

На правах рукописи

Суханов

Суханов Кирилл Олегович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА
ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ
ПЛИНТУСНЫМИ СИСТЕМАМИ
ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ**

Специальность 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Пухкал Виктор Алексеевич.

Официальные оппоненты **Кочев Алексей Геннадьевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»
(ННГАСУ), кафедра теплогазоснабжения,
заведующий кафедрой;

Малявина Елена Георгиевна,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет» (НИУ МГСУ), кафедра
теплогазоснабжения и вентиляции, профессор.

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова».**

Защита состоится «15» декабря 2021 года в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, аудитория 220. Тел./факс (812) 316-58-73. E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/cuhanov-kirill-olegovich>

Автореферат разослан 25 октября 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. А. Пухкал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования определяется необходимостью обеспечения нормируемых параметров микроклимата в помещениях существующих и возводимых жилых и общественных зданий при сокращении энергопотребления. Для решения данной задачи применяются системы плинтусного отопления. Использование плинтусных отопительных приборов конвекторного типа повышает радиационную температуру помещения за счет настипания конвективной струи нагретого воздуха на поверхность ограждающей конструкции. Благодаря таким системам возможно снижение температуры внутреннего воздуха без снижения комфорта. Системы водяного плинтусного отопления применяются в помещениях общественных зданий с панорамными окнами или с низкими подоконниками.

При использовании системы водяного плинтусного отопления прогревается нижняя зона помещения, включая ограждающие конструкции, и обеспечивается равномерное распределение температур по высоте и площади помещений.

Для эффективного использования систем водяного отопления с плинтусными конвекторами в жилых зданиях с естественным притоком наружного воздуха необходимы дополнительные исследования.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы микроклимата помещений жилых и общественных зданий, а также расчета, конструирования и применения систем плинтусного отопления, занимались многие отечественные ученые: А.К. Андреевский, В.Н. Богословский, Т.А. Дацюк, А.Г. Егиязаров, П.Н. Каменев, А.Г. Кочев, Е.Г. Малявина, В.А. Пухкал, А.Н. Сканава, В.Р. Таурит, С.М. Усиков, В.П. Щеглов, и др. Большое внимание системам плинтусного водяного отопления с настенным размещением приборов конвекторного типа уделено в работах зарубежных ученых A. Ploskić, Q. Chen, S. Peng, F. Peterson, A.A. Elmualim, H.B. Awbi, M.A. Juusela, F. Molin, S. Holmberg, T. Omori и др.

Цель исследования: совершенствование систем водяного плинтусного отопления с отопительными приборами конвекторного типа в помещениях жилых и общественных зданий на основе исследования теплового режима отапливаемых помещений.

Задачи исследования:

- выявить особенности и область применения систем водяного отопления с плинтусными отопительными приборами конвекторного типа;
- разработать численные модели отопительного прибора и помещения для исследования процессов теплообмена и аэродинамики воздушных

потоков в жилых помещениях с плинтусными отопительными приборами конвекторного типа;

- выполнить экспериментальные исследования системы водяного отопления с плинтусными отопительными приборами;

- выполнить экспериментальные исследования теплового режима отапливаемых жилых помещений с системами естественной вентиляции для притока воздуха и плинтусными системами водяного отопления;

- разработать численную модель испытательной камеры для исследования в ней работы отопительного прибора плинтусного типа;

- выполнить экспериментальные исследования плинтусного отопительного прибора конвекторного типа в испытательной камере для определения особенностей их применения;

- разработать рекомендации по проектированию систем водяного плинтусного отопления для помещений жилых и общественных зданий.

Объект исследования – плинтусная система водяного отопления с отопительными приборами конвекторного типа.

Предмет исследования – параметры микроклимата помещений при работе плинтусной системы отопления с приборами конвекторного типа.

Методология и методы исследования: сравнительный анализ; стандартные методики испытания отопительных приборов; обследование объекта методом тепловизионной съемки; методы численного моделирования.

Научная новизна исследования:

- процессы формирования температуры внутренних поверхностей ограждений при применении плинтусных систем отопления конвекторного типа;

- численные модели системы водяного отопления с плинтусными отопительными приборами конвекторного типа;

- закономерности формирования параметров микроклимата в жилых помещениях системой водяного плинтусного отопления с отопительными приборами конвекторного типа;

- численная модель испытательной камеры для исследования работы отопительных приборов плинтусного типа;

- зависимости для определения теплового потока водяных конвекторов плинтусного типа.

Теоретическая значимость работы состоит в установлении закономерностей формирования параметров микроклимата в помещениях жилых и общественных зданий системой водяного плинтусного отопления с отопительными приборами конвекторного типа.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по использованию конвекторов плинтусного типа в помещениях жилых и общественных зданий.

Положения, выносимые на защиту:

- процессы формирования температуры внутренних поверхностей ограждений при применении плintусных систем отопления конвекторного типа;
- закономерности формирования параметров микроклимата в жилых помещениях системой водяного плintусного отопления с отопительными приборами конвекторного типа;
- численная модель испытательной камеры для исследования работы плintусных отопительных приборов конвекторного типа;
- зависимости для определения теплового потока водяных конвекторов плintусного типа;
- рекомендации по проектированию систем плintусного водяного отопления.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается использованием методов математического анализа с применением современного программного обеспечения; правомерностью принятых допущений; сходимостью результатов моделирования с данными, полученными экспериментальным путем.

Основные результаты работы докладывались на 74-ой, 75-ой, 76-ой конференциях профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета (СПбГАСУ, 2018-2020 гг.), VII Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» (НИУ МГСУ, 2018).

Результаты диссертационного исследования были апробированы в АО «Фирма Изотерм» (г. Санкт-Петербург) и Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете. Организационными представителями представлены акты о внедрении научных результатов.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 печатных работах общим объемом 2,39 п.л., лично автором – 1,23 п.л., в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, утвержденных ВАК РФ, и 1 работа в издании, входящем в базу SCOPUS.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5-и глав с выводами по каждой из них, заключения и 2 приложений, содержит 133 страницы печатного текста и 2 страницы приложений, 7 таблиц, 81 рисунок и список литературы из 128 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, приведена научная новизна исследования, представлена практическая значимость полученных результатов, а также приведены сведения об апробации и публикациях.

В первой главе приведена классификация плинтусных отопительных приборов конвекторного типа; изучен тепловой комфорт в помещении при применении систем плинтусного отопления. Проанализирован опыт использования систем водяного плинтусного отопления.

Во второй главе разработана схема экспериментальной установки; проведены лабораторные исследования системы водяного плинтусного отопления; получена зависимость теплового потока отопительного прибора от относительного температурного напора; проведена тепловизионная съемка ограждающих конструкций в помещении с работающей системой плинтусного водяного отопления; получено распределение температуры поверхности стены и пола при работе системы; выполнено численное моделирование исследуемого конвектора, размещенного в лаборатории; доказана адекватность численной модели.

В третьей главе разработана численная модель системы водяного плинтусного отопления с конвектором «Best Board» в жилом помещении с подачей приточного воздуха через регулируемые оконные створки с параллельным смещением; проанализированы термограммы потока воздуха от окна и термограммы внутренней поверхности наружной стены; получены температурные поля в помещении; разработана численная модель системы водяного плинтусного отопления с конвектором ПЛК в жилом помещении при одинарной и двойной установке плинтусного конвектора на наружной стене.

В четвертой главе разработана численная модель испытательной камеры с расположенным в ней плинтусным отопительным прибором конвекторного типа; проведено исследование зависимости теплового потока плинтусного конвектора от расхода теплоносителя и температурного напора; получено изменение температуры воздуха по высоте камеры (в центре) при различных температурах охлаждаемых поверхностей.

В пятой главе приведены рекомендации по проектированию систем водяного плинтусного отопления с отопительными приборами конвекторного типа.

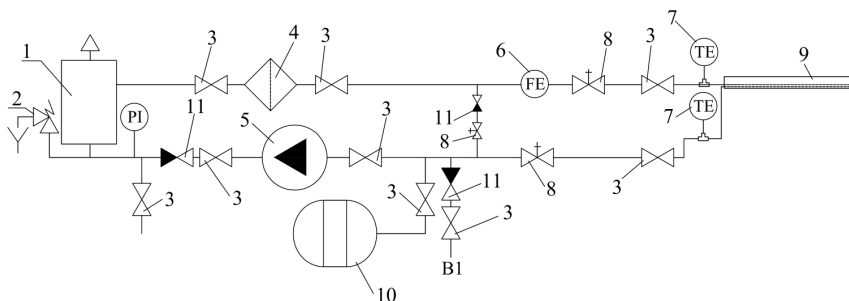
В заключении приведены основные выводы по работе.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Процессы формирования температуры внутренних поверхностей ограждений при применении плинтусных систем отопления конвекторного типа.

Исследования процессов формирования температуры внутренних поверхностей ограждений помещений выполнены в лаборатории кафедры теплогазоснабжения и вентиляции СПбГАСУ на тепловом стенде для исследования работы систем отопления (рисунок 1).

а)



б)



в)



Рисунок 1 – Экспериментальный стенд для исследования системы водяного плинтусного отопления: (а) – схема стенда: 1 – электрокотел «Северянин 9»; 2 – группа безопасности котла; 3 – кран шаровой; 4 – фильтр водяной; 5 – насос циркуляционный; 6 – ультразвуковой датчик расхода теплосчетчика «Multical UF» Dy20; 7 – температурный датчик теплосчетчика; 8 – балансировочный клапан; 9 – испытываемый отопительный прибор; 10 – расширительный бак Reflex; 11 – обратный клапан; (б) – вид стенда; (в) – плинтусный отопительный прибор конвекторного типа

В качестве отопительного прибора принят плинтусный конвектор типа «Best Board» высотой 140 мм и шириной 30 мм. Нагревательный элемент отопительного прибора состоит из двух медных труб наружным

диаметром 13 мм и толщиной 1 мм с латунным оребрением. Исполнение прибора – концевое. Отопительный прибор установлен на внутренней перегородке лаборатории.

Измерения теплового потока выполнены в диапазоне изменения параметров:

- массовый расход теплоносителя через отопительный прибор – $G = 54 \div 374$ кг/ч;
- температура теплоносителя на входе в отопительный прибор t_1 – до 95°C ;
- температурный напор – $\theta = 37 \div 71^\circ\text{C}$;
- схемы движения теплоносителя через отопительный прибор: сверху-вниз и снизу-вверх;
- атмосферное давление – 1013 гПа.

Выполнена тепловизионная съемка работающей системы водяного плинтусного отопления (рисунок 2). Установлено, что над отопительным прибором образуется восходящая конвективная струя, настилающаяся на ограждение и повышающая её температуру. Пример графика изменения температуры поверхности стенки над плинтусным конвектором при удельном тепловом потоке, равном 200 Вт/м длины плинтуса, приведен на рисунке 3, а для пола – на рисунке 4.



Рисунок 2 – Тепловизионный снимок системы
водяного плинтусного отопления

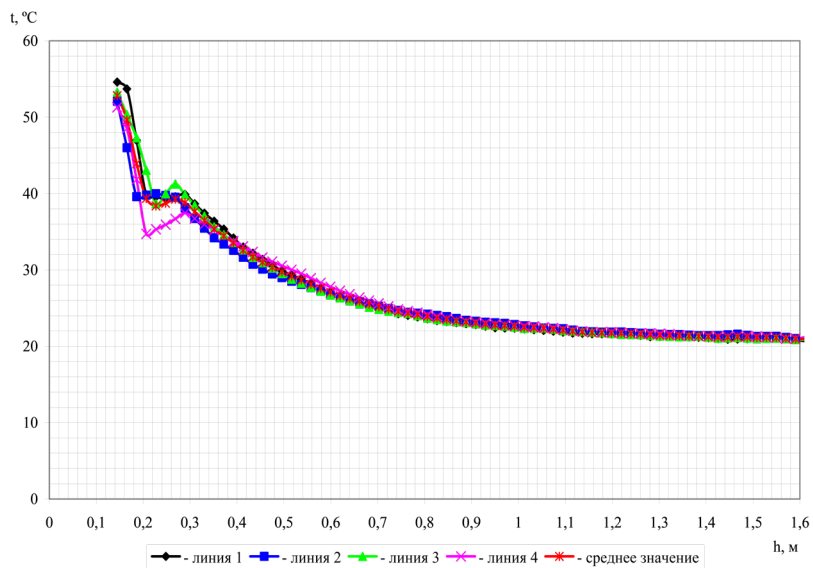


Рисунок 3 – Изменение температуры поверхности стены по высоте (линии L1-L4 указаны на рисунке 2)

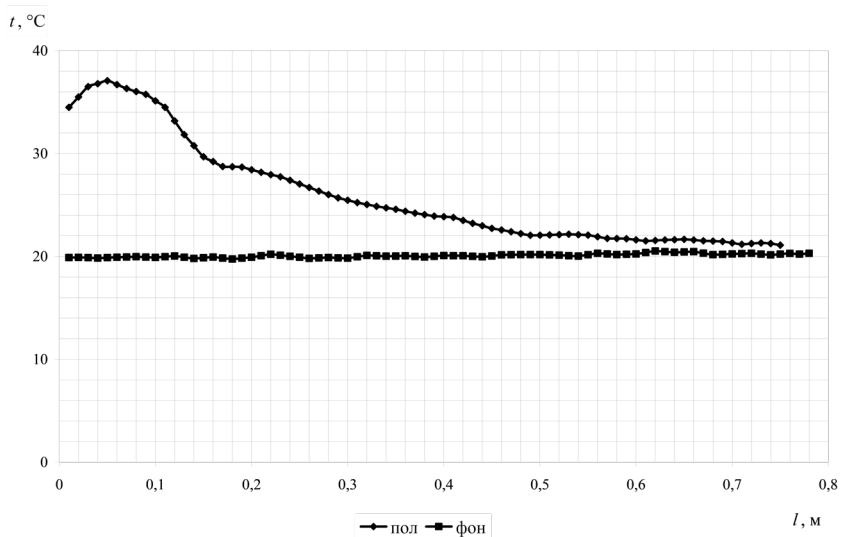


Рисунок 4 – Изменение температуры поверхности пола помещения по длине помещения от плинтусного конвектора

Анализ изменения температуры поверхности стенки и пола в зависимости от расстояния от отопительного прибора позволяет сделать следующие выводы:

- конвективный тепловой поток над отопительным прибором повышает температуру ограждения в прилегающей зоне в среднем на 9°C ; зона повышенных температур достигает высоты 1,4 м;

- лучистый тепловой поток от отопительного прибора повышает температуру пола в прилегающей зоне в среднем на 8°C ; зона повышенных температур достигает 0,8 м.

Разработана численная модель отопительного прибора и помещения лаборатории для исследования процессов теплообмена и аэродинамики воздушных потоков в помещениях с плинтусными отопительными приборами конвекторного типа. Модели помещения лаборатории и исследуемого плинтусного отопительного прибора построены в программном комплексе системы автоматизированного проектирования SolidWorks. Численное исследование выполнено в программе Star-CCM+.

Построена конечнообъемная расчетная сетка размерностью 20 млн. ячеек с призматическими слоями у поверхности стенки (рисунок 5) и измельчением у поверхности теплообменного элемента отопительного прибора. Получены поля температур внутренней поверхности стены и пола в помещении (рисунок 6).

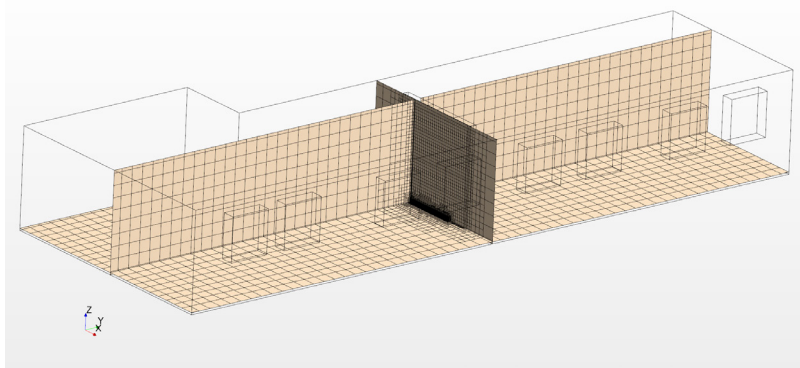


Рисунок 5 – Расчетная сетка помещения

Выполнен анализ адекватности математической модели. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными при тепловизионной съёмке (рисунок 7).

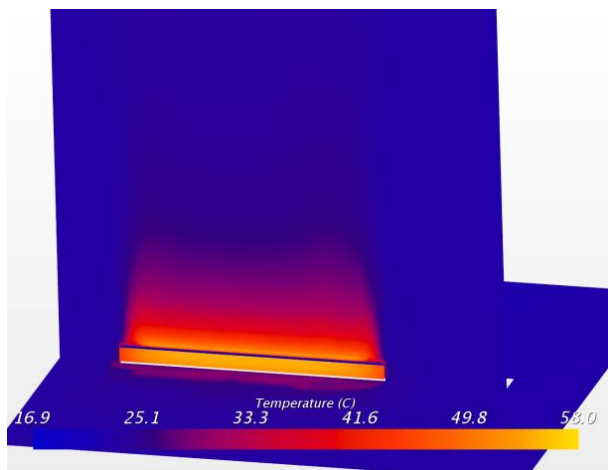


Рисунок 6 – Термограмма поверхности стены и пола помещения при численном моделировании

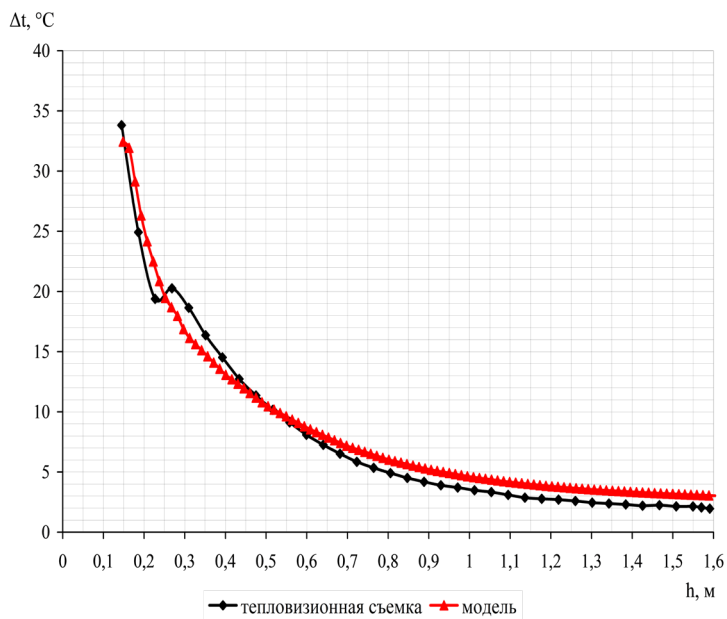


Рисунок 7 – Отклонение температуры поверхности стены по высоте от фоновых значений

Сравнение выполнялось по величине отклонения значений температуры стенки от фоновых значений. Статистическое сравнение данных экспериментальных исследований выполнено по F -критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера меньше табличного $F = 1,067 < F_{\tau(0,05;1;68)} = 3,982$, соответственно, математическая модель плintусного конвектора адекватно описывает распределение температур на поверхности стенки.

2. Закономерности формирования параметров микроклимата в помещениях жилых систем водяного плintусного отопления с отопительными приборами конвекторного типа.

Для исследования теплового режима жилых помещений (закономерностей формирования параметров микроклимата) разработаны численные модели плintусных отопительных приборов и помещения.

Принято помещение с размерами, характерными для жилых зданий: ширина (между осями) – 3 м; глубина – 6 м; высота (разность отметок чистого пола двух этажей) – 3 м. Ориентация наружной стены – на юг. Размеры окна – 1,4×1,5 м. Расчетная температура наружного воздуха в холодный период года (по параметрам Б) – минус 24 °С. Расчетная температура внутреннего воздуха – плюс 20 °С. Тепловые потери помещения с учетом бытовых тепловыделений равны 898 Вт, в том числе 796 Вт – тепловой поток на нагревание инфильтрующегося наружного воздуха.

Подача приточного наружного воздуха производится через регулируемые оконные створки с параллельным смещением. Удаление воздуха из помещения выполняется через щель высотой 0,02 м, образованную поверхностью пола и нижней поверхностью створки внутренней двери, расположенной по оси помещения напротив окна.

Принятая система естественной приточной вентиляции позволяет обеспечить качество внутреннего воздуха.

Моделировался плintусный отопительный прибор конвекторного типа «Best Board», который установлен на наружной стене помещения вместо плintуса.

При удельном тепловом потоке плintусного отопительного прибора 330 Вт/м полностью восполняются потери теплоты помещения (с запасом 10 %).

Нисходящий поток охлажденного у поверхности остекления окна и приточного наружного воздуха поступает в обслуживаемую зону помещения со скоростью 0,3 м/с, что превышает допустимое значение скорости воздушного потока, равное 0,2 м/с (рисунок 8). Поток опускается к поверхности пола на расстоянии 1,2 м от наружной стены, т.е. в пределах зоны обитания.

Восходящие потоки воздуха от отопительного прибора за пределами окна поднимаются в верхнюю зону помещения, что приводит к её перегреву, –

температура воздуха достигает 24 °С (рисунок 9). В помещении наблюдается значительная температурная стратификация – от 20 до 24 °С по высоте помещения, а в зоне действия опускающейся к поверхности пола струи – от 17 до 24 °С.

STAR-CCM+

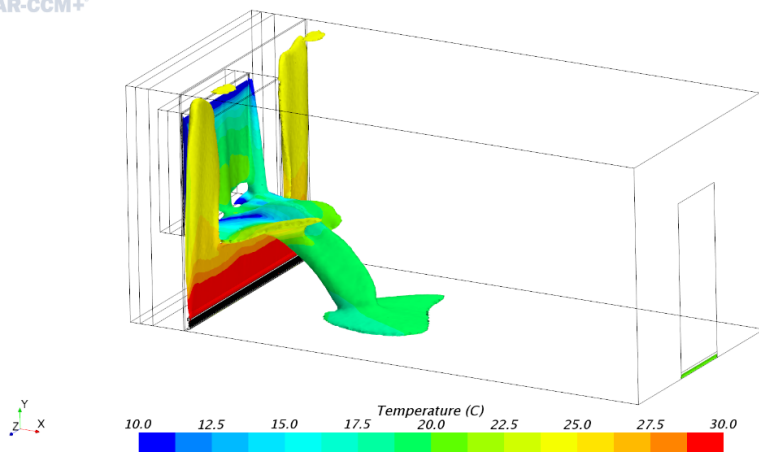


Рисунок 8 – Термограммы потока воздуха от окна при удельном тепловом потоке плитного конвектора 330 Вт/м (изотакса 0,3 м/с)

STAR-CCM+

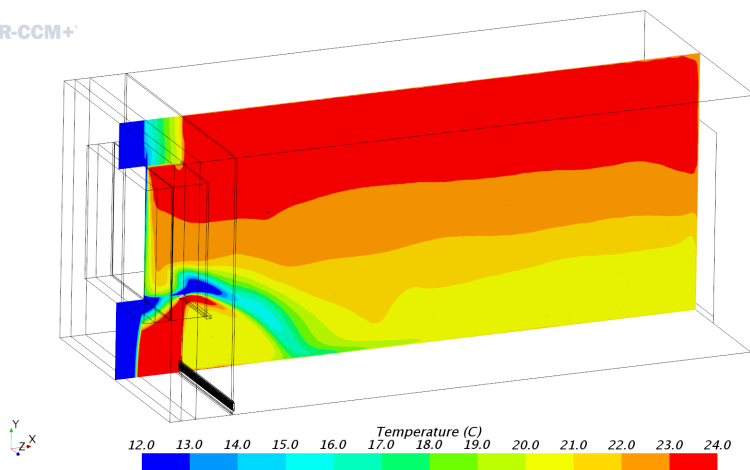


Рисунок 9 – Температурное поле в сечении по оси помещения при удельном тепловом потоке плитного конвектора 330 Вт/м

Температура на поверхности наружной стены не ниже 21 °С, а непосредственно над прибором достигает 40 °С. Самая низкая температура наблюдается на поверхности остекления – плюс 12 °С.

Горизонтальные стыки наружных стен в зоне опирания перекрытия имеют температуру: у пола – плюс 24 °С; у потолка – плюс 20 °С.

Исследован вариант работы системы отопления при отсутствии бытовых теплопоступлений и тепловом потоке плинтусного отопительного конвектора – $Q = 889$ Вт. Прибор установлен на наружной стене помещения.

В программе STAR CCM+ построена численная модель работы плинтусного конвектора ПЛК в жилом помещении.

Тепловые и скоростные поля в сечениях по оси отопительного прибора и оси помещения представлены на рисунках 10 и 11.

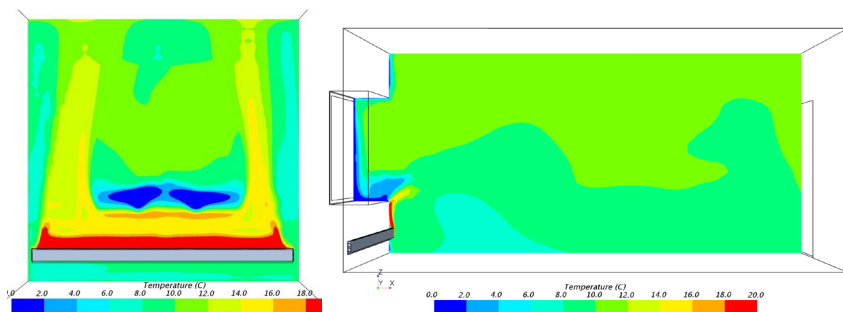


Рисунок 10 – Тепловые поля в помещении при одинарной установке плинтусного конвектора на наружной стене

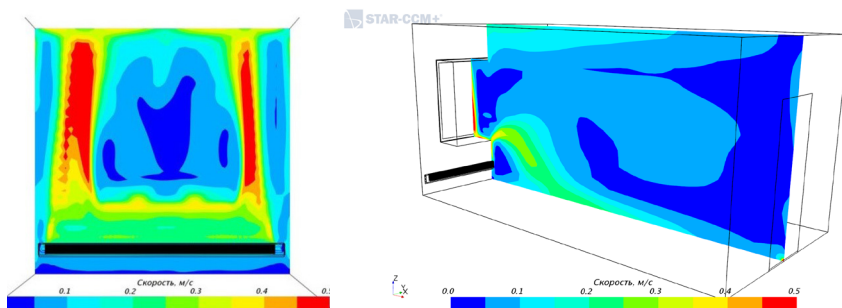


Рисунок 11 – Скоростные поля в помещении при одинарной установке плинтусного конвектора на наружной стене

Тепловые потери помещения при расчетной температуре наружного воздуха без учета бытовых тепловыделений составили – $Q_{\text{пот}} = 1074$ Вт.

При отсутствии бытовых тепловыделений осредненная по объему температура воздуха в жилом помещении ($t_{\text{в}} = 9,6$ °C) ниже нормируемых значений ($t_{\text{в}} = 20$ °C) и струя холодного приточного воздуха поступает на пол помещения. Следовательно, при определении теплового потока, компенсируемого отопительными приборами систем отопления жилых помещений, не следует учитывать бытовые тепловыделения.

Рассмотрен вариант установки двух рядов плинтусных конвекторов по вертикали на наружной стене (рисунки 12 и 13).

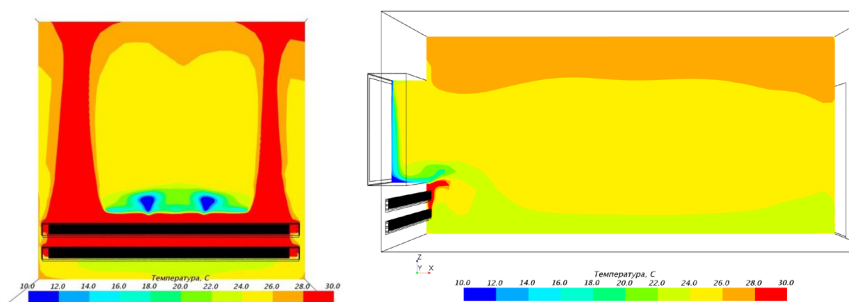


Рисунок 12 – Тепловые поля в помещении при установке плинтусного конвектора в два ряда на наружной стене

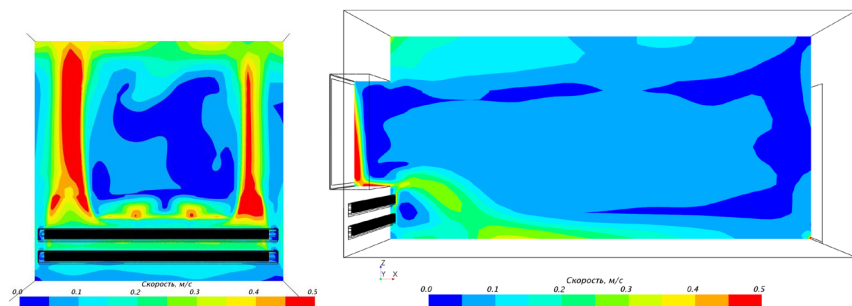


Рисунок 13 – Скоростные поля в помещении установке плинтусного конвектора в два ряда на наружной стене

Суммарный тепловой поток отопительных приборов – $Q = 1118$ Вт, т.е. запас теплопроизводительности относительно расчетного значения – 4,1 %.

Фактические тепловые потери при расчетной температуре внутреннего воздуха по результатам расчета составляют 1007 Вт и фактический запас теплопроизводительности отопительных приборов – 11 %.

По результатам расчета температура воздуха на уровне пола изменяется от 22 до 24 °С, что соответствует нормируемым значениям, а скорость – до 0,4 м/с (на уровне нижней границы обслуживаемой зоны помещения – 0,35 м/с). Струя подогретого приточного воздуха также опускается в нижнюю зону помещения. Скорость движения воздуха, осредненная по объему зоны обитания жилого помещения, составляет 0,14 м/с. Площадь дискомфортной зоны по скорости воздуха составляет не более 10 % площади обслуживаемой зоны помещения. Перепад температуры воздуха по высоте, равный 3 °С, является допустимым для жилых помещений.

3. Численная модель испытательной камеры для исследования работы отопительных приборов плинтусного типа.

В программе Solidworks построена твердотельная модель испытательной камеры с расположенным в ней плинтусным конвектором. Размеры испытательной камеры: длина – 4 м; ширина – 4 м; высота – 3 м.

Модель была загружена в программу STAR-CCM+. Математическая модель состоит из двух объектов: камеры и отопительного прибора.

Камера разбита на следующие границы (рисунок 14):

- боковые стены камеры, подключенные к системе охлаждения;
- стена за испытуемым прибором, состоит из неохлаждаемого и охлаждаемого участков;
- неохлаждаемая стена напротив испытуемого прибора;
- неохлаждаемый пол.

В границы камеры включены те части отопительного прибора, которые непосредственно контактируют с воздухом (труба, пластины, кожух).

Участок 2 стены, у которой установлен отопительный прибор, утеплен по всей длине на высоту 1 м от пола. Термическое сопротивление утепляющего слоя – 2 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт.

Пол и стена, противоположная ограждению, на котором размещен отопительный прибор, имеют термическое сопротивление 0,5 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт.

Температура окружающего камеру воздуха – плюс 20 °С.

Прибор разбит на отдельные границы (труба, пластины, кожух). Внутри трубы отдельной областью создана вода, которая разбита на границы: вход в трубу, выход из трубы и часть, находящуюся непосредственно в трубе.

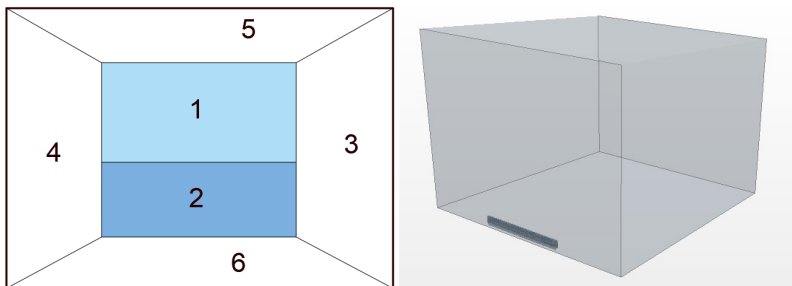


Рисунок 14 – Камера для испытаний отопительных приборов

1 – водоохлаждаемая часть стены, у которой установлен испытуемый прибор;
 2 – теплоизолированный участок стены, у которой установлен отопительный прибор; 3 – правая водоохлаждаемая стена; 4 – левая водоохлаждаемая стена;
 5 – водоохлаждаемый потолок; 6 – неохлаждаемый пол

Созданы четыре вида физических условий (воздушного пространства; медных труб; алюминиевых пластин и кожуха; воды) и интерфейсы для передачи информации от одного объекта к другому.

Для каждого варианта расчета строилась расчетная сетка с измельчением у отопительного прибора. Общее количество ячеек сетки составило более 3 млн.

Для исследования в камере принят плинтусный конвектор ПЛК 04.14.150 (производитель – АО «Фирма Изотерм»).

По результатам расчетов получено распределение температуры воздуха по высоте в центре камеры при температурах охлаждаемых поверхностей, t_n , в интервале от 16 до 20 °С (рисунок 15).

Наличие и величина градиента температур воздуха в камере связаны с развитием конвективной струи над отопительным прибором. Эта струя, развиваясь сначала у стены, на которой установлен отопительный прибор, а затем под потолком в горизонтальном направлении; способствует перегреву верхней зоны камеры.

При испытаниях отопительных приборов в качестве расчетной (определяющей) температуры воздуха принимается полусумма температур воздуха на расстоянии 0,05 ($t_{0,05}$, °С) и 1,5 м ($t_{1,5}$, °С) от пола на центральной оси симметрии, перпендикулярной к основанию испытательной камеры.

На высоте над уровнем пола до 0,2 м отсутствует градиент температуры воздуха и с такой температурой воздух подтекает к отопительному прибору, поэтому целесообразно принимать в качестве определяющей температуры значение, полученное на высоте 0,05 м, а не среднее значение из измеренных на высотах 0,05 и 1,5 м.

Изменение температуры охлаждаемых потолка и стенок от 16 до 20 °С влияет как на конвективную, так и лучистую составляющие теплового потока отопительных приборов. При понижении температуры охлаждаемых поверхностей на 1 °С тепловой поток отопительного прибора возрастает на 2,2 %. Поэтому при виртуальных испытаниях плинтусных конвекторов должна быть проведена серия испытаний для определения номинального теплового потока.

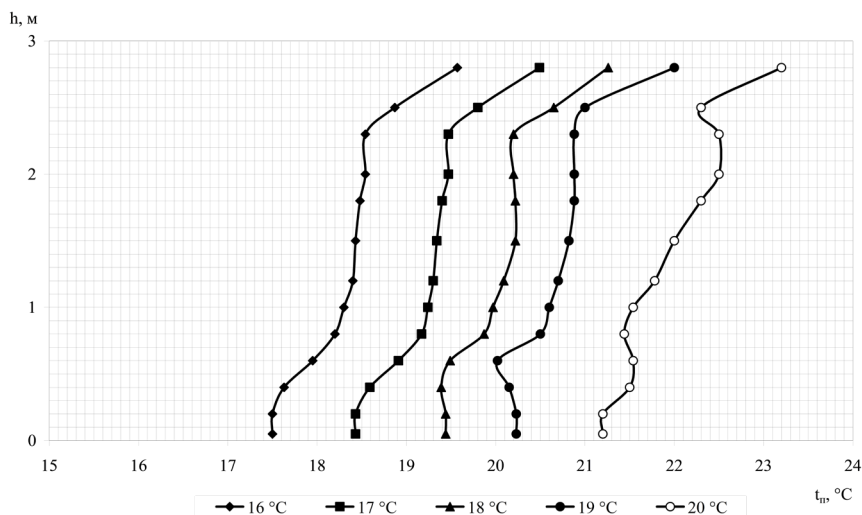


Рисунок 15 – Изменение температуры воздуха по высоте камеры (в центре) при различных температурах охлаждаемых поверхностей (температура теплоносителя на входе в отопительный прибор – 90 °С; расход теплоносителя – 0,1 кг/с)

4. Зависимости для определения теплового потока водяных конвекторов плинтусного типа.

Установлено, что минимальное значение расхода теплоносителя, при котором начинает уменьшаться коэффициент теплопередачи от теплоносителя к воздуху соответствует граничному значению числа Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{дж}} = \frac{w \cdot d_1}{\nu_{\text{ж}}} = 2200, \quad (1)$$

где w – скорость движения теплоносителя в трубке конвектора, м/с; d_1 – внутренний диаметр трубки конвектора, м; $\nu_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость воды, м²/с.

Исследование зависимости теплового потока плинтусного конвектора при различных схемах движения теплоносителя (сверху-вниз и снизу-вверх) выполнено на лабораторном стенде (рисунок 1, 16) для прибора «Best Board».

Статистическое сравнение данных экспериментальных исследований зависимости теплового потока при схемах движения теплоносителя сверху-вниз и снизу-вверх от температурного напора выполнено по F -критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера меньше табличного:

$$F = 1,049 < F_{\tau(0,05;1;61)} = 3,998, \quad (2)$$

соответственно, схема движения теплоносителя в плинтусном конвекторе не влияет на тепловой поток и результаты испытания могут быть обобщены в виде одной зависимости (рисунок 16)

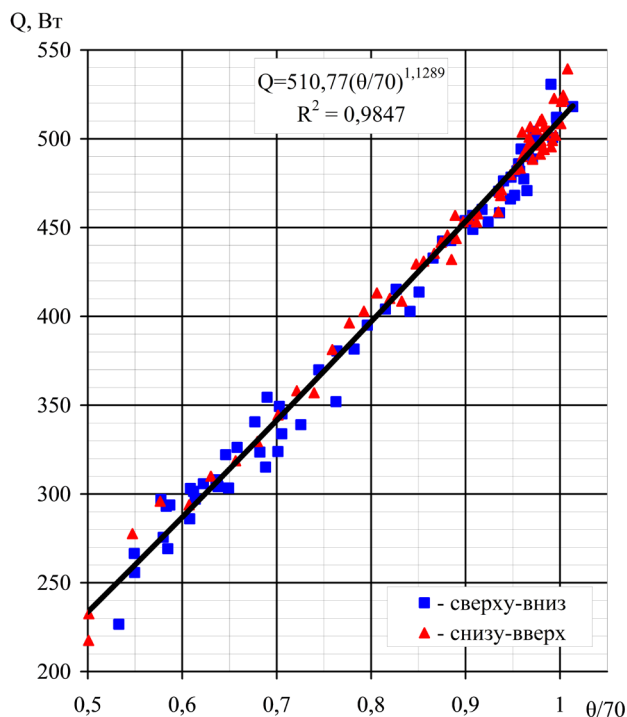


Рисунок 16 – Зависимость теплового потока отопительного прибора от относительного температурного напора при схемах движения теплоносителя «сверху-вниз» и «снизу-вверх»

$$Q = 511 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{1,13}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где θ – температурный напор

$$\theta = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_b, ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

здесь t_1 и t_2 – соответственно, температуры теплоносителя на входе и выходе отопительного прибора, $^\circ\text{C}$; t_b – температура воздуха в отапливаемом помещении, $^\circ\text{C}$; $\theta_0 = 70 ^\circ\text{C}$ – температурный напор при нормальных условиях.

Коэффициент детерминации (величина достоверности аппроксимации) – $R^2 = 0,9847$, что свидетельствует о хорошем качестве модели.

При виртуальных испытаниях в испытательной камере плитусного конвектора ПЛК 04.14.150 получено значение номинального теплового потока при нормальных условиях:

– $Q_0 = 514$ Вт – при номинальном температурном напоре с определяющей температурой воздуха, равной температуре на высоте 0,05 м;

– $Q_0 = 519$ Вт – при номинальном температурном напоре с определяющей температурой воздуха, равной средней температуре на высоте 0,05 и 1,5 м.

При обработке данных испытаний в диапазоне расходов теплоносителя $0,00833 \div 0,1$ кг/с ($30 \div 360$ кг/ч) при температурном напоре с определяющей температурой воздуха, равной средней температуре на высоте 0,05 и 1,5 м, получена зависимость теплового потока отопительного прибора от расхода теплоносителя и температурного напора

$$Q = 519 \left(\frac{\theta}{70} \right)^{1,5408} \left(\frac{G}{0,1} \right)^{-0,0027}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где G – расход теплоносителя, кг/с.

Значения показателей степени округляются до двух десятичных знаков после запятой (ГОСТ Р 53583-2009). В этом случае показатель степени при относительном расходе равен нулю и при обработке данных не должно учитываться влияние расхода теплоносителя на тепловой поток отопительного прибора.

При обработке данных испытаний без учета влияния расхода теплоносителя получена зависимость

$$Q = 520 \left(\frac{\theta}{70} \right)^{1,49}, \text{ Вт}. \quad (6)$$

Коэффициент детерминации (величина достоверности аппроксимации) – $R^2 = 0,9878$ (модель хорошего качества).

5. Рекомендации по проектированию систем плинтусного водяного отопления.

На основании обобщения данных выполненных экспериментальных исследований систем плинтусного отопления для помещений жилых зданий с использованием систем естественной вентиляции для притока воздуха разработаны рекомендации по проектированию систем водяного плинтусного отопления.

Скорость движения теплоносителя в трубах конвектора должна быть не менее рассчитанной по минимальному значению числа Рейнольдса – $Re_{dk.min} = 2200$.

Рекомендуется не учитывать влияние схемы движения теплоносителя в плинтусном конвекторе («сверху-вниз» и «снизу-вверх») на тепловой поток отопительного прибора.

При необходимости предотвращения поступления наружного холодного воздуха при вентиляции помещений предусматривается установка дополнительного отопительного прибора в подоконной зоне или двойная установка плинтусного конвектора по вертикали.

При установке плинтусных конвекторов в два ряда по высоте в расчетные зависимости для определения теплового потока вводится коэффициент $\psi = 0,94$, учитывающий снижение суммарного теплового потока.

Рекомендации по проектированию включают:

- условия применения систем водяного плинтусного отопления;
- указания по конструированию систем;
- указания по гидравлическому расчету систем отопления с плинтусными конвекторами.

III. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Системы водяного плинтусного отопления рекомендуется применять в жилых и общественных зданиях. Плинтусные конвекторы позволяют осуществлять периметральное отопление помещений с низким подоконником или остеклением до пола.

2. Применение плинтусного отопления позволяет повысить радиационную температуру в помещении, снизить температуру воздуха без снижения комфортности, а также обеспечить равномерное распределение

температур по высоте (перепад температур по высоте составляет $-1 \div 1,5$ °C) и площади помещений.

3. Разработаны численные модели отопительного прибора и помещения для исследования процессов теплообмена и аэродинамики воздушных потоков в помещениях с плинтусным отопительным прибором конвекторного типа. Установлена адекватность математической модели и подтверждена возможность применения трехмерной модели конвектора и теплообменного элемента для экспериментальных исследований.

4. Экспериментальными исследованиями на физической и численной моделях плинтусного конвектора установлено образование восходящего потока воздуха над конвектором, настилающегося на ограждение и повышающего его температуру. Температура ограждения в зоне высотой 1,1 м превышает в среднем на 9 °C температуру ограждающей конструкции. При высоте ограждения более 1,1 м повышение температуры равно 1 °C.

5. Вследствие радиационного теплообмена повышается температура поверхности пола в зоне у конвектора в среднем на 8 °C; зона повышенных температур достигает 0,6 м; на большем расстоянии повышение температуры равно 1 °C.

6. Установлено, что схема движения теплоносителя в плинтусном конвекторе (сверху-вниз, снизу-вверх) не влияет на тепловой поток отопительного прибора.

7. На основании выполненных исследований теплового режима жилых помещений с естественной вентиляцией определены условия применения плинтусных конвекторов:

- при установке вдоль наружной стены плинтусного отопительного прибора конвекторного типа, рассчитанного на восполнение тепловых потерь, повышается температура внутренней поверхности наружной стены и результирующая температура помещения. Исключаются пониженные температуры в области горизонтальных стыков наружных стен в зоне опирания перекрытия;

- нисходящий поток приточного воздуха, поступающего через регулируемые оконные створки с расчетной для холодного периода года температурой наружного воздуха, при однорядном размещении плинтусного отопительного прибора на наружной стене приводит к созданию зоны дискомфорта в зоне обитания жилых помещений. Площадь зоны дискомфорта составляет ~40 % площади обслуживаемой зоны помещения;

- для локализации нисходящего потока приточного воздуха, поступающего через регулируемые оконные створки, рекомендуется применять

двойную установку плинтусного конвектора по вертикали на наружной стене. Площадь дискомфортной зоны по скорости воздуха составляет не более 10 % площади обслуживаемой зоны помещения;

- при установке плинтусных конвекторов в два ряда по высоте в расчетные зависимости для определения теплового потока отопительного прибора вводится коэффициент $\psi = 0,94$, учитывающий снижение суммарного теплового потока;

- при определении расчетного теплового потока отопительного прибора не следует учитывать бытовые тепловыделения;

- минимальное значение числа Рейнольдса в трубках отопительного конвектора должно быть не менее 2200.

8. Разработана численная модель испытательной камеры с расположенным в ней плинтусным отопительным прибором конвекторного типа, позволяющая определять тепловой поток отопительного прибора и распределение температур и скоростей воздуха в объеме камеры.

9. При испытаниях в камере плинтусного конвектора ПЛК 14.150 установлено:

- температура охлаждаемых поверхностей оказывает влияние на тепловой поток отопительного прибора. Увеличение температуры охлаждаемых поверхностей на 1 °С, приводит к уменьшению теплового потока на 2,2 % при номинальном расходе теплоносителя;

- на высоте над уровнем пола до 0,2 м отсутствует градиент температуры воздуха при температурах охлаждаемых поверхностей в диапазоне от 16 до 20 °С, поэтому целесообразно принимать в качестве определяющей температуры значение, полученное на высоте 0,05 м;

- определена зависимость теплового потока плинтусного конвектора ПЛК 04.14.150 от температурного напора; установлено, что тепловой поток плинтусного конвектора при числе Рейнольдса в трубках более 2200 не зависит от расхода теплоносителя.

10. На основании обобщения данных выполненных экспериментальных исследований систем плинтусного отопления для помещений жилых зданий с использованием систем естественной вентиляции для притока воздуха разработаны рекомендации по проектированию систем водяного плинтусного отопления.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

**Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых
научных журналах и изданиях, определенных Высшей
аттестационной комиссией Министерства науки и высшего
образования Российской Федерации**

1. Суханов К.О. Обеспечение теплового комфорта в помещениях с плintусной системой водяного отопления / В.А. Пухкал, К.О. Суханов, А.М. Гримитлин // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59). – С. 156–162. (0,43 п. л./0,2 п. л.).
2. Суханов К.О. Микроклимат жилых помещений с плintусной системой водяного отопления и подачи приточного воздуха через регулируемые оконные створки / К. О. Суханов, А. М. Гримитлин, А. Л. Шкаровский // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №5(64). – С. 111–115 (0,3 п. л./0,12 п. л.).
3. Суханов, К.О. Виртуальные испытания водяного плintусного конвектора / К.О. Суханов // Научно-аналитический журнал «Инновации и инвестиции», – 2021. – №7. – С. 143–146. (0,25 п. л.).
4. Суханов, К.О. Определение условий применения систем водяного плintусного отопления в жилых помещениях / К. О. Суханов // Научно-аналитический журнал «Инновации и инвестиции», – 2021. – №8. С. 167–170. (0,25 п. л.).
5. Sukhanov, K. Employment of Skirting Board Heating Water System in Accommodation / K. Sukhanov, A. Smirnov // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. – Vol. 692. – 2017. – P. 592–597. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_62. (0,37 п. л./0,2 п. л.).

Статьи в других изданиях

6. Суханов К.О. Численное исследование конвектора плintусного типа / В.А. Пухкал, К.О. Суханов // Новая наука: от идеи к результату. АМИ, Стерлитамак: 2016. 6-2 (90). – С. 169–173. (0,3 п. л./0,15 п. л.).
7. Суханов К.О. Системы плintусного отопления в жилых и общественных зданиях / К.О. Суханов, В.А. Пухкал // Актуальные проблемы строительства: материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и аспирантов / СПбГАСУ. – В 5 ч. Ч. 1. – СПб, 2014. – С.168–172. (0,3 п. л./0,15 п. л.).

8. Суханов К.О. Исследование системы плинтусного отопления / К.О. Суханов // Актуальные проблемы строительства: материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и аспирантов / СПбГАСУ. – В 5 ч. Ч. 1. – СПб, 2015. – С.162–164. (0,19 п. л.).

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 14.10.2021. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 98.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.