	18,2	21,5	22	25,2	25,6
3	3	3,1	6,4	6,5	9,9	10	13,4	13,5	16,8	16,8	20,2	20,4	23,6	23,7
4	3,3	3,4	7	7,1	10,7	10,8	14,5	14,6	18,2	18,3	21,8	22,1	25,6	25,7
5	3,2	3,2	6,7	6,8	10,2	10,3	13,9	14	17,4	17,5	20,9	21,1	24,5	24,6
6	3	3,1	6,4	6,5	9,8	9,9	13,3	13,4	16,7	16,8	20	20,3	23,5	23,6
7	3,1	3,1	6,5	6,6	9,9	10	13,5	13,6	16,8	16,9	20,3	20,5	23,8	23,8
8	3,1	3,1	6,6	6,6	10,1	10	13,7	13,6	17,2	17	20,7	20,6	24,3	23,9
9	3,3	3,4	7	7,3	10,7	11,1	14,6	15	18,2	18,7	21,9	22,6	25,7	26,3
10	3,3	3,3	6,9	7	10,6	10,7	14,4	14,5	18	18,1	19,8	20,1	25,4	25,5
11	3,4	3,4	7,1	7,2	10,9	11	14,7	14,8	18,4	18,5	22,2	22,4	26	26,1
12	3	3,1	6,4	6,5	9,7	9,9	13,2	13,5	16,5	16,8	19,9	20,3	23,3	23,7
13	3,3	3,4	6,9	7,1	10,6	10,8	14,4	14,7	18	18,3	21,7	22,2	25,5	25,8
14	3,1	3,1	6,5	6,6	10	10,1	13,6	13,7	17	17,1	20,4	20,7	24	24,1
													26,3	26,6

Продолжение таблицы Б.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15	3,4	3,5	7,3	7,4	11,2	11,3	15,1	15,2	18,9	19,1	22,8	23,1	26,7	26,8	29,3	29,7
16	3,3	3,4	7	7,1	10,7	10,8	14,6	14,7	18,2	18,3	21,9	22,2	25,7	25,8	28,2	28,6
17	3,3	3,3	7	7,1	10,6	10,7	14,4	14,5	18,1	18,2	21,7	22	25,5	25,6	27,9	28,3
18	3,3	3,4	7	7,1	10,6	10,8	14,4	14,7	18,1	18,3	21,7	22,2	25,5	25,8	27,9	28,6
19	3,1	3,2	6,6	6,7	10,1	10,1	13,6	13,7	17,1	17,2	20,5	20,8	24,1	24,2	26,4	26,8
20	3,1	3,1	6,5	6,6	10	10,1	13,5	13,6	16,9	17	20,4	20,6	23,9	24	26,2	26,6
21	3,2	3,3	6,9	7	10,5	10,6	14,3	14,4	17,8	17,9	21,5	21,7	25,2	25,3	27,6	28
22	3,2	3,3	6,8	6,9	10,4	10,5	14,1	14,2	17,6	17,7	21,2	21,5	24,9	25	27,2	27,6
23	3,1	3,1	6,5	6,6	10	10,1	13,5	13,6	16,9	17	20,4	20,6	23,9	24	26,2	26,5
24	3,2	3,3	6,8	7	10,4	10,6	14,2	14,4	17,7	18	21,3	21,8	25	25,3	27,4	28,1
25	3,2	3,2	6,7	6,8	10,2	10,3	13,9	14	17,3	17,4	20,8	21,1	24,5	24,5	26,8	27,2
26	3,2	3,3	6,8	6,9	10,3	10,4	14	14,2	17,5	17,6	21,1	21,4	24,8	24,8	27,1	27,5
27	3,1	3,2	6,6	6,7	10,1	10,3	13,6	13,9	17,1	17,3	20,5	21	24,1	24,4	26,4	27
28	3,1	3,1	6,5	6,6	10	10,1	13,6	13,7	17	17,1	20,4	20,6	23,9	24	26,2	26,6
29	3,2	3,3	6,9	7	10,5	10,6	14,3	14,4	17,8	17,9	21,5	21,7	25,2	25,3	27,6	28
30	4,2	4,5	6,9	7	10,5	10,6	13,2	13,1	17,9	18	21,5	21,8	25,3	25,4	27,7	28,1

Продолжение таблицы Б.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15	13,4	13,5	17,1	17,2	21	21,6	25	24,8	28,9	28,6	32,6	32,4	36,3	35,6	38,4	38,2
16	12,9	13	16,5	16,6	20,2	20,8	24	23,9	27,9	27,6	31,4	31,2	34,9	34,3	37	36,8
17	12,8	12,9	16,3	16,4	20	20,6	23,8	23,7	27,6	27,3	31,1	30,9	34,6	34	36,7	36,5
18	12,8	13	16,3	16,6	20	20,8	23,8	23,9	27,6	27,6	31,1	31,2	34,6	34,3	36,7	36,8
19	12	12,2	15,4	15,5	18,9	19,5	22,5	22,4	26,1	25,8	29,4	29,2	32,7	32,1	34,6	34,4
20	12	12,1	15,3	15,4	18,8	19,3	22,3	22,2	25,9	25,6	29,2	29	32,5	31,9	34,4	34,2
21	12,6	12,7	16,1	16,2	19,8	20,3	23,5	23,4	27,3	27	30,7	30,5	34,2	33,6	36,2	36
22	12,4	12,6	15,9	16	19,5	20,1	23,2	23,1	26,9	26,6	30,4	30,2	33,8	33,2	35,8	35,6
23	11,9	12,1	15,3	15,4	18,8	19,3	22,3	22,2	25,9	25,6	29,1	29	32,4	31,8	34,4	34,2
24	12,5	12,8	16	16,3	19,6	20,4	23,4	23,5	27,1	27	30,5	30,6	33,9	33,7	36	36,1
25	12,2	12,4	15,7	15,8	19,2	19,8	22,8	22,7	26,5	26,2	29,8	29,6	33,2	32,6	35,2	35
26	12,4	12,5	15,9	16	19,5	20	23,1	23	26,8	26,5	30,2	30	33,6	33	35,6	35,4
27	12	12,3	15,4	15,7	18,9	19,7	22,5	22,6	26,1	26	29,4	29,5	32,7	32,4	34,6	34,8
28	12	12,1	15,3	15,4	18,8	19,3	22,4	22,2	25,9	25,6	29,2	29	32,5	31,9	34,4	34,2
29	12,6	12,7	16,1	16,2	19,8	20,3	23,5	23,4	27,3	27	30,7	30,5	34,2	33,6	36,2	36
30	12,6	12,8	16,2	16,3	19,9	20,4	23,6	23,5	27,4	27,1	30,8	30,6	34,3	33,7	36,3	36,1

Приложение В. Сравнение вариантов реконструкции систем теплоснабжения домов в с. Кожевня Шахтерского района

Таблица В.1 – Локальная смета на теплоснабжение жилого дома площадью 49,4 м² с использованием твердотопливного котла

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "МКС-Групп", г. Донецк										- 1 -		СТР_36		Форма № 1	
Теплоснабжение двухэтажного жилого дома площадью 49,4м2															
(наименование объекта строительства)															
Локальная смета на строительные работы № 1															
на монтаж оборудования автономного отопления. объект: двухэтажный жилой дом															
(наименование работ и затрат, наименование дома, строения, сооружения, линейного объекта инженерно-транспортной инфраструктуры)															
№ п/п	Обоснование (шифр нормы)	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Стоимость единицы, рос. руб.			Всего	заработной платы	эксплуатации машин в том числе заработной платы	Общая стоимость, рос.руб.	Затраты труда рабочих, чел-ч,			
					Всего	эксплуатации машин	в том числе заработной платы					в том числе	обслуживающим машин		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
1	Е18-2-1	Установка котлов стальных жаротрубных водогрейных на твердом топливе теплопроизводительностью до 0,21 МВт	1 котел	1	5629,05	1164,69	6629	3167	1165	75,44	75				
2	2105-4046-13	Котел твердотопливный Zean Wamag TK-9 мощность 9кВт	шт	1	3167,16	303,56	16400		304	6,92	7				
3	Е18-5-1	Установка водоподогревателей емкостных вместимостью до 1 м3	водоподогреватель	1	2775,21	312,96	2775	910	313	21,98	22				
4	С1630-1318-3	Водоподогреватель емкостной Стандарт-100В объем 100л	шт	1	909,53	73,66	8888		74	1,66	2				
5	Е18-13-1	Установка насосов центробежных с электродвигателем, масса агрегата до 0,1 т	1 насос	1	1561,9	97,83	1562	882	98	21,32	21				
6	1808-1266-2	Насос Wilo - Star - RS 25/2	шт	1	862,22	22,34	3864		22	0,5	1				
7	Е18-6-2	Радиаторы стальные	100 кВт радиаторов	0.04305	10268,9	1193,87	442	166	51	56,92	4				
8	С130-558-3	Радиатор биметаллический Bili-500	секция	21	3867,11	326,41	11833		14	7,46					
9	Е18-6-2	Прокладка трубопроводов отопления из стальных водопроводных неоцинкованных труб диаметром 20 мм	100 м трубопровод	0.447	19553,14	323,88	8740	923	145	48,71	22				
10	С1530-182	Труба металлопластиковая Urolog MLC диаметр 20 мм	1 м	44,7	2063,64	73,37	6360		39	1,66	1				
Всего по смете					47229	6038	1772		447		144				
											11				

Продолжение таблицы В.1

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк					- 2 -		СТР_96		Форма № 1		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Наименование											
							Всего по смете	в том числе:			
								строительных работ	оборудования		
Итого прямые затраты по смете, рос.руб.							47229	47229			
в том числе:											
стоимость материалов, изделий и конструкций, рос.руб.							39420	39420			
заработная плата, рос.руб.							6485	6485			
в т.ч. заработная плата рабочих, рос.руб.							6038	6038			
в т.ч. заработная плата машинистов, рос.руб.							447	447			
Общепроизводственные расходы, рос.руб.							2986	2986			
Трудоёмкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч.							5.32	5.32			
заработная плата в общепроизводственных расходах, рос.руб.							354	354			
Стоимость оборудования с начислениями							21060		21060		
в т.ч. стоимость оборудования без учета начислений							20264		20264		
в т.ч. начисления							796		796		
Всего сметная стоимость, рос.руб.							71275	50215	21060		
Сметная трудоёмкость, чел.-ч.							160.14	160.14			
Сметная заработная плата, рос.руб.							6839	6839			
Составил											
							(должность, подпись (инициалы, фамилия))				
Проверил											
							(должность, подпись (инициалы, фамилия))				

Таблица В.2 – Сводный сметный расчет стоимости реконструкции системы теплоснабжения дома площадью 49,4 м² с помощью твердотопливного котла

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк		1			Форма № 5	
(наименование утверждающей организации)						
Утверждено:						
Сводный сметный расчет в сумме:		75.71 тыс. рос.руб.				
В том числе возвратных сумм		0 тыс. рос.руб.				
ссылка на документ об утверждении						
" " 20__ г.						
Сводный сметный расчет стоимости объекта строительства № 1						
Теплоснабжение двухкомнатного жилого дома площадью 49,4м2						
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018						
№ п/п	Номера смет и сметных расчетов	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, тыс. рос.руб.			
			строительных работ	оборудования, мебели и инвентаря	прочие затраты	Общая сметная стоимость
1	2	3	4	5	6	7
1		Глава 2. Основные объекты строительства				
2	1	двухкомнатный жилой дом	50.215	21.060		71.275
3		Итого по главе 2	50.215	21.06		71.275
4		Итого по главам 1-7	50.215	21.06		71.275
5		Итого по главам 1-8	50.215	21.06		71.275
6		Итого по главам 1-9	50.215	21.06		71.275
7		Глава 12. Проектные и изыскательские работы				
8	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 приложение К п.49	Сметная стоимость проектных работ			2.551	2.551
9		Итого по главе 12			2.551	2.551
10		Итого по главам 1-12	50.215	21.06	2.551	73.826
11	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.1	Сметная прибыль	0.801			0.801
12	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.2	Средств на покрытие административных расходов строительно-монтажных организаций			0.330	0.330
13		Итого	51.016	21.06	2.881	74.957
14		Итого	51.016	21.06	2.881	74.957
15		Налог на прибыль			0.753	0.753
16		Всего по сводному сметному расчету	51.016	21.06	3.634	75.71
Руководитель проектной организации						
(подпись (инициалы, фамилия))						
Главный инженер проекта (Главных архитектор проекта)						
(подпись (инициалы, фамилия))						

Таблица В.3 – Локальная смета на теплоснабжение жилого дома площадью 49,4 м² с использованием лучших панелей

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "МКС-Групп", г. Донецк										СТР_98		Форма № 1	
Электрообогрев двухкомнатного жилого дома площадью 49,4м2													
Локальная смета на строительные работы № 1													
на монтаж оборудования автономного отопления, объект: двухкомнатный жилой дом													
(наименование работ и затрат, наименование дома, строения, сооружения, линейного объекта инженерно-транспортной инфраструктуры)													
Основание: чертежи (спецификации) №		Сметная стоимость										12 526 тыс.руб	
		Сметная трудоемкость										0.03079 тыс.чел-ч	
		Сметная заработная плата										1.304 тыс.руб	
		Средний разряд работ										3.7 разряд	
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018													
№ п/п	Обоснование (шифр нормы)	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Стоимость единицы, рос.руб.		Общая стоимость, рос.руб.		Затраты труда рабочих, чел-ч,				
					Всего	эксплуатации машин	заработной платы	Всего	заработной платы	эксплуатации машин	в том числе заработной платы	не занятых обслуживанием машин	обслуживающих машины
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	E18-5-1	Установка водоподогревателей емкостных вместимостью до 1 м3	водоподогреватель	1	2775.21	312.96	2775	910	313	21.98	22		
2	C1630-1318-3	Водоподогреватель емкостной Стандарт-100В объем 100л	шт	1	8887.79	73.66	8888		74	1.66	2		
3	E18-6-3	Монтаж электропанелей	100 кВт	0.04092	-	-	291	239	-	-	-		
4	2106-4047	Панель электрическая UDEN-700	1 панель	6	5835.61	301.48	20610		45	142.68	6		
		Всего по смете			3435	-	11954	1149	12	6.9			
					-	-			-	-	-		
					-	-			-	-	-		
									358				
									86				
		Наименование			Всего по смете		в том числе:						
					11954		строительных работ						
		Итого прямые затраты по смете, рос.руб.			11954		оборудования						
		в том числе:											
		стоимость материалов, изделий и конструкций, рос.руб.			10448								
		заработная плата, рос.руб.			1235		10448						
		в т.ч. заработная плата рабочих, рос.руб.			1149		1235						
		в т.ч. заработная плата машинистов, рос.руб.			86		1149						
		Общепроизводственные расходы, рос.руб.			572		86						
		Трудовое в общепроизводственных расходах, чел-ч.			1.03		572						
		заработная плата в общепроизводственных расходах, рос.руб.			69		1.03						
		Стоимость оборудования с начислениями			21419		69		21419				
		в т.ч. стоимость оборудования без учета начислений			20610		21419		20610				
		в т.ч. изчисления			809		809		809				
		Всего сметная стоимость, рос.руб.			33945		12526		21419				
		Сметная трудоемкость, чел-ч.			30.79		30.79						
		Сметная заработная плата, рос.руб.			1304		1304						

Таблица В.4 – Сводный сметный расчет стоимости реконструкции системы теплоснабжения дома площадью 49,4 м² с помощью лучистых панелей

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "МКС-Групп", г. Донецк		1	Форма № 5			
(наименование утверждающей организации)						
Утверждено:		34.942 тыс.рос.руб.				
Сводный сметный расчет в сумме:		0 тыс.рос.руб.				
В том числе возвратных сумм		0 тыс.рос.руб.				
ссылка на документ об утверждении						
" " 20_ г.						
Сводный сметный расчет стоимости объекта строительства № 1						
Электрообогрев двухкомнатного жилого дома площадью 49,4м2						
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018						
№ п/п	Номера смет и сметных расчетов	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, тыс. рос.руб.			
			строительных работ	оборудования, мебели и инвентаря	прочие затраты	Общая сметная стоимость
1	2	3	4	5	6	7
1		Глава 2. Основные объекты строительства				
2	1	двухкомнатный жилой дом	12.526	21.419		33.945
3		Итого по главе 2	12.526	21.419		33.945
4		Итого по главам 1-7	12.526	21.419		33.945
5		Итого по главам 1-8	12.526	21.419		33.945
6		Итого по главам 1-9	12.526	21.419		33.945
7		Глава 12. Проектные и изыскательские работы				
8	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 приложение К п.49	Сметная стоимость проектных работ			0.636	0.636
9		Итого по главе 12			0.636	0.636
10		Итого по главам 1-12	12.526	21.419	0.636	34.581
11	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.1	Сметная прибыль	0.154			0.154
12	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.2	Средства на покрытие административных расходов строительного-монтажных организаций			0.063	0.063
13		Итого	12.68	21.419	0.699	34.798
14		Итого	12.68	21.419	0.699	34.798
15		Налог на прибыль			0.144	0.144
16		Всего по сводному сметному расчету	12.68	21.419	0.843	34.942
Руководитель проектной организации						
		(подпись (инициалы, фамилия))				
Главный инженер проекта (Главный архитектор проекта)						
		(подпись (инициалы, фамилия))				

Таблица В.5 – Локальная смета на теплоснабжение жилого дома площадью 99,3 м² с использованием твердотопливного котла

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ХКС-Групп", г. Донецк
Теплоснабжение мансардного дома площадью 99,3м2
(наименование объекта строительства)

- 1 -

СТР_95

Форма № 1

Локальная смета на строительные работы № 1

на монтаж оборудования автономного отопления, объект: мансардный дом

(наименование работ и затрат, наименование дома, строения, сооружения, линейного объекта инженерно-транспортной инфраструктуры)

основание: чертежи (спецификации) №

Сметная стоимость	97,739 тыс.руб
Сметная трудоемкость	0,20486 тыс.чел-ч
Сметная заработная плата	8,744 тыс.руб
Средний разряд работ	3,8 разряд

Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018

№ п/п	Основания (шифр нормы)	Наименование работ и затрат	Единица измерения	количество	Стоимость единицы, руб.			Общая стоимость, руб.			Затраты труда рабочих, чел-ч,		
					Всего	эксплуатации машин	в том числе заработной платы	Всего	заработной платы	эксплуатации машин	не занятых обслуживанием машин	обслуживающих машины	Всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	E18-2-1	Установка котлов стальных жаротрубных водогрейных на твердом топливе теплопроизводительностью до 0,21	1 котел	1	5629,05	1164,69	3157,16	5629	3157	1165	75,44	75	75
2	2100-4040-12	Котел твердотопливный Демко-12,5тп мощность 12,5кВт	шт	1	13600	-	-	13600	-	-	-	-	-
3	E18-5-1	Установка водоподогревателей емкостных вместимостью до 1 м3	водоподогреватель	1	2775,21	312,95	909,53	2775	910	313	21,98	22	22
4	C1630-1318-2	Водоподогреватель емкостной Aquaverbo ER объем 150л	шт	1	10673,81	73,66	-	10674	-	74	1,66	2	2
5	E18-13-1	Установка насосов центробежных с электродвигателем, масса агрегата до 0,1 т	1 насос	1	1551,9	97,83	882,22	1552	882	98	21,32	21	21
6	1808-1206-2	Насос Wilo - Star - RS 25/2	шт	1	3854	-	-	3854	-	-	-	-	-
7	E18-6-2	Раднаторы стальные	100 кВт	0,19635	10268,9	1193,87	3867,11	2016	759	234	96,92	19	19
8	C130-558-3	Раднатор биметаллический Bilit-500	секция	47	563,48	-	-	26484	-	-	-	-	-
9	E18-6-3	Прокладка трубопровода отопления диаметром 25 мм	100 м	0,98	19872,31	323,88	73,37	19475	2023	317	48,71	48	48
10	C1630-181	Труба металлопластиковая Upron MLC диаметр 25 мм	1 м	98	247,34	-	-	24239	-	-	-	-	-
Всего по смете					-	-	-	93854	7731	2127	-	-	185
					-	-	-	-	-	536	-	-	13

Продолжение таблицы В.5

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк				СТР. 95		Форма № 1					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
- 2 -											
Наименование											
в том числе:											
Итого прямые затраты по смете, рос.руб.											
в том числе:											
стоимость материалов, изделий и конструкций, рос.руб.											
заработная плата, рос.руб.											
в т.ч. заработная плата рабочих, рос.руб.											
в т.ч. заработная плата машинистов, рос.руб.											
Общепроизводственные расходы, рос.руб.											
трудоёмкость в общепроизводственных расходах, чел-ч.											
заработная плата в общепроизводственных расходах, рос.руб.											
Стоимость оборудования с начислениями											
в т.ч. стоимость оборудования без учета начислений											
в т.ч. начисления											
Всего сметная стоимость, рос.руб.											
Сметная трудоёмкость, чел-ч.											
Сметная заработная плата, рос.руб.											

Таблица В.6 – Сводный сметный расчет стоимости реконструкции системы теплоснабжения дома площадью 99,3 м² с помощью твердотопливного котла

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк		1			Форма № 5	
(наименование утверждающей организации)						
Утверждено:		123.27				
Сводный сметный расчет в сумме:		Тыс.рос.руб.				
В том числе возвратных сумм		0 тыс.рос.руб.				
ссылка на документ об утверждении						
" " 20 г.						
Сводный сметный расчет стоимости объекта строительства № 1						
Теплоснабжение мансардного дома площадью 99,3м2						
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018						
№ п/п	Номера смет и сметных расчетов	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, тыс. рос.руб.			
			строительных работ	оборудования, мебели и инвентаря	прочие затраты	Общая сметная стоимость
1	2	3	4	5	6	7
1		Глава 2. Основные объекты строительства				
2	1	мансардный дом	97.738	18.150		115.888
3		Итого по главе 2	97.738	18.15		115.888
4		Итого по главам 1-7	97.738	18.15		115.888
5		Итого по главам 1-8	97.738	18.15		115.888
6		Итого по главам 1-9	97.738	18.15		115.888
7		Глава 12. Проектные и изыскательские работы				
8	ДСТУ Б.Д.1.1-1:2013 приложение К п.49	Сметная стоимость проектных работ			4.965	4.965
9		Итого по главе 12			4.965	4.965
10		Итого по главам 1-12	97.738	18.15	4.965	120.853
11	ДСТУ Б.Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.1	Сметная прибыль	1.024			1.024
12	ДСТУ Б.Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.2	Средства на покрытие административных расходов строительно-монтажных организаций			0.422	0.422
13		Итого	98.762	18.15	5.387	122.299
14		Итого	98.762	18.15	5.387	122.299
15		Налог на прибыль			0.971	0.971
16		Всего по сводному сметному расчету	98.762	18.15	6.358	123.27
Руководитель проектной организации						
		(подпись (инициалы, фамилия))				
Главный инженер проекта (Главный архитектор проекта)						
		(подпись (инициалы, фамилия))				

Таблица В.7 – Локальная смета на теплоснабжение жилого дома площадью 99,3 м² с использованием лучистых панелей

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "МКС-Групп", г. Донецк		- 1 -		СТР_100		Форма № 1	
Электрообогрев мансардного дома площадью 99,3м2							
(наименование объекта строительства)							
Локальная смета на строительные работы № 1							
на монтаж оборудования автономного отопления, объект: мансардный дом							
(наименование работ и затрат, наименование дома, строения, сооружения, линейного объекта инженерно-транспортной инфраструктуры)							
Основание: чертежи (спецификации) №				Сметная стоимость		14.732 тыс.руб	
				Сметная трудоемкость		0.03718 тыс.чел-ч	
				Сметная заработная плата		1.573 тыс.руб	
				Средний разряд работ		3.7 разряд	
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018				Общая стоимость, руб.		затраты труда рабочих, чел-ч,	
№ п/п	Обоснование (шифр нормы)	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Всего	эксплуатации машин в том числе заработной платы	не занятых обслуживанием машин
1	2	3	4	5	6	7	на единицу
1	E18-5-1	Установка водоподогревателей емкостных вместимостью до 1 м3	водоподогреватель	1	2775,21	312,95	11
2	C1630-1318-2	Водоподогреватель емкостной Aquaverbo ER объем 150л	шт	1	909,53	73,65	12
3	E18-6-3	Монтаж электропанелей	100 кВт	0,08184	7121,22	1107,39	-
4	2106-4047	Панель электрическая UDEN-700	1 панель	12	5835,61	301,48	6,9
					3435	-	-
		Всего по смете			-	-	-
					14032	1388	34
						99	3
Наименование				Всего по смете			
				строительных работ			
Итого прямые затраты по смете, руб.				14032			
в том числе:							
стоимость материалов, изделий и конструкций, руб.				12242			
заработная плата, руб.				1487			
в т.ч. заработная плата рабочих, руб.				1388			
в т.ч. заработная плата машинистов, руб.				99			
Общепроизводственные расходы, руб.				700			
трудоёмкость в общепроизводственных расходах, чел-ч.				1,3			
заработная плата в общепроизводственных расходах, руб.				86			
Стоимость оборудования с начислениями				42839			
в т.ч. стоимость оборудования без учета начислений				41220			
в т.ч. начисления				1619			
Всего сметная стоимость, руб.				57571		14732	
Сметная трудоемкость, чел-ч.				37,18			
Сметная заработная плата, руб.				1573			

Таблица В.8 – Сводный сметный расчет стоимости реконструкции системы теплоснабжения дома площадью 99,3 м² с помощью лучистых панелей

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк		1			Форма № 5
(наименование утверждающей организации)					
Утверждено:					
Сводный сметный расчет в сумме:		58,757 тыс.рос.руб.			
В том числе возвратных сумм		0 тыс.рос.руб.			
ссылка на документ об утверждении					
" " 20__ г.					
Сводный сметный расчет стоимости объекта строительства № 1					
Электроснабжение мансардного дома площадью 99,3м2					
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018					
№ п/п	Номера смет и сметных расчетов	Наименование глав, объектов, работ и затрат		Сметная стоимость, тыс. рос.руб.	
		3		4	5
1	2	4			
Глава 2. Основные объекты строительства					
1		мансардный дом		14,732	42,839
2	1			14,732	42,839
3		Итого по главе 2		14,732	42,839
4		Итого по главам 1-7		14,732	42,839
5		Итого по главам 1-8		14,732	42,839
6		Итого по главам 1-9		14,732	42,839
Глава 12. Проектные и изыскательские работы					
8	ДСТУ Б.Д.1.1-1-2013 приложение К п.49	Сметная стоимость проектных работ			0,748
9		Итого по главе 12			0,748
10		Итого по главам 1-12		14,732	42,839
11	ДСТУ Б.Д.1.1-1-2013 п.6.1.5.1	Сметная прибыль		0,186	0,186
12	ДСТУ Б.Д.1.1-1-2013 п.6.1.5.2	Средства на покрытие административных расходов строительного-монтажных организаций			0,077
13		Итого		14,918	42,839
14		Итого		14,918	42,839
15		Налог на прибыль			0,175
16		Всего по сводному сметному расчету		14,918	42,839
Руководитель проектной организации					
		(подпись (инициалы, фамилия))			
Главный инженер проекта (Главных архитектор проекта)					
		(подпись (инициалы, фамилия))			

Таблица В.9 – Локальная смета на теплоснабжение жилого дома площадью 30,1 м² с использованием твердотопливного котла

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк		- 1 -		СТР_97		Форма № 1								
Теплоснабжение однокомнатного жилого дома площадью 30,1м2 (наименование объекта строительства)														
Локальная смета на строительные работы № 1														
на монтаж оборудования автономного отопления, объект: однокомнатный жилой дом (наименование работ и затрат, наименование дома, строения, сооружения, линейного объекта инженерно-транспортной инфраструктуры)														
Основание: чертежи (спецификации) №				Сметная стоимость		41.163 тыс.руб								
				Сметная трудоемкость		0.15274 тыс.чел-ч								
				Сметная заработная плата		6.521 тыс.руб								
				Средний разряд работ		3,8 разряд								
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018														
№ п/п	Обоснование (шифр нормы)	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Стоимость единицы, рос.руб.		Всего	эксплуатации машин	в том числе заработной платы	Затраты труда рабочих, чел-ч,	не занятых обслуживанием машин	обслуживающих машины	на единицу	всего
					Всего	эксплуатации машин в том числе заработной платы								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	E18-2-1	Установка котлов стальных жаротрубных водогрейных на твердом топливе теплопроводимостью до 0,21 МВт	1 котел	1	5629.05	1164.69	3157.16	3157	1165	75.44	75	75	75	75
2	2106-4046-13	Котел твердотопливный Эван Warmas TK-9 мощность 9кВт	шт	1	16400	-	-	16400	-	-	-	-	-	-
3	E18-5-1	Установка водоподогревателей емкостных вместимостью до 1 м3	водоподогреватель	1	2775.21	312.95	73.66	2775	313	21.98	22	21.98	22	22
4	C1630-1318-4	Водоподогреватель емкостной Стандарт-80В объем 80л	шт	1	8275.79	-	-	8276	74	1.66	2	1.66	2	2
5	E18-13-1	Установка насосов центробежных с электродвигателем, масса агрегата до 0,1 т	1 насос	1	1551.9	97.83	22.34	1562	98	21.32	21	21.32	21	21
6	1808-1266-2	Насос Wilo - Star - RG 25/2	шт	1	3664	-	-	3664	-	-	-	-	-	-
7	E18-6-2	Радиаторы стальные	100 кВт радиаторов	0.02665	10268.9	1193.87	326.41	274	103	95.92	3	95.92	3	3
8	C130-558-3	Радиатор биметаллический Bilit-500	секция	13	3667.11	-	-	7325	9	7.46	-	7.46	-	-
9	E18-6-2	Прокладка трубопроводов отопления из стальных водогазопроводных неокисляемых труб диаметром 20 мм	100 м трубопровод	0.34	19553.14	323.88	73.37	6648	110	48.71	17	48.71	17	17
10	C1530-182	Труба металлопластиковая Upron MLC диаметр 20 мм	1 м	34	2063.84	-	-	4838	25	1.65	1	1.65	1	1
Всего по смете					-	-	-	36327	1718	5754	138	5754	138	138
					-	-	-	434	434	-	11	434	11	11

Прозрачный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк										- 2 -		СТР_97		Форма № 1	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
Наименование															
Итого прямые затраты по смете, <u>рос.руб.</u>								в том числе:							
								Всего по смете							
в том числе:								строительных работ		оборудования					
								36927		36327					
Стоимость материалов, изделий и конструкций, <u>рос.руб.</u> заработная плата, <u>рос.руб.</u> в т.ч. заработная плата рабочих, <u>рос.руб.</u> в т.ч. заработная плата машинистов, <u>рос.руб.</u>								30656		30656					
								6188		6188					
								5754		5754					
								434		434					
Общепроизводственные расходы, <u>рос.руб.</u> трудоёмкость в общепроизводственных расходах, <u>чел.-ч.</u> заработная плата в общепроизводственных расходах, <u>рос.руб.</u>								2836		2836					
								5.02		5.02					
								333		333					
								21060		21060					
Стоимость оборудования с начислениями								20264		20264					
								796		796					
								62223		41163					
Всего сметная стоимость, <u>рос.руб.</u> Сметная трудоёмкость, <u>чел.-ч.</u>								152.74		152.74					
								6521		6521					
Сметная заработная плата, <u>рос.руб.</u>															
Составил															
(должность, подпись (инициалы, фамилия))															
Проверил															
(должность, подпись (инициалы, фамилия))															

Таблица В.10 – Сводный сметный расчет стоимости реконструкции системы теплоснабжения дома площадью 30,1 м² с помощью твердотопливного котла

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ЖКС-Групп", г. Донецк										1			Форма № 5
(наименование утверждающей организации)													
утверждено:													
Сводный сметный расчет в сумме: 66.109 тыс.рос.руб.													
В том числе возвратных сумм 0 тыс.рос.руб.													
ссылка на документ об утверждении													
" " 20__ г.													
Сводный сметный расчет стоимости объекта строительства № 1													
Теплоснабжение однокомнатного жилого дома площадью 30,1м2													
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018													
№ п/п	Номера смет и сметных расчетов	Наименование глав, объектов, работ и затрат							Сметная стоимость, тыс. рос.руб.				
									строительных работ	оборудования, мебели и инвентаря	прочие затраты	Общая сметная стоимость	
1	2	3							4	5	6	7	
1		Глава 2. Основные объекты строительства											
2	1	однокомнатный жилой дом							41.163	21.060		62.223	
3		Итого по главе 2							41.163	21.06		62.223	
4		Итого по главам 1-7							41.163	21.06		62.223	
5		Итого по главам 1-8							41.163	21.06		62.223	
6		Итого по главам 1-9							41.163	21.06		62.223	
7		Глава 12. Проектные и изыскательские работы											
8	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 приложение К п.49	Сметная стоимость проектных работ									2.091	2.091	
9		Итого по главе 12									2.091	2.091	
10		Итого по главам 1-12							41.163	21.06	2.091	64.314	
11	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.1	Сметная прибыль							0.764			0.764	
12	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.2	Средства на покрытие административных расходов строительно-монтажных организаций									0.315	0.315	
13		Итого							41.927	21.06	2.406	65.393	
14		Итого							41.927	21.06	2.406	65.393	
15		Налог на прибыль									0.716	0.716	
16		Всего по сводному сметному расчету							41.927	21.06	3.122	66.109	
Руководитель проектной организации													
		(подпись (инициалы, фамилия))											
Главный инженер проекта (Главных архитектор проекта)													
		(подпись (инициалы, фамилия))											

Таблица В.11 – Локальная смета на теплоснабжение жилого дома площадью 30,1 м² с использованием лучистых панелей

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк				СТР_39		Форма № 1							
Электрообогрев однокомнатного жилого дома площадью 30,1м2 (наименование объекта строительства)													
Локальная смета на строительные работы № 1													
на монтаж оборудования автономного отопления, объект: однокомнатный жилой дом (наименование работ и затрат, наименование дома, строения, сооружения, линейного объекта инженерно-транспортной инфраструктуры)													
Основание: чертежи (спецификации) №				Сметная стоимость		11,706 тыс.руб							
				Сметная трудоемкость		0,0276 тыс.чел-ч							
				Сметная заработная плата		1,169 тыс.руб							
				Средний разряд работ		3,7 разряд							
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018													
№ п/п	Обоснование (шифр нормы)	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Стоимость единицы, рос.руб.			Общая стоимость, рос.руб.			Затраты труда рабочих, чел-ч,		
					Всего	эксплуатации машин	в том числе заработной платы	Всего	заработной платы	эксплуатации машин	в том числе заработной платы	не занятых обслуживанием машин	обслуживающих машины
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	Е18-5-1	Установка водоподогревателей емкостных вместимостью до 1 м3	водоподогреватель	1	2775,21	312,96	2775	910	313	21,98	22		
2	С1630-1318-4	Водоподогреватель емкостной Стандарт-80В объем 80л	шт	1	8275,79	73,66	8276		74	1,66	2		
3	Е18-6-3	Установка электропанелей	100 кВт	0,02046	7121,22	1107,38	146	119	23	142,68	3		
4	2106-4047	Панель электрическая UDEN-700	1 панель	3	5835,61	301,48	10305		6	6,9			
		Всего по смете			3435		11197	1029			25		
									336		2		
									80				
Итого прямые затраты по смете, рос.руб.								строительных работ					
в том числе:								оборудования					
стоимость материалов, изделий и конструкций, рос.руб.													
заработная плата, рос.руб.								9833					
в т.ч. заработная плата рабочих, рос.руб.								1109					
в т.ч. заработная плата машинистов, рос.руб.								1029					
в т.ч. заработная плата машинистов, рос.руб.								80					
Общепроизводственные расходы, рос.руб.								509					
трудоемкость в общепроизводственных расходах, чел-ч.								0,9					
заработная плата в общепроизводственных расходах, рос.руб.								60					
Стоимость оборудования с начислениями								10710					
в т.ч. стоимость оборудования без учета начислений								10305					
в т.ч. начисления								405					
Всего сметная стоимость, рос.руб.								22416					
Сметная трудоемкость, чел-ч.								27,6					
Сметная заработная плата, рос.руб.								1169					

Таблица В.12 – Сводный сметный расчет стоимости реконструкции системы теплоснабжения дома площадью 30,1 м² с помощью лучистых панелей

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк				1					Форма № 5
(наименование утверждающей организации)									
Утверждено:		23.335 тыс.рос.руб.							
Сводный сметный расчет в сумме:									
В том числе возвратных сумм				0 тыс.рос.руб.					
ссылка на документ об утверждении									
" " 20__ г.									
Сводный сметный расчет стоимости объекта строительства № 1									
Электрообогрев однокомнатного жилого дома площадью 30,1м2									
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.02.2018									
№ п/п	Номера смет и сметных расчетов	Наименование глав, объектов, работ и затрат			Сметная стоимость, тыс. рос.руб.				
	2	3	4	5	6	7			
1		Глава 2. Основные объекты строительства							
1	1	однокомнатный жилой дом	11.706	10.710		22.416			
2		Итого по главе 2	11.706	10.71		22.416			
3		Итого по главам 1-7	11.706	10.71		22.416			
4		Итого по главам 1-8	11.706	10.71		22.416			
5		Итого по главам 1-9	11.706	10.71		22.416			
6		Глава 12. Проектные и изыскательские работы							
7		Сметная стоимость проектных работ			0.595	0.595			
8	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 приложение К п.49	Итого по главе 12			0.595	0.595			
9		Итого по главам 1-12	11.706	10.71	0.595	23.011			
10		Сметная прибыль	0.138			0.138			
11	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.1	Средства на покрытие административных расходов строительно-монтажных организаций			0.057	0.057			
12	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.2	Итого	11.844	10.71	0.652	23.206			
13		Итого	11.844	10.71	0.652	23.206			
14		Налог на прибыль			0.129	0.129			
15		Всего по сводному сметному расчету	11.844	10.71	0.781	23.335			
Руководитель проектной организации		(подпись (инициалы, фамилия))							
Главный инженер проекта (Главный архитектор проекта)		(подпись (инициалы, фамилия))							

Приложение Г. Внедрение результатов диссертационной работы

В диссертационный совет
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

«Утверждаю»
Проректор по научной работе
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
Академия строительства и архитектуры»,
доктор технических наук, профессор
В.Ф. Муцанов
2018 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
ассистента кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»
Шацкова Артема Олеговича на тему «**Повышение эффективности работы систем
низкотемпературного лучистого отопления жилых и общественных зданий**»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование, воздуха,
газоснабжение и освещение в научно-исследовательскую работу
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Одной из задач, поставленных в качестве условия для успешного развития и реконструкции отрасли теплоснабжения Донбасса, является рациональное использование возможностей топливно-энергетического комплекса региона для решения проблем жилищно-коммунального хозяйства за счет использования автономных систем отопления с использованием низкотемпературных лучистых отопительных панелей.

При разработке кафедральной научно-исследовательской темы К 3-03-16 «Модернизация зданий и систем городского теплоснабжения с целью повышения энергоресурсоэффективности» были использованы следующие положения диссертационной работы:

- математическая модель сложного теплообмена в помещении с низкотемпературными отопительными приборами;
- методика расчета среднего диффузного углового коэффициента, позволяющего рассчитывать теплообмен в помещениях с лучистым отоплением, а, следовательно, выбирать наиболее оптимальный вариант размещения отопительных приборов для максимизации эффективности работы низкотемпературных лучистых систем отопления;
- предложено использование систем отопления с низкотемпературными электрическими лучистыми отопительными панелями на негазифицированных территориях и для индивидуального отопления жилых и общественных зданий в районах с неплотной застройкой.

Начальник научно-исследовательской
части ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
к.т.н., доцент

В. Н. Завьялов

Научный руководитель
доцент кафедры «Теплотехника,
теплогазоснабжение и вентиляция»,
к.т.н., доцент

С. И. Монах

Диссертационный совет Д 01.005.01
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
доктор технических наук, профессор

В.И. Нездойминов

2018 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
ассистента кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»
Шацкова Артема Олеговича на тему **«Повышение эффективности работы систем
низкотемпературного лучистого отопления жилых и общественных зданий»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование, воздуха,
газоснабжение и освещение в учебный процесс
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Результаты диссертационных исследований Шацкова Артема Олеговича:

- математическая модель сложного теплообмена в помещении с
низкотемпературными лучистыми отопительными приборами,
- математическая модель определения температуры внутренней поверхности
отражающих конструкций,
- методика проектирования систем лучистого отопления,

внедрены в учебный процесс в качестве учебного материала в курсе дисциплин
«Экологические проблемы и энергосбережение», «Автономные системы
теплоснабжения», «Теплообмен в системах ОВ и К», при разработке раздела дипломной
магистерской диссертации студентами специальности «Теплогазоснабжение и
вентиляция», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Начальник учебного отдела
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»,
канд. н. гос. упр., доцент



А. А. Сухина

Заведующий кафедрой
«Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»,
д.т.н., профессор



А. В. Лукьянов



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
АДМИНИСТРАЦИЯ ГОРОДА ШАХТЕРСКА

ул. Ленина, 4, г. Шахтерск, 86211, тел. (06255) 4-21-17, факс (06255) 4-57-54,
 e-mail: shahtersk.city@mail.ru

28.06.2018 № 01-12/3934
 на № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.005.01
 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
 академия строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Шацкого Артема Олеговича на тему «Повышение эффективности работы систем низкотемпературного лучистого отопления жилых и общественных зданий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Результаты исследований диссертационных работы Шацкого А.О., которые позволяют выбрать оптимальное место установки низкотемпературных лучистых отопительных приборов, в том числе разработанная методика расчета температурного режима отапливаемого помещения и расчета теплопотерь при проектировании систем низкотемпературного лучистого отопления применялись в качестве рекомендаций при разработке проекта реконструкции домов в с. Кожевня Шахтерского района, пострадавших в результате боевых действий.

Использование представленных в диссертации рекомендаций, позволяет подобрать тип и оптимальное расположение отопительных приборов (излучателей), что позволяет достичь экономического и экологического эффекта. Так, при использовании низкотемпературного лучистого отопления по сравнению с традиционным конвективным отоплением с твердотопливными котлами для индивидуальных жилых домов отапливаемой площадью от 50 до 100 м² составит порядка от 7,0 до 13,8 тыс. руб. в год со сроком окупаемости менее 5 лет.

Материалы диссертационной работы Шацкого А.О. представляют практический интерес и рекомендуются к внедрению при проектировании систем отопления жилых и общественных зданий.

Заместитель главы
 администрации



С.Н.Майчук

**УПРАВЛЕНИЕ ЖИЛИЩНОГО ХОЗЯЙСТВА АДМИНИСТРАЦИИ Г. ДОНЕЦКА**

83001, г. Донецк, ул. Постышева, 68, тел. 305-17-24, факс. 304-83-67

от 09.07.2018 № 489/03-14
на № _____ от _____Диссертационный совет Д 01.005.01
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Шацкого Артема Олеговича на тему «Повышение эффективности работы систем низкотемпературного лучистого отопления жилых и общественных зданий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Научные и практические результаты диссертационной работы А.О. Шацкого представляют интерес для Управления жилищного хозяйства администрации г. Донецка и планируются к внедрению в дальнейшей работе предприятия.

Объектами внедрения являются:

- научно обоснованная методика расчета температурного режима отапливаемого помещения;
- методика проектирования систем низкотемпературного лучистого отопления при прямой и обратной постановках задач расчета;
- методика расчета теплопотерь помещения с лучистыми отопительными приборами.



Начальник управления

В.А. Литвинов