

*В печать*  
*26.12.2018*  
УДК 697.273.86

На правах рукописи

*А. Шацков*

**Шацков Артем Олегович**

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

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Монах Светлана Игоревна**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Андрійчук Николай Данилович,**  
директор института строительства, архитектуры и жилищно- коммунального хозяйства ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», заведующий кафедрой вентиляции, теплогазо- и водоснабжения

доктор технических наук, профессор  
**Недопекин Федор Викторович,**  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет**»

Защита диссертации состоится " 15 " марта 2019 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2, зал заседаний ученого совета.  
Тел. факс +38 (0623) 43-70-33, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2, (<http://donnasa.ru>)

Автореферат разослан "     "                      2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.005.01

Удовиченко Злата Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 воздухопроводов 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 вышперечисленное и определяет актуальность темы диссертационной работы.

**Степень разработанности темы.** Вопросами лучистого теплообмена занимались такие ученые, как 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 теплопотерь 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 усовершенствовать методику расчета теплопотерь 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 теплотерь 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.);

- Международная научно-техническая конференция «Энергетические системы» (г. Белгород, 2017 г.);

- II Международном строительном форуме «Строительство и архитектура-2018» (г. Макеевка, 19-21 апреля 2018 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, четырех глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Общий объем работы - 182 страницы, в том числе 113 страниц основного текста; 45 рисунков; 12 таблиц; список литературы на 15 страницах; 51 страница приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи научного исследования, изложена научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы.

**В первой главе** проведен анализ возможности использования систем низкотемпературного лучистого отопления в качестве основного источника теплоты в жилых и общественных зданиях. Определено позитивное влияние лучистого обогрева на организм человека, а также отсутствие негативного воздействия длинноволнового инфракрасного излучения на здоровье человека. Также установлено, что использование лучистых отопительных приборов позволяет создать комфортную тепловую обстановку в обслуживаемом помещении.

Выполнен обзор существующих методик расчета лучистого теплообмена в помещениях. Установлено, что в нормативных документах отсутствует единая методика расчета и проектирования систем лучистого отопления жилых и общественных зданий. При этом в справочной литературе отмечается, что использование существующей методики расчета температуры внутренней поверхности наружного ограждения даёт неверные результаты. Разница реальной температуры поверхности может отличаться от расчетной на 1-2°C, что связано с отсутствием методики определения углового коэффициента.

Установлено, что ни одна из существующих методик определения среднего диффузного углового коэффициента не приемлема для расчета лучистого теплообмена в помещении. В большей части справочной литературы приведены методики определения локального углового коэффициента. Однако, геометрические размеры отопительных приборов соизмеримы с размерами ограждающих конструкций, поэтому необходимо разработать методику определения среднего диффузного углового коэффициента, поскольку при расчетах теплообмена излучением реальные технические поверхности всегда рассматриваются, как диффузные.

**Во второй главе** разработана математическая модель расчета теплообмена излучением в помещениях с лучистым отоплением.

При эксплуатации зданий определяющим является тепловой режим помещений, от которого зависит ощущение теплового комфорта человека, нормальное протекание производственных процессов, состояние и долговечность конструкций здания и его оборудования. Под действием конвективного и лучистого теплообмена температуры воздуха и поверхностей в помещении взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга.

Лучистый теплообмен в помещении происходит в условиях ограниченного диапазона значений температур, определённых радиационных свойств поверхностей и геометрии их расположения. Потoki теплоты, передающиеся тепловым излучением в помещении с лучистым отоплением, представлены на рисунке 1.

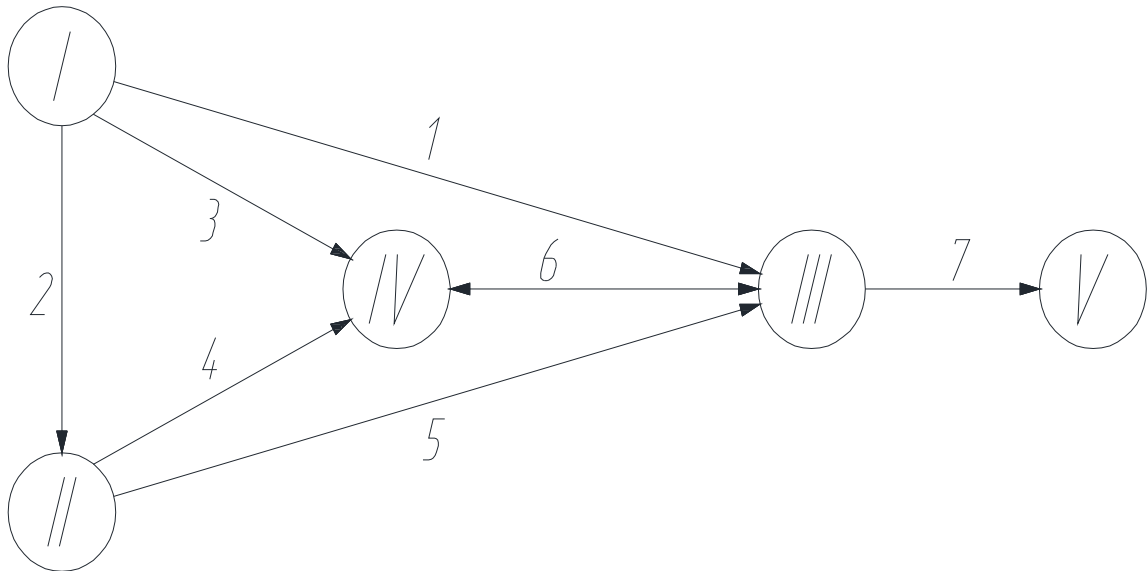


Рисунок 1 – Граф тепловых потоков в помещении:

I – отопительная панель, II – внутренние поверхности внутренних ограждений, III – наружное ограждение, IV – внутренний воздух в помещении, V – наружный воздух,

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 от внутренней поверхности наружного ограждения к наружному воздуху

Основной задачей расчета теплообмена является определение температуры внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции на основании исходных данных:

- температуры наружного воздуха  $T_n$ , К;
- параметры отопительной панели: температура поверхности  $T_p$ , К, и степень черноты излучающей поверхности  $\varepsilon_1$ ;
- степень черноты строительных материалов  $\varepsilon_2$ .

Для решения этой задачи автором на основе уравнения теплового баланса наружного ограждения получено следующее выражение

$$\sigma_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{1-2} \cdot T_x^4 + T_x \cdot k' - \sigma_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{1-2} \cdot T_p^4 - T_n \cdot k' = 0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – степени черноты отопительной панели и внутренней поверхности наружного ограждения соответственно;

$\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;

$T_p$  – температура отопительной панели, К;

$T_{вн}$  – температура внутренней поверхности наружного ограждения, К;

$\varphi_{1-2}$  – угловой коэффициент излучения с поверхности отопительной панели на внутреннюю поверхность наружного ограждения;

$T_n$  – температура наружного воздуха, К;



$k'$  – коэффициент теплопередачи через наружное ограждение без учета конвективного теплообмена между внутренней поверхностью наружного ограждения и внутренним воздухом, Вт/м<sup>2</sup>·К.

Условия прямого обмена энергией излучения между телами 1 и 2 в диатермической среде с видимыми поверхностями  $F_1$  и  $F_2$  определяются угловыми коэффициентами

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_2} \int_{F_1} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2; \quad (2)$$

$$\varphi_{2-1} = \frac{1}{F_2} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2, \quad (3)$$

где  $r$  – расстояние между центрами элементарных площадок  $dF_1$  и  $dF_2$  на поверхностях  $F_1$  и  $F_2$ , м;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – соответствующие углы между нормалью к одной площадке и направлением на другую площадку.

Величина  $\varphi_{1-2} \cdot F_1 = \varphi_{2-1} \cdot F_2 = H_{1-2} = H_{2-1}$  может рассматриваться как геометрический инвариант взаимного обмена энергией излучения между телами 1 и 2, одинаковый для обеих поверхностей. Эту величину обычно называют взаимной поверхностью излучения пары тел, которая определяется по формуле

$$H_{1-2} = H_{2-1} = \int_{F_2} \int_{F_1} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2. \quad (4)$$

Излучатель и поверхности помещения друг относительно друга могут располагаться либо в перпендикулярных, либо в параллельных плоскостях. Соответствующие схемы изображены на рисунке 2 и рисунке 3 соответственно.

На первой схеме (рисунок 2) векторы нормали к поверхностям 1 и 2  $\vec{n}_1 = (0; 1; 0)$  и  $\vec{n}_2 = (0; 0; 1)$ . Координаты точки А ( $x_A; 0; z_A$ ) и точки В ( $x_B; y_B; 0$ ). Тогда  $\vec{AB} = (x_B - x_A; y_B; -z_A)$ . Учитывая, что из постановки задачи углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – острые, получено:

$$\cos \varphi_1 = \frac{\vec{AB} \cdot \vec{n}_1}{|\vec{AB}| \cdot |\vec{n}_1|} = \frac{y_B}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + y_B^2 + z_A^2}}; \quad (5)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{\vec{BA} \cdot \vec{n}_2}{|\vec{BA}| \cdot |\vec{n}_2|} = \frac{z_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + y_B^2 + z_A^2}}. \quad (6)$$

С учетом того, что  $r = AB$ , выражение (4) для двух поверхностей, расположенных в перпендикулярных плоскостях, можно представить следующим образом

$$H_{12} = \frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{a_2} dx_a \int_{c_1}^{c_2} dx_b \int_{b_1}^{b_2} dz_A \int_{d_1}^{d_2} \frac{y_B z_A dy_B}{[(x_B - x_A)^2 + y_B^2 + z_A^2]^2}. \quad (7)$$

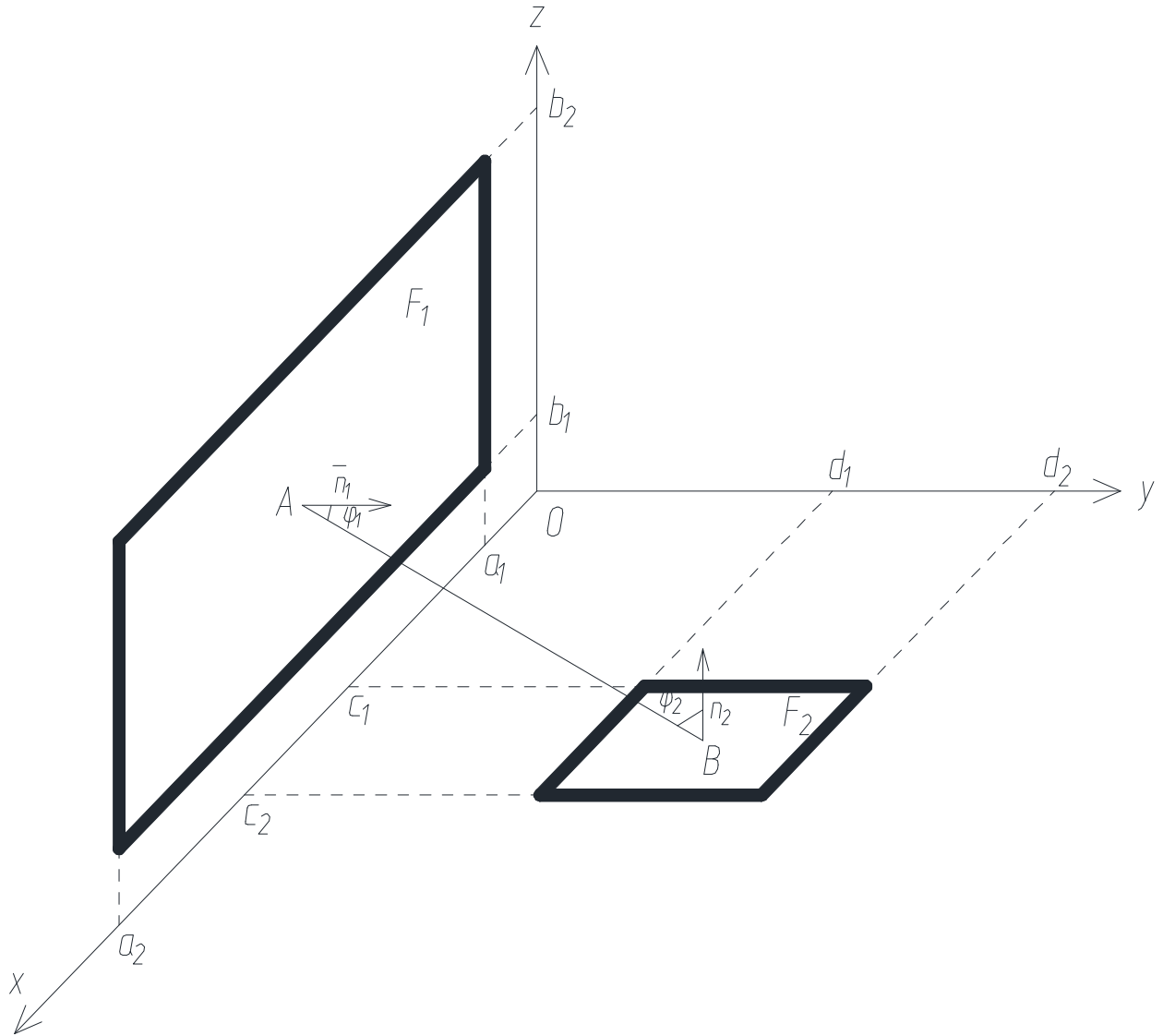


Рисунок 2 – Схема к расчету взаимной поверхности облучения в случае, когда излучатель и поверхность помещения расположены в перпендикулярных плоскостях:

$F_1$  – ограждающая конструкция;  $F_2$  – отопительная панель;  $a_1, b_1$  – 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;  $\varphi_1, \varphi_2$  – угол между вектором нормали и отрезком  $AB$

В результате интегрирования получено следующее аналитическое выражение

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

где  $a_l, b_j$  – координаты ограждающей конструкции;  
 $c_k, d_i$  – координаты панели.

На второй схеме (рисунок 3) векторы нормали к поверхностям 1 и 2 обозначены  $\vec{n}_1 = (0; 0; 1)$  и  $\vec{n}_2 = (0; 0; -1)$ .

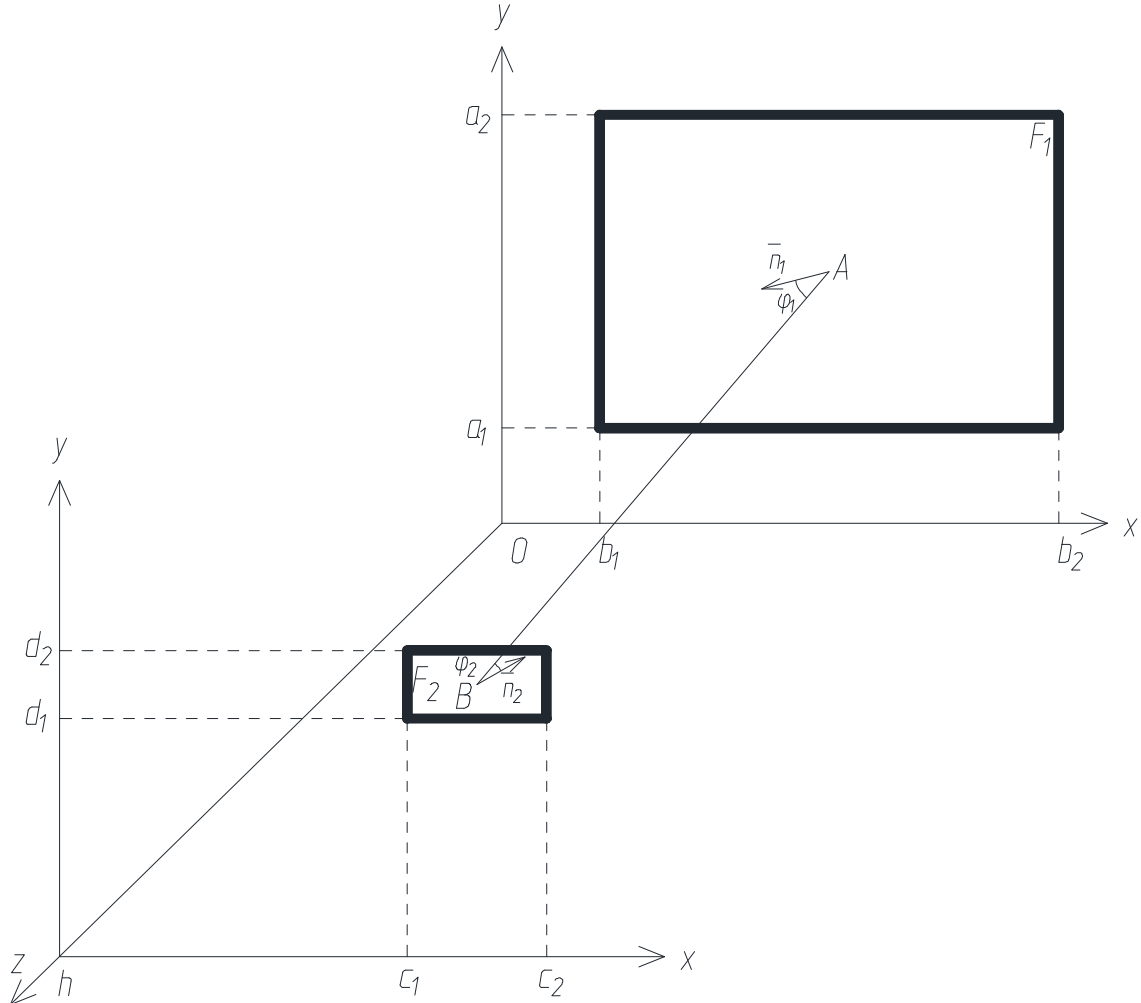


Рисунок 3 – Схема к расчету взаимной поверхности облучения в случае, когда излучатель и поверхность помещения расположены в параллельных плоскостях:

$F_1$  – ограждающая конструкция;  $F_2$  – отопительная панель;  $a_l, b_j$  – 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;  $\varphi_1, \varphi_2$  – угол между вектором нормали и отрезком  $AB$ .

Координаты точки  $A (x_A; y_A; 0)$  и точки  $B (x_B; y_B; h)$ , где  $h$  – расстояние между плоскостями. Тогда  $\vec{AB} = (x_B - x_A; y_B - y_A; h)$ . Учитывая, что из постановки задачи углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – острые, то

$$\cos\varphi_1 = \frac{\overline{AB} \cdot \overline{n_1}}{|\overline{AB}| \cdot |\overline{n_1}|} = \frac{h}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + h^2}}; \quad (9)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{\overline{BA} \cdot \overline{n_2}}{|\overline{BA}| \cdot |\overline{n_2}|} = \frac{h}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + h^2}}. \quad (10)$$

С учетом того, что  $r=AB$ , выражение (4) для двух поверхностей, расположенных в параллельных плоскостях, можно представить следующим образом

$$H_{12} = \frac{h^2}{\pi} \int_{c_1}^{c_2} dx_B \int_{a_1}^{a_2} dx_A \int_{d_1}^{d_2} dy_B \int_{b_1}^{b_2} \frac{dy_A}{\left[ (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + h^2 \right]^2}. \quad (11)$$

После интегрирования получено следующее выражение

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

где  $a_l, b_j$  – координаты ограждающей конструкции;  
 $c_k, d_i$  – координаты панели;  
 $h$  – расстояние между параллельными плоскостями, м.

На основании полученных выражений вычисляется угловой коэффициент, или коэффициент облучённости,  $\varphi_{1-2}$

$$\varphi_{12} = \frac{H_{12}}{F_1}; \quad \varphi_{2-1} = \frac{H_{21}}{F_2}. \quad (13)$$

Важным показателем работы системы лучистого отопления является температура поверхностей внутренних ограждающих конструкций, которые также в литературе называют адиабатными поверхностями. 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. На основе уравнения теплового баланса получено следующее выражение для определения температуры внутренней поверхности адиабатного ограждения

$$\sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{а}} \cdot [T_{\text{п}}^4 - T_{\text{а}}^4] \cdot (1 - \varphi_{\text{п-х}}) \cdot F_{\text{а}} - \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{а}}^2 \cdot [T_{\text{а}}^4 - T_{\text{х}}^4] \cdot F_{\text{х}} - \left( t_{\text{п}}^{\frac{4}{3}} - t_{\text{вн}}^{\frac{4}{3}} \right) \cdot F_{\text{панели}} - \sum \alpha'_{\text{к}i} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) \cdot F_i = 0, \quad (14)$$

где  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;

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

$\varepsilon_{\text{а}}$  – степень черноты внутренней поверхности адиабатных ограждений, численно равная степени черноты внутренней поверхности наружного ограждения;

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

$T_{\text{а}}$  – температура адиабатных поверхностей, К;

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

$F_{\text{а}}$  – суммарная площадь адиабатных поверхностей, м<sup>2</sup>.

В выражении (14) входными параметрами являются следующие значения:

- параметры отопительной панели  $\varepsilon_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{п}}$ ,  $F_{\text{п}}$ , определяющиеся по паспорту прибора;

- параметры наружного ограждения  $F_{\text{х}}$ ,  $\varepsilon_{\text{а}}$ , а также температура поверхности  $T_{\text{вн}}$ , определяемая по формуле (1);

- геометрические параметры адиабатных поверхностей и степень черноты внутренней поверхности;

- средний диффузный угловой коэффициент излучения, как в выражении (1);

- температура внутреннего воздуха, численно равная  $T_{\text{х}}$ .

Перед началом расчета необходимо вычислить коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha_{\text{к}}$  для всех типов поверхностей. После этого выражение (14) можно представить как уравнение 4 степени для определения температуры внутренней поверхности адиабатных ограждений.

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. В этом случае тепловые потоки через наружное ограждение следует разделять на теплообмен через заполнение световых проемов и через остальную часть наружной стены. Потоки взаимного

обмена энергией излучения между поверхностями помещения в этом случае изображены на рисунке 4

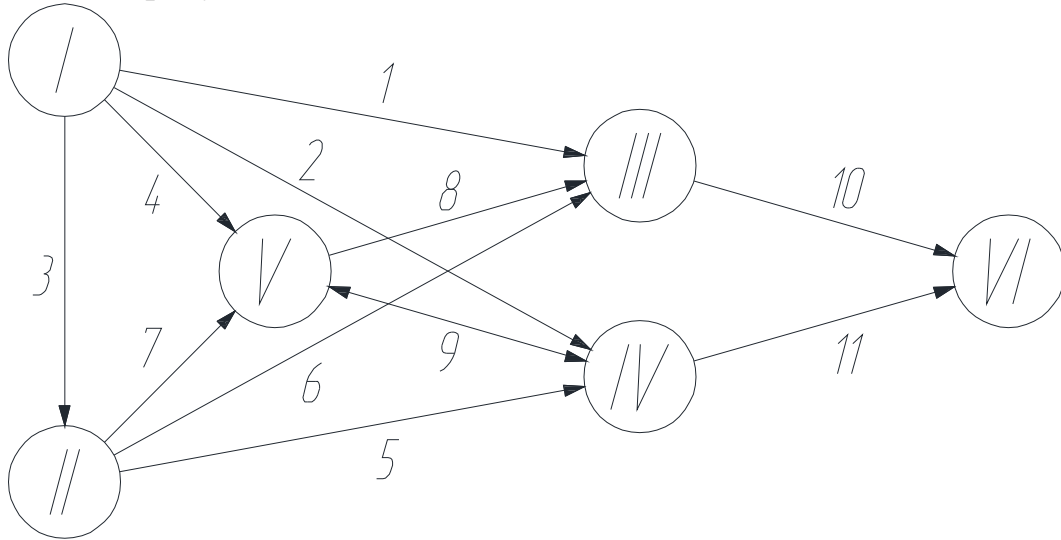


Рисунок 4 – Граф тепловых потоков в помещении:

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.

Для определения температур внутренней поверхности ограждающих конструкций отапливаемого помещения при установке отопительной панели на внутренней стене необходимо решить систему из трех уравнений. На основании уравнений теплового баланса для наружного ограждения без учета заполнения светового проема, окна и условного ограждения получено следующее выражение

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{п}}^4 - T_0^4] \varphi_0 \cdot F_{\text{п}} + \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_0^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - \\ \quad - k \cdot F_0 \cdot (T_0 - T_{\text{н}}) - F_0 \cdot \alpha_{\text{к}} \cdot (T_{\text{в}} - T_0) = 0; \\ \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{п}}^4 - T_{\text{вн}}^4] (1 - (\varphi_{\text{вн}} + \varphi_0)) \cdot F_{\text{п}} - \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_0^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - \\ \quad - \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_{\text{х}}^4] \sum \varphi_j \cdot F_j - F_{\text{вн}} \cdot \alpha_{\text{к}} \cdot (T_{\text{вн}} - T_0) = 0; \\ \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{п}}^4 - T_{\text{х}}^4] \varphi_{\text{вн}} \cdot F_{\text{п}} + \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot [T_{\text{вн}}^4 - T_{\text{х}}^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - \\ \quad - k \cdot F'_{\text{х}} \cdot (T_{\text{х}} - T_{\text{н}}) = 0, \end{array} \right. \quad (15)$$

где  $T_0$  – температура поверхности окна, К;  
 $F_0$  – площадь заполнения светового проема, м<sup>2</sup>;

$F'_x$  – площадь поверхности наружного ограждения без учета площади заполнения светового проема, м<sup>2</sup>;

$\varepsilon_{пр}$  – приведенный коэффициент степени черноты поверхностей, участвующих в лучистом теплообмене;

$\varphi_i$  – угловой коэффициент излучения с  $i$ -той поверхности внутреннего ограждения на окно;

$F_i$  – площадь  $i$ -той поверхности внутреннего ограждения, м<sup>2</sup>;

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

$F_j$  – площадь  $j$ -той поверхности внутреннего ограждения, м<sup>2</sup>;

$\varphi_o$  – угловой коэффициент излучения с поверхности отопительной панели на заполнение светового проема;

$\varphi_{вн}$  – угловой коэффициент излучения с поверхности отопительной панели на внутреннюю поверхность наружного ограждения.

При установке отопительной панели на наружном ограждении

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_o \cdot [T_{вн}^4 - T_o^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - k \cdot F_o \cdot (T_o - T_n) - \alpha_k \cdot F_{вн} \cdot (T_{вн} - T_b) = 0; \\ \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_o \cdot \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - T_{вн}^4 \right] \cdot F_n - \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_o \cdot [T_{вн}^4 - T_o^4] \sum \varphi_i \cdot F_i - \\ - \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_o \cdot [T_{вн}^4 - T_x^4] \sum \varphi_j \cdot F_j - \alpha_k \cdot F_{вн} \cdot (T_{вн} - T_b) = 0; \\ \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_o \cdot [T_{вн}^4 - T_x^4] \cdot \sum \varphi_j \cdot F_j - k \cdot F'_x \cdot (T_{вн} - T_n) = 0. \end{array} \right. \quad (16)$$

**В третьей главе** в соответствии с планированием эксперимента проведены исследования по определению температуры внутренней поверхности наружного ограждения и температуры внутреннего воздуха в помещении с лучистым отоплением в зависимости от температуры наружного воздуха, температуры поверхности излучателя и среднего диффузного углового коэффициента излучения. В качестве экспериментальной установки были выбраны электрические отопительные панели UDEN-700S, номинальная потребляемая мощность каждой 682 Вт. Исследования проводились в течение отопительного периода. Измерения проводились при установившемся температурном режиме. Интервал снятия показаний составлял 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. Экспериментальная установка изображена на рисунке 5, а схема расположения измерительных приборов – на рисунке 6.

Были определены уровни варьирования факторов, влияющих на температуру внутренней поверхности наружного ограждения.

Уровни варьирования температуры наружного воздуха обусловлены климатическими условиями места, в котором проводился эксперимент (с ноября 2016 до марта 2017 года в г. Макеевка).



Рисунок 5 – Лабораторная установка с измерительными приборами

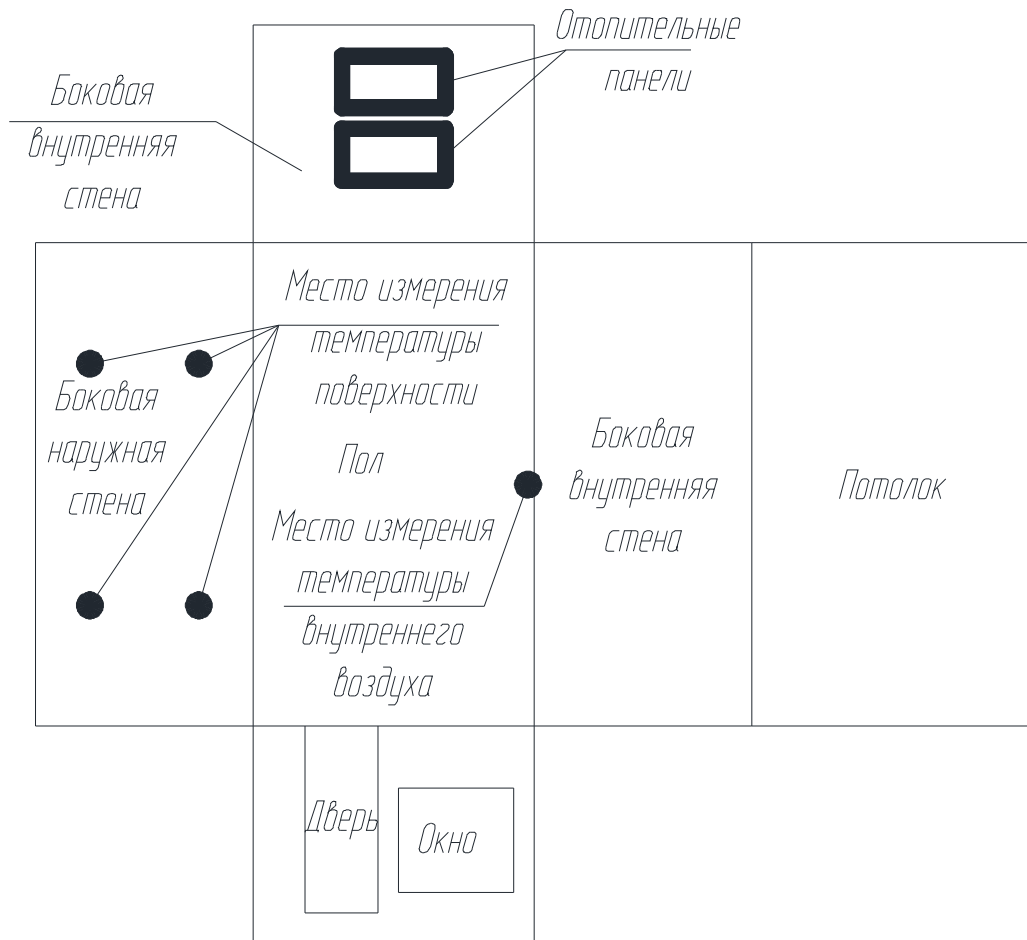


Рисунок 6 – Схема размещения измерительных приборов в исследуемом помещении



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 лабораторного трансформатора ЛАТР-2М. При этом минимальная 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 отсутствию дополнительных коммуникаций (таких, как трубопроводы для подачи теплоносителя в традиционных системах отопления). Аналитические исследования показали, что значение коэффициента облученности с поверхности панелей на поверхность ограждения в исследуемом помещении варьируется в пределах от 0,07 до 0,4.

Уровни варьирования входных параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа.

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной 0	Верхний +1	
x <sub>1</sub> – средней диффузный угловой коэффициент излучения, φ	0,07	0,235	0,4	0,165
x <sub>2</sub> – температура поверхности излучателя, t <sub>п</sub> , °С	40	60	80	20
x <sub>3</sub> – температура наружного воздуха, t <sub>н</sub> , °С	-25	-8,5	8	16,5

В результате обработки экспериментальных данных было получено регрессионное уравнение температуры внутренней поверхности наружного ограждения в натуральном масштабе, являющееся окончательным видом экспериментально-статистической модели

$$\tau_{\text{вн}} = -0,3551 - 13,825 \cdot \varphi + 0,1702 \cdot t_{\text{п}} + 1,009 \cdot t_{\text{н}} - 0,7242 \cdot \varphi \cdot t_{\text{п}} + 1,063 \cdot \varphi \cdot t_{\text{н}}. \quad (17)$$

Полученное уравнение регрессии было проверено на адекватность с помощью критерия Фишера и критерия Стьюдента.

Адекватность полученной модели подтверждается сопоставлением 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.

Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально определенных температур внутренней поверхности наружного ограждения представлено на рисунках 7, 8, 9.

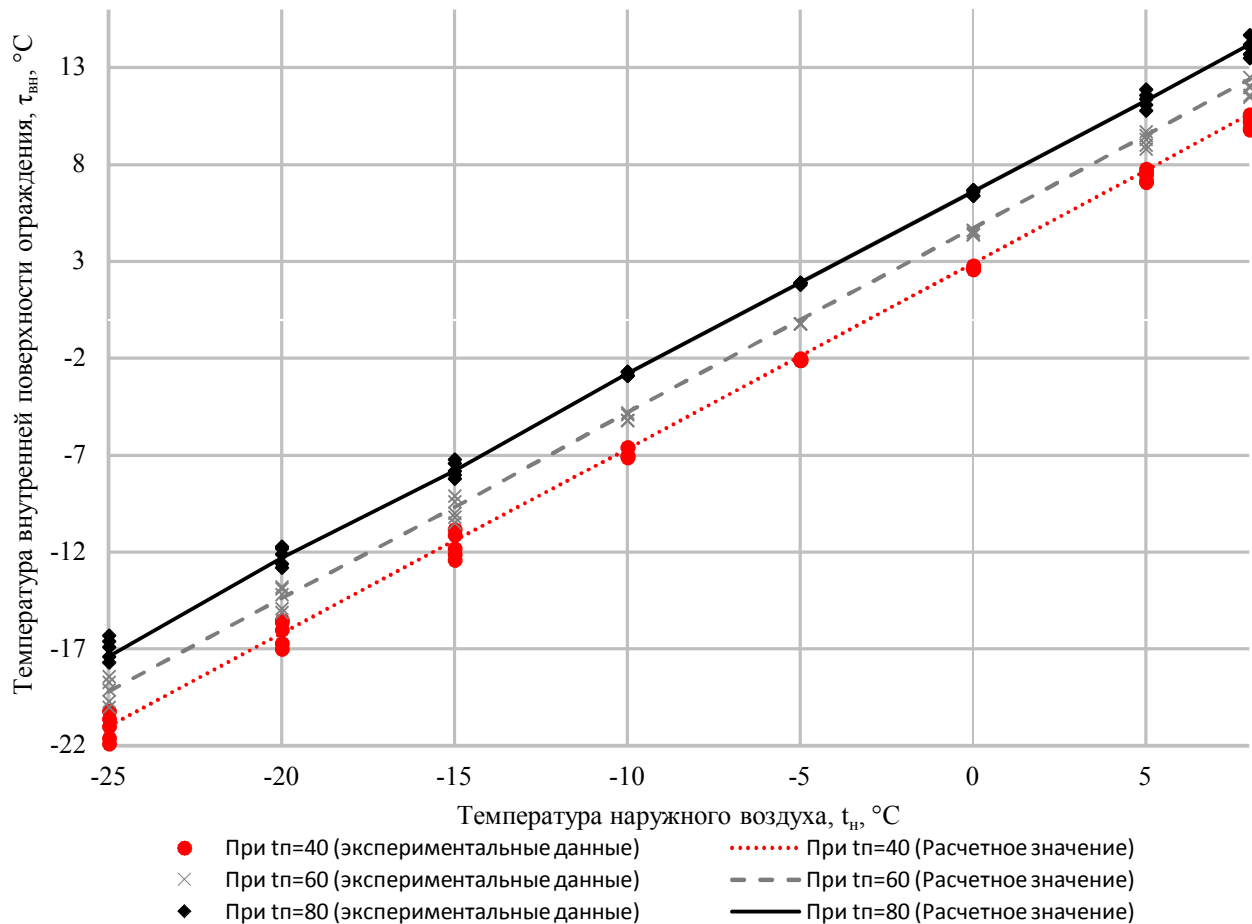


Рисунок 7 – Результаты сравнения теоретически рассчитанных и экспериментально определенных температур внутренней поверхности наружного ограждения при  $\varphi=0,07$

Анализ выражения (17) и результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- при прочих равных условиях угловой коэффициент излучения оказывает значительное влияние на температуру внутренней поверхности наружного ограждения;

- поскольку значение углового коэффициента зависит исключительно от геометрических характеристик и взаимного расположения тел, следовательно, ещё на стадии проектирования следует уделять особое внимание расположению отопительных приборов в обслуживаемом помещении;

- единственным способом регулировки работы систем низкотемпературного лучистого отопления является изменение температуры поверхности отопительного прибора.

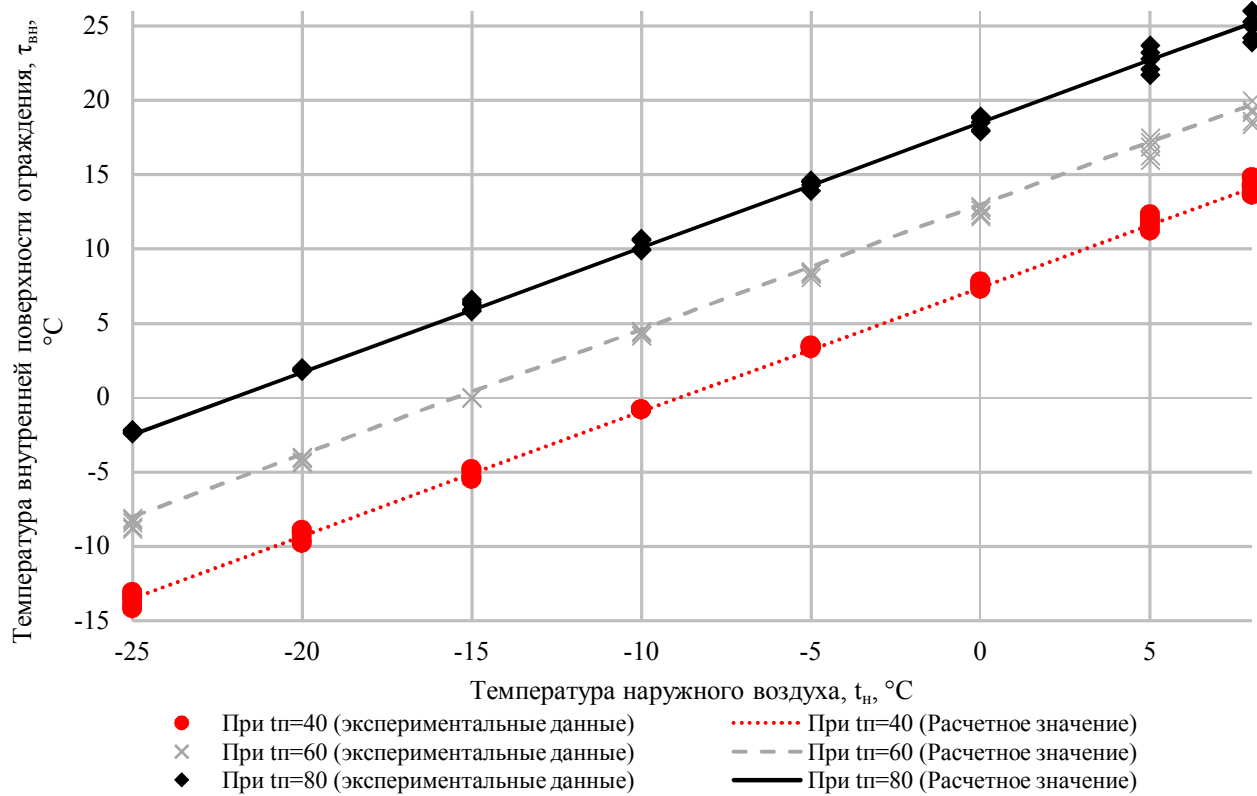


Рисунок 8 – Результаты сравнения теоретически рассчитанных и экспериментально определенных температур внутренней поверхности наружного ограждения при  $\varphi=0,235$

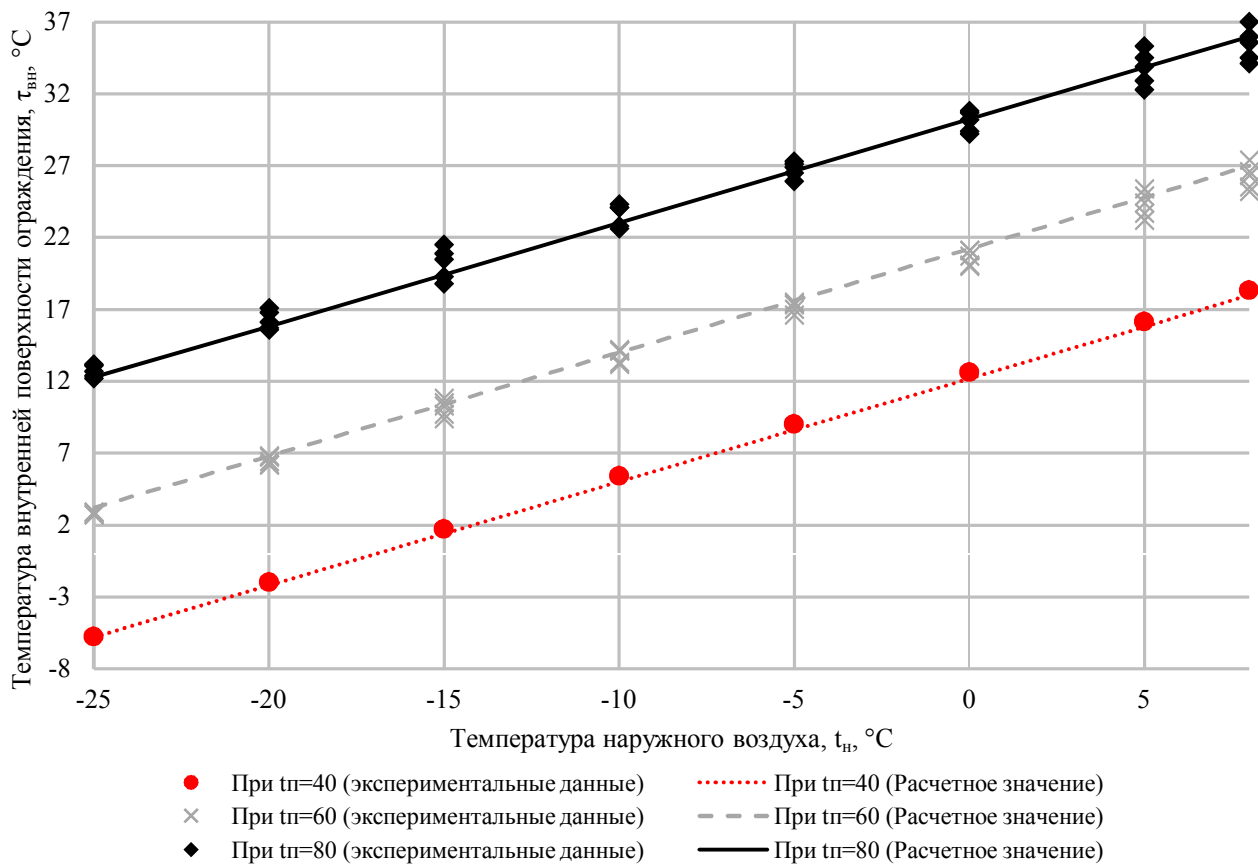


Рисунок 9 – Результаты сравнения теоретически рассчитанных и экспериментально определенных температур внутренней поверхности наружного ограждения при  $\varphi=0,4$

В справочной литературе при расчетах теплообмена в помещениях с лучистым отоплением принимается допущение, что температура внутреннего воздуха численно равна температуре внутренней поверхности наружного ограждения.

Автором настоящей работы были проведены экспериментальные исследования, чтобы подтвердить или опровергнуть это утверждение.

На основании результатов замеров были определены средние температуры воздуха и внутренней поверхности наружного ограждения при разных температурах наружного воздуха, температурах поверхности отопительной панели и при разных значениях углового коэффициента.

Для математической обработки полученных результатов были рассчитаны критерий корреляции Пирсона и критерий Стьюдента. Критерий корреляции Пирсона показывает статистическую значимость выявленной связи между температурами внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружного ограждения. Критическое значение коэффициента корреляции при доверительной вероятности  $\alpha=0,99$  составляет 0,46. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Критерий корреляции Пирсона при различных значениях факторов  $t_{\text{панели}}$ ,  $\varphi$  и  $t_n$

Температура наружного воздуха	При $t_{\text{панели}}=40^{\circ}\text{C}$			При $t_{\text{панели}}=60^{\circ}\text{C}$			При $t_{\text{панели}}=80^{\circ}\text{C}$		
	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

Полученные значения коэффициентов свидетельствуют о весьма высокой силе корреляционной связи.

Для проверки статистической значимости корреляционной связи определяется критерий Стьюдента для разных значений факторов эксперимента. Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Критерий Стьюдента при различных значениях факторов  $t_{\text{панели}}$ ,  $\varphi$  и  $t_{\text{н}}$

Темпера- тура наруж- ного воздуха	При $t_{\text{панели}}=40^{\circ}\text{C}$			При $t_{\text{панели}}=60^{\circ}\text{C}$			При $T_{\text{панели}}=80^{\circ}\text{C}$		
	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	112,7	49,77	30,84	12,79	352,73	179,68	289,8	147,79	490,3
-20	57,67	139,21	467,4	55,49	31,98	72,14	20,42	203,9	36,52
-15	69,87	29,14	254,3	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	131,5	19,32	20,83	17,76	13,6	27,1	29,26	56,31	2004,0
+8	47,32	28,22	23,84	17,39	25,27	1130,1	23,3	23,51	31,88

Критическое значение критерия Стьюдента при уровне значимости  $p=0,01$  составляет  $t_{\text{крит}}=2,763$ . Полученные значения критерия Стьюдента превышают  $t_{\text{крит}}$ , следовательно, корреляционная связь является статистически значимой.

**В четвертой главе** разработана методика расчета и проектирования систем низкотемпературного лучистого отопления. На первом этапе определяют тепловую мощность отопительных приборов. На втором – наиболее предпочтительное расположение излучателей в помещении и температуры внутренних поверхностей ограждений и внутреннего воздуха. Предложенная методика изображена в виде блок-схемы на рисунке 10.

Доказано снижение трансмиссионных потерь через наружные ограждающие конструкции и потерь теплоты на нагрев вентиляционного воздуха при использовании систем лучистого отопления по сравнению с традиционными радиаторными системами. Это достигается за счет того, что по действующим строительным нормам температура внутреннего воздуха при работе лучистого отопления принимается на  $1-3^{\circ}\text{C}$  меньше нормируемой температуры воздуха при конвективном отоплении. Для жилых и общественных зданий эти температуры составляют  $20^{\circ}\text{C}$  для конвективной и  $17-19^{\circ}\text{C}$  для лучистой системы отопления.

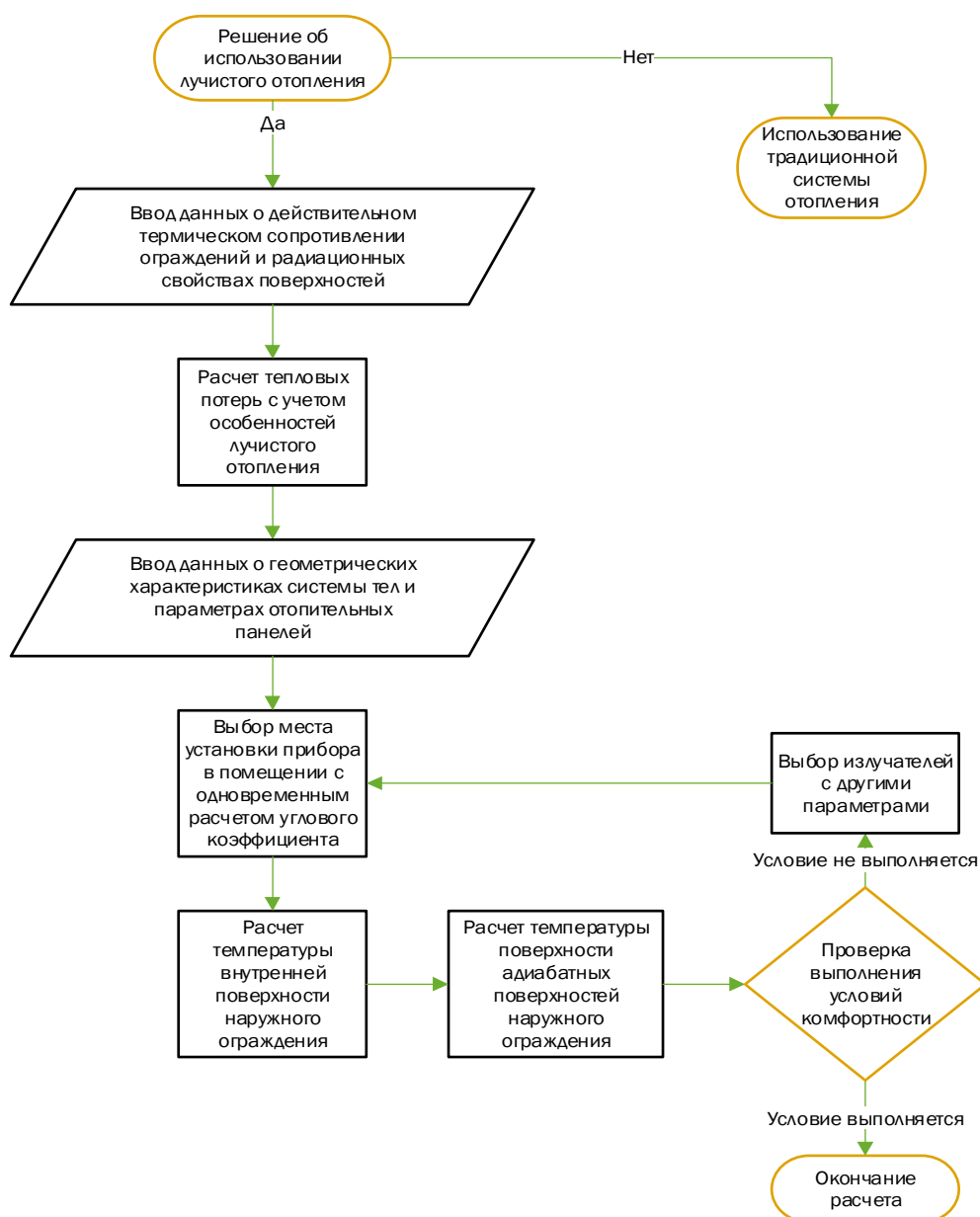


Рисунок 10 – Алгоритм подбора низкотемпературных лучистых отопительных приборов

Результаты расчетов потерь теплоты для г. Макеевки в зависимости от температуры внутреннего и наружного воздуха при прочих равных условиях приведены на рисунках 11 и 12. 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 единицу 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  $17-18^{\circ}\text{C}$  позволяет уменьшить потери теплоты в помещении, поэтому использование такого типа отопления можно рассматривать, как мероприятие по энергоресурсосбережению. При этом поддержание температуры  $19^{\circ}\text{C}$  является экономически нецелесообразным.

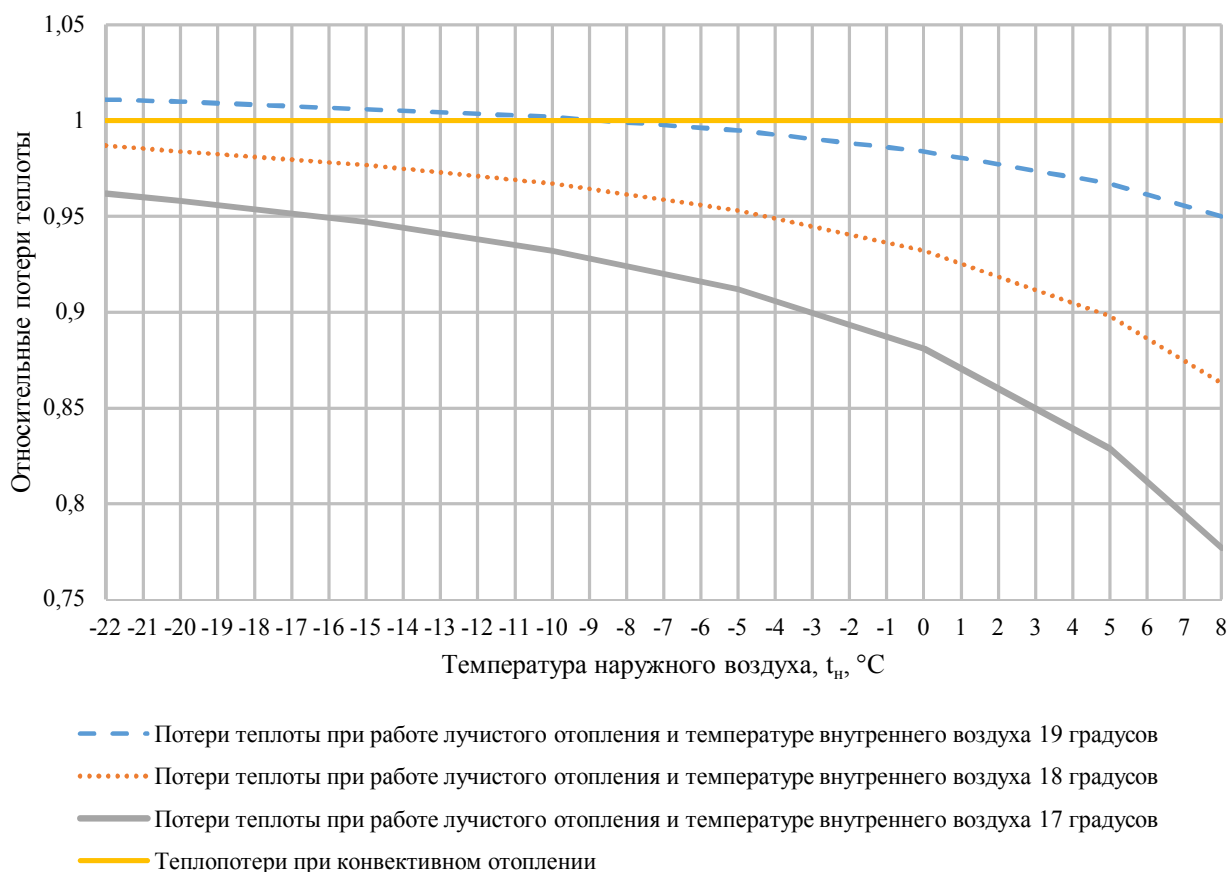


Рисунок 11 – Результаты сравнения трансмиссионных теплопотерь при использовании различных систем отопления для жилого помещения в г. Макеевка

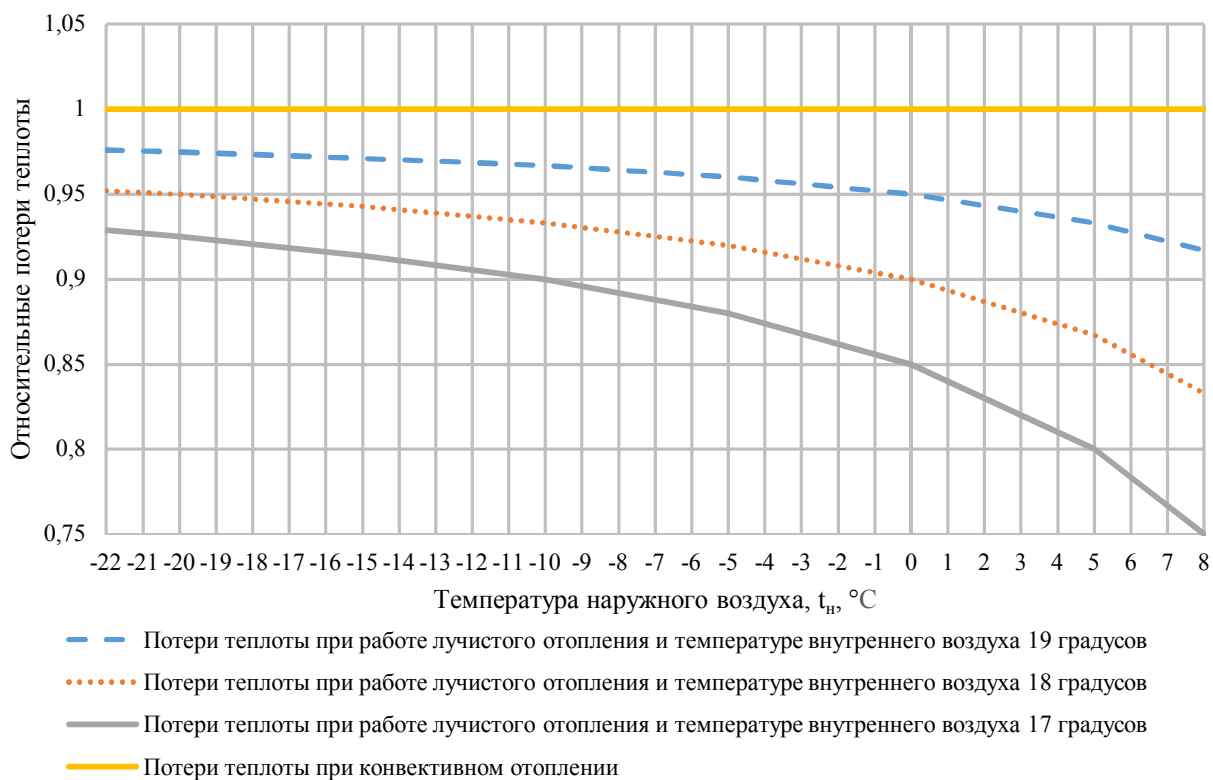


Рисунок 12 – Результаты сравнения теплопотерь на нагрев воздуха при использовании различных систем отопления для жилого помещения в г. Макеевка

В работе производился анализ экономической эффективности работы систем низкотемпературного лучистого отопления. Целью данного анализа является определение экономической эффективности проекта реконструкции систем отопления жилых домов в с. Кожевня Шахтерского района в сравнении с проектом реконструкции систем отопления на базе твердотопливных котлов. В результате получены экономические характеристики обоих проектов.

Для сравнения были выбраны две системы отопления: конвективная и лучистая. Так как обслуживаемые дома находятся на негазифицированной территории, то источником теплоты в конвективной системе выбраны твердотопливные котлы. В качестве топлива выбран уголь Донецкого каменноугольного бассейна с низшей теплотой сгорания  $Q_{н^p}=24,08$  МДж/кг.

В качестве альтернативы выбраны системы лучистого низкотемпературного отопления на базе электрических стеновых панелей.

При определении годовых эксплуатационных затрат и себестоимости выработки тепла учитывались капитальные вложения, включающие прямые расходы, общепроизводственные расходы, стоимость оборудования с отчислениями, затраты на проектные и изыскательные работы, и годовые эксплуатационные затраты.

Годовой экономический эффект от использования системы отопления с электрическими панелями для мансардного дома площадью 99,3 м<sup>2</sup> составляет 13845 руб./год; для двухкомнатного дома площадью 49,4 м<sup>2</sup> составляет 7043 руб./год; для однокомнатного дома – 5343 руб./год. Срок окупаемости проекта не превышает пяти лет.

В итоге было установлено, что экономия в этом случае составляет до 140 руб. на каждый м<sup>2</sup> отапливаемой площади в отопительный сезон.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о целесообразности использования систем низкотемпературного лучистого отопления для жилых и общественных зданий (в особенности малоэтажной застройки) в качестве основного источника теплоты.

## **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 коэффициентов 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 м<sup>2</sup> отапливаемого помещения за отопительный период при сроке окупаемости 4,4 года.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Шацков, А.О. Перспективи і проблеми впровадження інфрачервоного опалення в Україні [текст] / А.О. Шацков, С.І. Монах // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій – 2013. – Вып. 3 (101). – С. 141-145 (*выполнено аналитическое исследование перспектив использования электрического инфракрасного отопления*).

2. Монах, С.И. Проблемы выбора источника теплоты для автономной системы теплоснабжения [текст] / С.И. Монах, Д.В. Выборнов, А.О. Шацков // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Інженерні системи та техногенна безпека. – 2013. – Вып. 5 (103). – С. 99-104 (*выявлены проблемы проектирования и подбора современного отопительного оборудования*).

3. Шацков, А.О. Расчет угловых коэффициентов при решении задач лучистого теплообмена в помещениях с инфракрасным отоплением [текст] / А.О. Шацков, Г.А. Кононыхин, С.И. Монах // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукове методичне, практичне забезпечення містобудування територіального стратегічного планування. – 2014. – Вып. 3 (107). – С. 41-46 (*разработана методика расчета средних диффузных угловых коэффициентов*).

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных Министерством образования и науки ДНР:

4. Шацков, А.О. Теоретические аспекты использования низкотемпературных систем лучистого отопления в жилых зданиях [текст] / А.О. Шацков, В.Л. Вакулович, А.В. Лыхач // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная

безопасность. – 2017. – Вып. 5 (127) – С. 99-102 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2017/vestnik\\_2017-5%28127%29.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-5%28127%29.pdf) (*определено влияние низкотемпературных отопительных приборов на параметры микроклимата жилого помещения*).

**– публикации в зарубежных рецензируемых периодических изданиях**

5. Шацков, А.О. Теплопотери помещения, оборудованного низкотемпературным лучистым отоплением [текст] / А.О. Шацков, А.А. Перерва // *Colloquium-journal*. – 2018. – Vol. 4(15) – Warsaw – P. 13-16 (*доказано снижение тепловых потерь в помещении при использовании низкотемпературного лучистого отопления*).

**– публикации в других изданиях**

6. Шацков, А.О. Математическая модель теплообмена излучением при лучистом отоплении [текст] / А.О. Шацков, С.И. Монах // Сборник трудов II Международной научно-технической конференции «Энергетические системы», Белгород. – 2017. – С. 471-477 (*получено регрессионное уравнение в натуральном масштабе, являющееся экспериментально-статистической моделью лучистого теплообмена*).

7. Шацков, А.О. Экономическая эффективность работы систем низкотемпературного лучистого отопления [текст] / Шацков А.О. // Актуальные проблемы развития городов: Электронный сборник статей по материалам II открытой республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов (Макеевка, 2018 г.). – Макеевка: ДонНАСА, 2018. – С. 622-627. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.donnasa.ru/publish\\_house/journals/studconf/2018/Sbornik\\_APRG\\_2018.pdf](http://www.donnasa.ru/publish_house/journals/studconf/2018/Sbornik_APRG_2018.pdf)