

КАНЕВ МИХАИЛ АНАТОЛЬЕВИЧ

**СОЗДАНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В
АДМИНИСТРАТИВНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ДЛЯ
СЕВЕРНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ**

**Специальность: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, доцент Уляшева Вера Михайловна
Официальные оппоненты:	Кочев Алексей Геннадьевич доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно- строительный университет», кафедра теплогазоснабжения, заведующий; Гвоздков Александр Николаевич кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно- строительный университет», кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, доцент
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО)

Защита диссертации состоится «27» июня 2016 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

Виктор Алексеевич Пухкал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Административные помещения характеризуются наличием не только большого количества офисной организационной техники (оргтехники), но и бумажной документации. Воздушная среда объектов, расположенных в Северной климатической зоне, отличается малым содержанием влаги наружного воздуха в холодный период года. Низкая относительная влажность воздуха приводит к обезвоживанию как всего организма в целом, так и отдельно органов дыхания, а также к выходу из строя дорогостоящей электронной аппаратуры.

В связи с интенсивным развитием населенных пунктов регионов Севера и Сибири нашей страны возрастает потребность в совершенствовании методов и средств создания оптимальных параметров микроклимата в офисных помещениях.

Существующие методики расчета элементов систем кондиционирования воздуха недостаточно учитывают подробные характеристики процессов тепломассообмена, в частности, в аппаратах для увлажнения воздуха, что приводит к снижению показателей качества воздуха при одновременном возрастании эксплуатационных расходов.

Таким образом, необходимость повышения качества обработки воздуха и сокращения эксплуатационных расходов путем совершенствования методов расчета тепломассообменных процессов в системах кондиционирования воздуха определяет актуальность данной работы.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической базой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых – А.Г. Аверкина, С.М. Анисимова, Б.В. Баркалова, В.Н. Богословского, В.И. Бодрова, А.Н. Гвоздкова, А.А. Гоголина, А.И. Еремкина, Е.Е. Карписа, О.Я. Кокорина, А.Я. Креслия, В.С. Майсоценко, А.Л. Наумова, А.В. Нестеренко, Л.И. Неймарк, М.Я. Поза, А.А. Рымкевича, О.Сеппанен, А.Г. Сотникова, Е.В. Стефанова, М. Г. Тарабанова, В.М. Уляшевой, П.В. Участкина, А.В. Цыганкова, Б.Н. Юрманова и др., а также работы проектных и научно-исследовательских организаций, таких как ЦНИИпромзданий, ВНИИКондиционер и др.

Цель исследования заключается в развитии способов создания влажностного режима в административных помещениях для северной климатической зоны, эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем обеспечения нормируемых параметров микроклимата.

Задачи исследования:

- проанализировать отечественные и зарубежные нормативные документы, регламентирующие параметры микроклимата административных помещений, а также результаты исследований в области создания влажностного режима и состояние условий труда на объектах, расположенных в северной климатической зоне;
- выполнить сравнительный анализ существующих методов и средств увлажнения воздуха, применяемых в административных зданиях;

- осуществить экспериментальные исследования и численное моделирование тепловлажностных процессов в административных помещениях;
- разработать схему и смонтировать опытную установку для проведения экспериментальных исследований сотового увлажнителя;
- разработать численную модель процесса тепломассообмена в сотовом увлажнителе;
- выполнить сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными исследованиями и нормативными требованиями.

Объект исследования – административные помещения, расположенные в Северной климатической зоне.

Предмет исследования – аппараты кондиционирования воздуха, предназначенные для увлажнения воздуха.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Получены поля распределения параметров микроклимата в административном помещении по результатам натурного эксперимента и численного моделирования с использованием модели турбулентности Спаларта-Аллмареса.

2. На основе экспериментальных исследований получены количественные характеристики распределения параметров воздуха в приточной струе для рециркуляционного промышленного увлажнителя воздуха.

3. По результатам экспериментальных исследований на разработанной и созданной автором опытной установке получены новые зависимости для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи в сотовом увлажнителе.

4. На базе разработанной численной модели испарения пленки воды с поверхности сотового увлажнителя получены количественные характеристики процесса увлажнения.

5. На основании анализа и обобщения результатов экспериментальных и теоретических исследований получена зависимость для расчета критерия Нуссельта, определяющего процесс испарения в сотовом увлажнителе.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории и методологии формирования микроклимата административных помещений и тепломассообменных процессов в орошаемых насадах. Выводы и рекомендации могут служить основой для дальнейших теоретических исследований.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в возможности применения разработанных методов в практической деятельности проектных организаций для повышения эффективности работы систем обеспечения микроклимата административных помещений.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационного исследования являются отечественные и международные стандарты в области микроклимата офисных помещений, основные положения теории тепломассообмена и аэродинамики в помещениях и аппаратах тепловлажностной обработки воздуха; методы математической статистики планирования эксперимента; теория численного

моделирования. В диссертационной работе использованы методы тепловизионного обследования, натурных и лабораторных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

- поля распределения параметров микроклимата в административном помещении по результатам натурного эксперимента и численного моделирования;
- количественные характеристики распределения параметров воздуха в приточной струе для рециркуляционного промышленного увлажнителя воздуха;
- новые зависимости для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи в сотовом увлажнителе, полученные на разработанной и созданной автором опытной установке;
- количественные характеристики процесса увлажнения на базе разработанной численной модели;
- зависимость для расчета критерия Нуссельта, определяющего процесс испарения в сотовом увлажнителе;
- результаты численного моделирования для прогнозирования распределения параметров микроклимата в административном помещении и обоснование проектного решения системы кондиционирования воздуха с применением сотового увлажнителя.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п. 5 «Тепловой, воздушный и влажностный режимы зданий различного назначения, тепломассообмен в ограждениях и разработка методов расчета энергосбережения в зданиях» и п. 3: «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием фундаментальных положений теории тепломассообмена и методов математического анализа с применением современного программного обеспечения; правомочностью принятых допущений; результатами натурных и лабораторных исследований; удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчетов с данными, полученными экспериментальным путем.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на X Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» 13–20 мая 2012 г., г. Будапешт (Венгрия); Международной научно-практической конференции «Инженерно-экологические системы» 10–12 октября 2012 г., г. Санкт-Петербург; XI Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» 23 марта – 5 апреля 2013 г., г. Ханой (Вьетнам); II Международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» 10–12 апреля 2013 г., г. Санкт-Петербург; XII Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды», 23 марта – 3 апреля 2014 г.,

г. Хайфа (Израиль); III Международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» 9–11 апреля 2014 г., г. Санкт-Петербург; II Международной научно-практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» 7–8 ноября 2014 г., г. Екатеринбург; XIII Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» 15–28 апреля 2015 г., г. Сиань (Китай); 68 Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» 15–17 апреля 2015 г., г. Санкт-Петербург.

Основные результаты исследований апробированы в ООО «2Н АКВА Групп» (г. Санкт-Петербург), Строительно-технологическом институте ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет» (г. Ухта) и ООО «Техстроймонтаж» (г. Ухта). Организациями представлены акты о внедрении научных результатов.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, общим объемом 3,9 п. л., в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 169 страницах печатного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 211 источников, и пяти приложений. В работе представлено 53 рисунка, 6 таблиц и 81 формула.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель исследования, задачи, предмет и объект исследования, описаны методы исследования, практическая и теоретическая значимость работы, приведены сведения об апробации научных результатов, имеющих публикации и общей структуре работы.

В первой главе приведена общая характеристика административных помещений, расположенных в северной климатической зоне; рассмотрена проблема обеспечения параметров микроклимата на рабочих местах; выполнен обзор методов и технических средств обеспечения влажностного режима в административных помещениях; обоснован выбор орошаемых насадок для увлажнения воздуха административных помещений.

Во второй главе проведен анализ существующих математических моделей процессов тепловоздухообмена в помещениях; рассмотрена физико-математическая модель формирования теплового, влажностного и воздушного режимов помещения; приведены результаты натурных исследований микроклимата административных помещений в северных климатических условиях; выполнена проверка адекватности принятой математической модели.

В третьей главе представлена физико-математическая модель тепломассообмена в орошаемой насадке и рассмотрены методы его расчета; выполнено численное моделирование процессов тепломассообмена в орошаемых насадках и проанализированы его результаты.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования рециркуляционного промышленного увлажнителя воздуха; разработана схема опытной установки увлажнения воздуха, которая смонтирована в лаборатории

теплогазоснабжения и вентиляции СПбГАСУ; выполнены экспериментальные исследования процессов тепломассообмена в орошаемой насадке.

В пятой главе выполнено численное моделирование тепловлажностных процессов при использовании предлагаемого способа увлажнения с целью прогнозирования микроклимата в исследуемых помещениях; приведено технико-экономическое обоснование результатов исследований.

В заключении изложены основные итоги выполненного исследования, сделаны предложения о возможных направлениях продолжения исследований.

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

1. Получены поля распределения параметров микроклимата в административном помещении по результатам натурного эксперимента и численного моделирования с использованием модели турбулентности Спаларта-Аллмареса

Данные исследований для объектов, расположенных в северной климатической зоне, показывают, что при температуре наружного воздуха (t_n) ниже минус 15°C температура воздуха существенно выше нормируемой, а относительная влажность находится в пределах $5 \div 10\%$.

Объектом исследования послужило административное помещение размерами 9×6 м и высотой 3 м с одной наружной стеной, разделенное светопрозрачными перегородками (экранами) для организации современных 6 комфортных рабочих мест. Для данного объекта выполнены натурные тепловизионные обследования и измерения параметров микроклимата.

В помещении предусмотрена схема организации воздухообмена «сверху-вверх» с приточными устройствами размерами 400×400 мм, размещенными ниже уровня подшивного потолка. Для удаления воздуха установлены вытяжные устройства размерами 400×400 мм в плоскости подшивного потолка.

На рисунке 1 приведены результаты измерений температуры и относительной влажности воздуха на отметке 1,5 м от пола помещения при $t_n = (-24) \div (-26)^\circ\text{C}$. В Северной климатической зоне такое состояние воздушной среды имеет место в течение порядка 150-200 суток в год. Для обеспечения нормируемого значения относительной влажности необходимо определить минимальное количество влаги в приточном воздухе. Для этой цели было выполнено численное моделирование пространственного распределения относительной влажности в помещении в условиях, соответствующих натурному эксперименту.

В качестве математической модели тепловлажностного режима помещения принята система трехмерных уравнений гидродинамики. В процессе исследования распределения параметров микроклимата использован программный комплекс Star-CD, при этом в качестве примеси принято влагосодержание воздуха. Использована однопараметрическая модель турбулентности Спаларта-Аллмареса (SA).

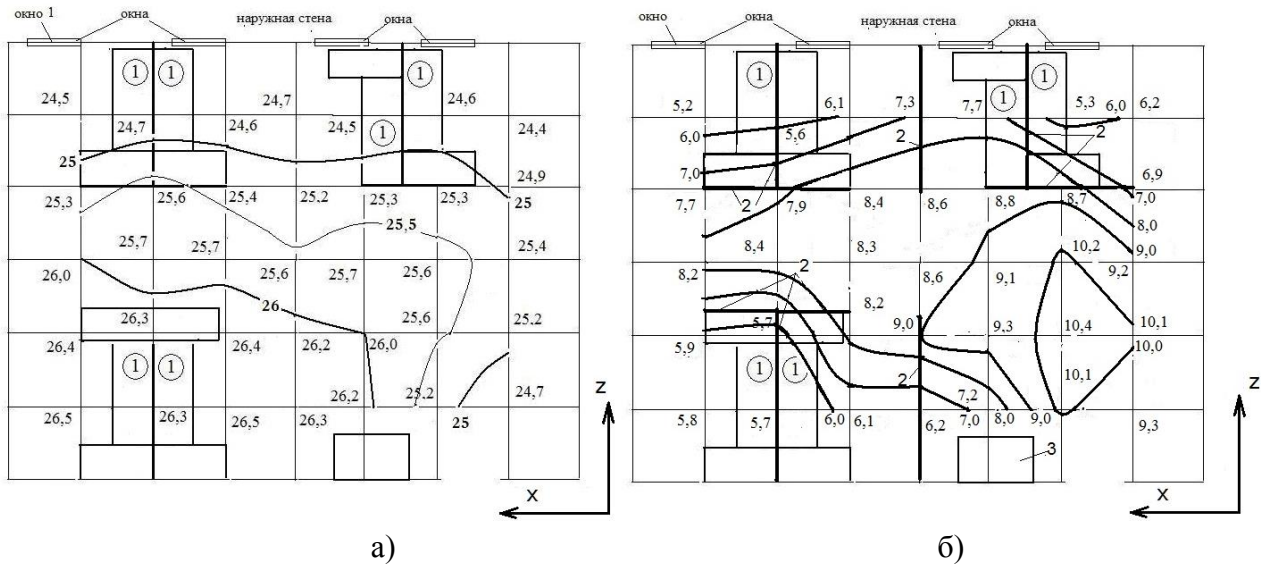


Рисунок 1 – Экспериментальное распределение температуры (а) и относительной влажности (б) воздуха в помещении

1 – рабочие столы с ПЭВМ; 2 – перегородки; 3 – множительная техника

Система дифференциальных уравнений, которая описывает воздушные потоки в исследуемом помещении, записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + g\beta(T - T_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u'_i u'_j} \right) \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{T' u'_j} \right) \\ \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{C}}{\partial x_j} &= \frac{\partial (-\overline{u'_j C'})}{\partial x_j} + J_c \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время; ρ – плотность; $\bar{u}_j$ – компоненты вектора осредненной скорости по осям координат; ν – коэффициент кинематической вязкости; $(T - T_0)$ – отклонение фактической температуры от фиксированной средней; $\beta = T^{-1}$ – коэффициент теплового расширения воздуха; $\bar{P}, \bar{T}, \bar{C}$ – осредненные давление, температура и концентрация примеси; $\overline{u'_i u'_j} = \frac{\tau_{ij}}{\rho}$; τ_{ij} – турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса); $\rho c_p \overline{u'_j T'}, \overline{u'_j C'}$ – дополнительные тепловой поток и поток массы; u'_i, u'_j, T', C' – локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока; J_c – интенсивность источника примеси.

В качестве исходных данных использованы данные теплового, влажностного и воздушного баланса. При этом теплоступления от энергосберегающих источников искусственного освещения пренебрежимо малы, а теплоступления от системы отопления по данным приборов учета

потребления теплоты компенсируют трансмиссионные потери через наружные ограждения. Таким образом, источниками теплоты являются люди, вычислительная (ПЭВМ) и множительная техника (МТ). Источником влаговыделений являются люди.

Для перехода от дифференциальных уравнений к дискретным применен метод конечных объемов на структурированной неортогональной несмещенной сетке. Сетка сгущается вблизи твердых границ.

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 2 в виде полей распределения температуры и относительной влажности в горизонтальной плоскости на отм. 1,5 м от пола помещения.

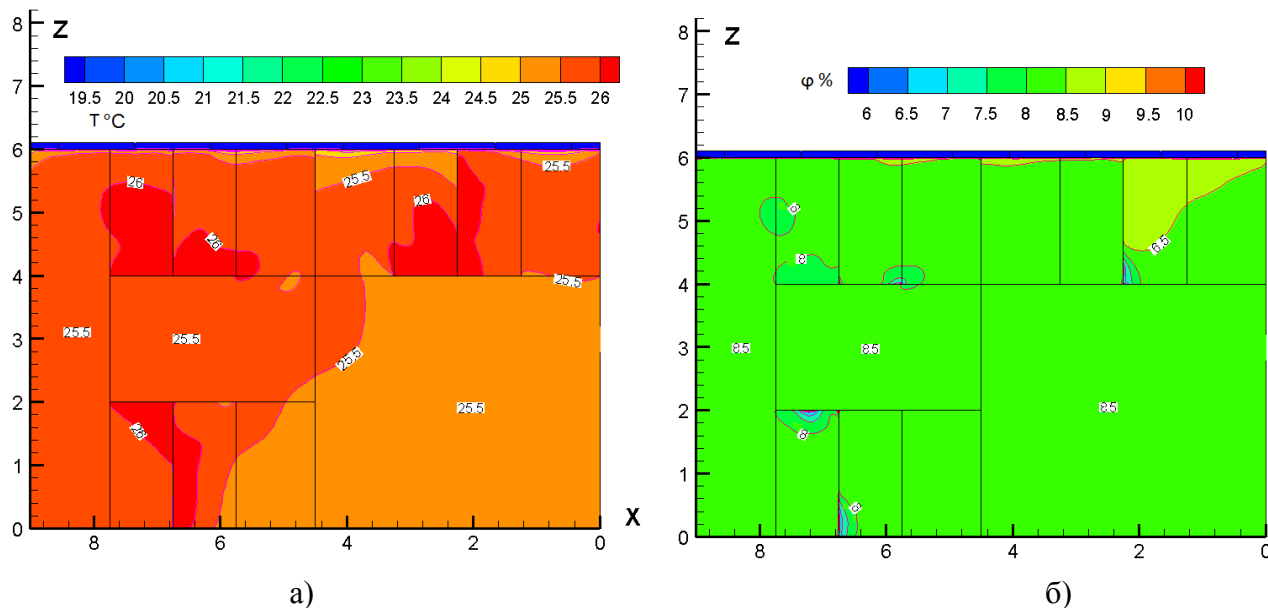


Рисунок 2 – Распределение температуры (а) и относительной влажности (б) воздуха в помещении при существующей системе обеспечения микроклимата

Отклонение результатов численного и натурного экспериментов по температуре в контрольных точках составляет от 0,5 до 2,3%, по относительной влажности от 1,5 до 7%. Таким образом, сопоставление результатов численного моделирования параметров микроклимата исследуемого помещения при использовании модели турбулентности Спаларта-Аллмареса (SA) с результатами натурных исследований подтвердило корректность выбранного метода численного моделирования.

2. На основе экспериментальных исследований получены количественные характеристики распределения параметров воздуха в приточной струе для рециркуляционного промышленного увлажнителя воздуха.

Для оценки целесообразности использования автономных аппаратов испарительного охлаждения и увлажнения воздуха в офисных помещениях выполнены экспериментальные исследования технических характеристик аппарата ССХ 2.5 фирмы Munters, предоставленного фирмой ООО «2Н АКВА Групп». При многочисленных положительных качествах рассматриваемого оборудования сервисные компании отмечают и ряд

недостатков. В первую очередь это связано с отсутствием технических характеристик, необходимых для расчета и подбора оборудования, особенно для импортных образцов.

Измерения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха выполнены в выпускном отверстии, а также по оси приточной струи. В процессе исследований проведена серия измерений с использованием следующих приборов – аспирационного психрометра, термоанемометров Testo 405-V1 и Extech CO250. Все приборы имеют необходимый класс точности и свидетельства о поверке. Измерения выполнены при трех режимах работы вентилятора. При обработке опытных данных использованы известные статистические методы. Некоторые результаты исследований обобщены на рисунках 3-5. Результаты исследований относительной влажности в выпускном отверстии представлены на рисунке 3.

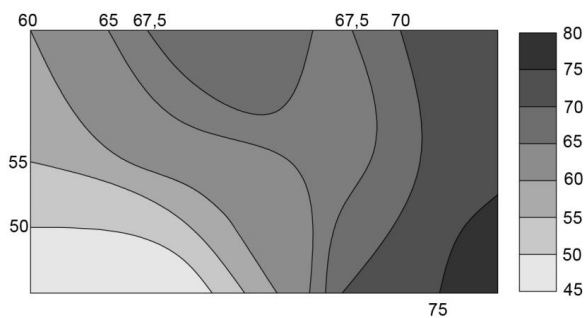


Рисунок 3 – Распределение относительной влажности в выпускном отверстии

Данные показывают, что имеет место существенная неравномерность распределения, связанная с конструктивными особенностями аппарата

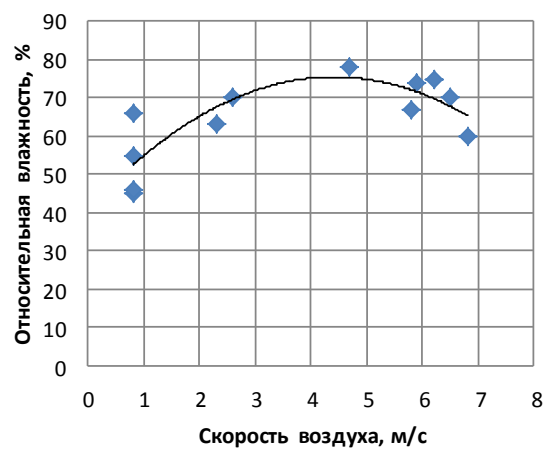
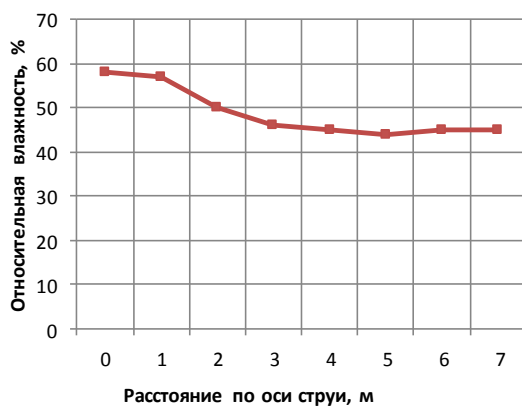
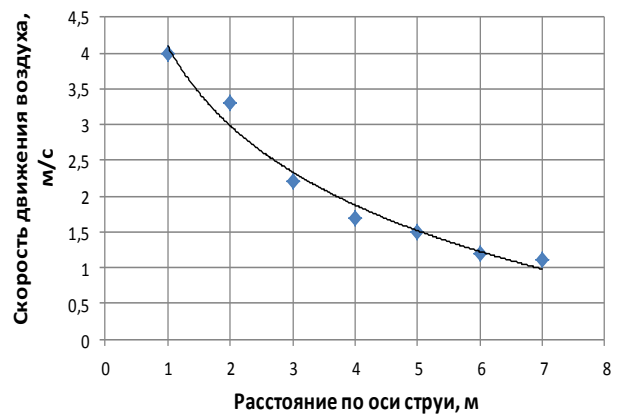


Рисунок 4 – Зависимость относительной влажности от скорости в выходном отверстии



а)



б)

Рисунок 5 – Изменение относительной влажности (а) и скорости движения воздуха (б) по оси приточной струи

Среднее значение относительной влажности составляет 64%. Максимальная относительная влажность наблюдается при скоростях порядка 4-5 м/с.

На начальном участке приточной струи сохраняется постоянное значение относительной влажности, на основном участке происходит снижение относительной влажности и затем стабилизация параметра.

Для обеспечения равномерности распределения параметров в выходном отверстии рекомендуется усовершенствовать функционирование направляющих элементов. В связи с повышенной скоростью движения воздуха на оси приточной струи использование подобных аппаратов в качестве увлажнителей воздуха должно быть ограничено помещениями с кратковременным пребыванием людей.

3. По результатам экспериментальных исследований на разработанной и созданной автором опытной установке получены новые зависимости для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи в сотовом увлажнителе.

Экспериментальная установка (рисунки 6 и 7) для исследования тепломассообменных процессов представляет собой систему воздуховодов с вентилятором и кассетой для увлажнения воздуха. Для подачи воды к кассете установка оснащена системой трубопроводов с циркуляционным насосом.

Вентилятор 2 с воздушным клапаном 3 установлен на раме 1. Вентилятор соединяется гибкой вставкой 4 с воздуховодом, который включает в себя: переход 5, отвод с направляющими лопатками 6, переход 7, камеру 8, переход 9 и прямой участок воздуховода 10.

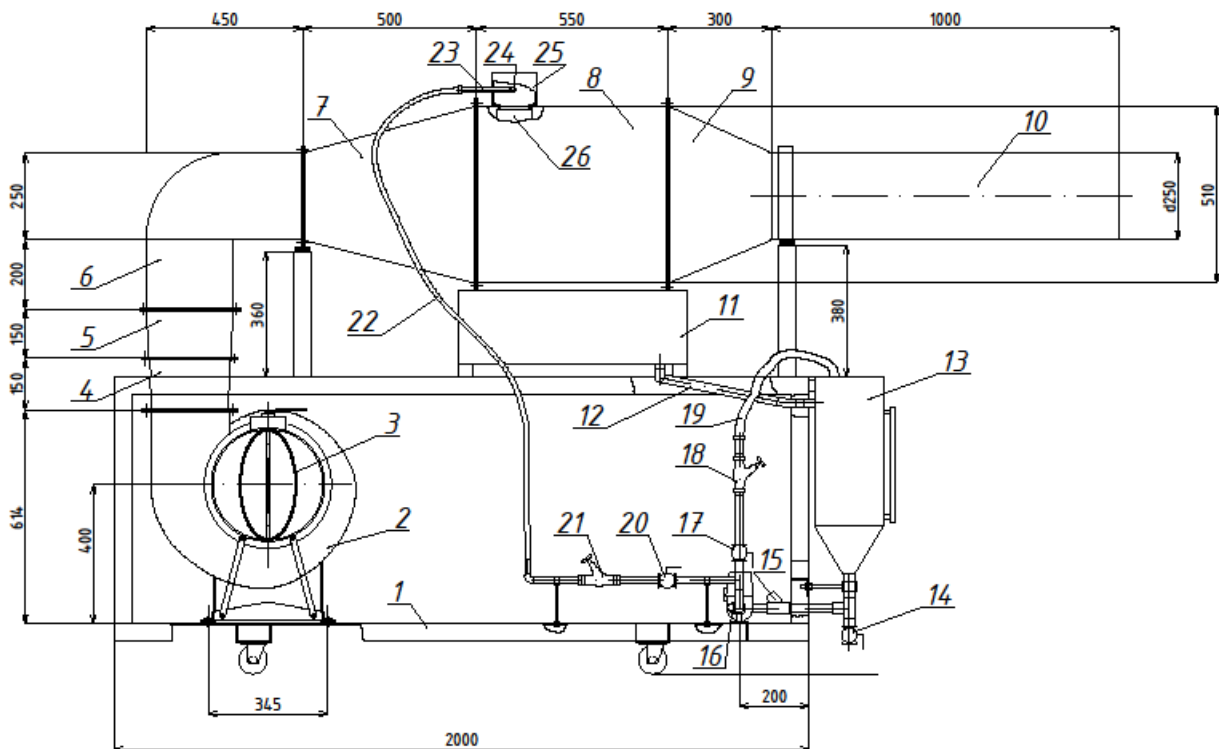


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки

Также на раме устанавливается поддон 11, в который стекает неиспарившаяся вода из кассеты. Из поддона вода по трубопроводу 12 самотеком сливается в мерный бак 13. Под мерным баком в самой нижней точке системы располагается сливной кран 14. Из мерного бака вода через фильтр 15 подается к циркуляционному насосу 16, после которого поток разделяется на два: первый через кран 17, балансировочный клапан 18 и трубопровод 19 возвращается в мерный бак для создания устойчивой циркуляции, а второй через кран 20, балансировочный клапан 21, шланг 22 и соединительный патрубок 23 подается к водораспределительному коллектору 24 под крышку 25 и непосредственно орошает кассету 26.



Рисунок 7 – Экспериментальная установка

С помощью воздушного клапана 3 и балансировочных клапанов 18 и 21 устанавливается необходимый режим работы установки. Температурный режим на входе в установку создается системами обеспечения микроклимата лаборатории.

Выполнены измерения распределения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха на выходе из насадки при различных начальных параметрах воздуха, а также при работе установки на существующую систему приточных воздуховодов учебной лаборатории.

Результаты исследований получены в виде полей распределения вышеуказанных параметров в выходном отверстии насадки, а также в виде зависимостей от начальных условий (рисунок 8 а). На рисунке 8 б приведена зависимость изменения относительной влажности в насадке от скорости на

выходе. Максимальное увеличение относительной влажности наблюдается при скоростях порядка 2-3 м/с.

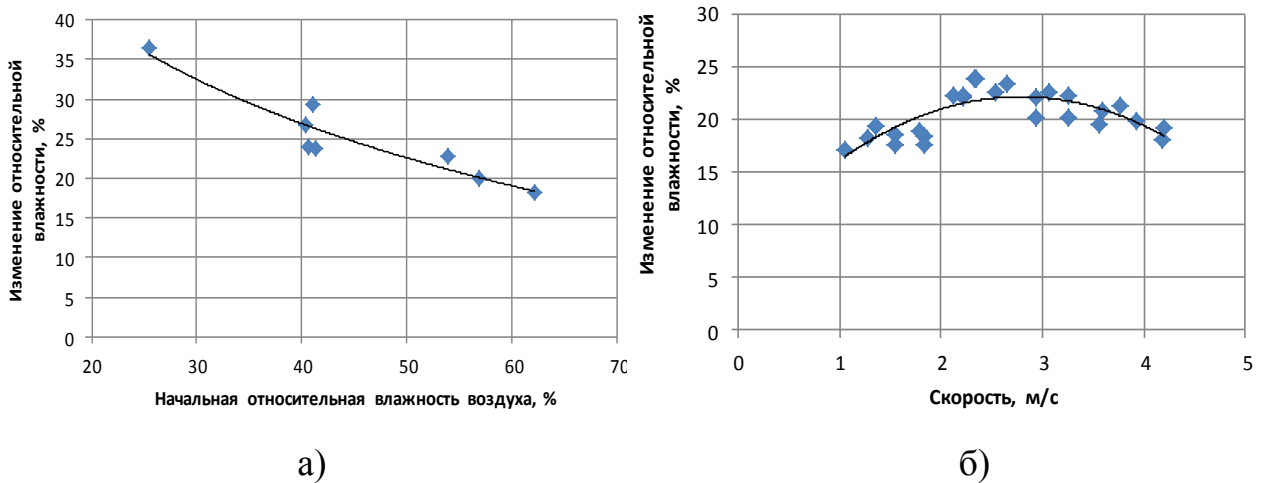


Рисунок 8 – Зависимость изменения относительной влажности воздуха в насадке от начальной относительной влажности (а) и скорости на выходе из насадки (б)

Эффективность работы увлажнителя определяется коэффициентами теплоотдачи (α) и массоотдачи (β_p), зависимость которых от скорости движения воздуха на выходе из насадки, представлена на рисунке 9.

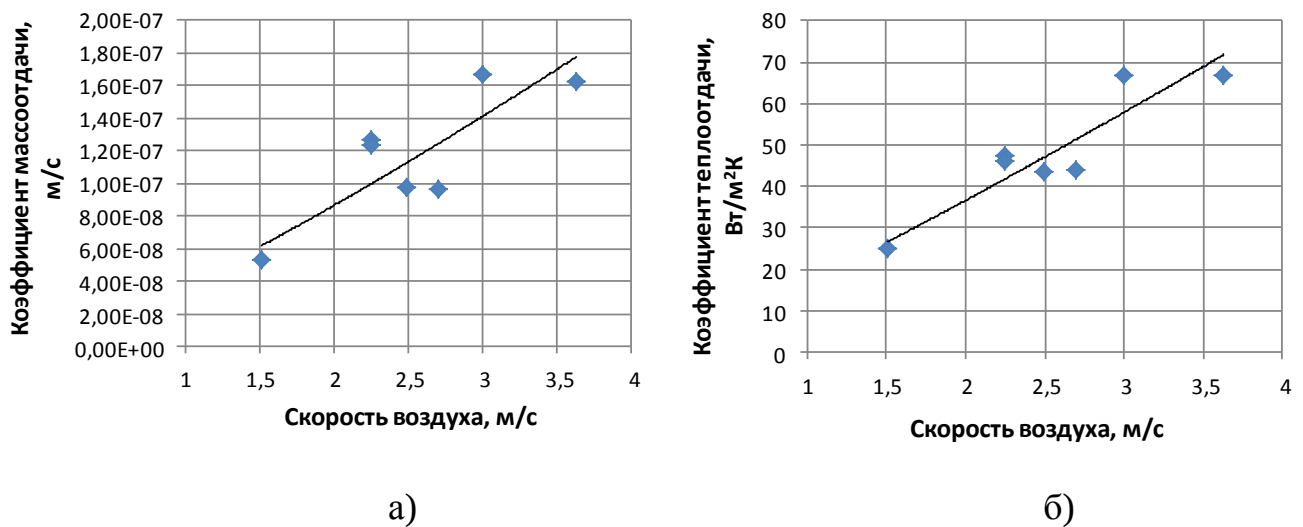


Рисунок 9 – Зависимость коэффициентов массоотдачи β_p (а) и теплоотдачи α (б) от скорости воздуха на выходе из насадки

Значения коэффициента теплоотдачи получены следующим образом:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot \Delta \bar{T}_l} \quad (2)$$

где Q – количество теплоты, переданной воздухом, Вт; $Q = 0,28 \cdot G_v \cdot c_p (T_n - T_k)$; F – площадь поверхности теплообмена, $F = 11,56 \text{ м}^2$; T_n , T_k – начальная и конечная температура воздуха, °С; $\Delta \bar{T}_l$ – среднелогарифмический перепад температур, °С; c_p – изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К).

Коэффициент массоотдачи насадки β_P , м/с, находится по формуле:

$$\beta_P = \frac{Q}{r \cdot c_p \cdot F \cdot \Delta \bar{P}_л} \quad (3)$$

где r — теплота фазового перехода, кДж/кг; $\Delta \bar{P}_л$ — среднелогарифмическая разность парциальных давлений водяных паров, Па.

4. На базе разработанной численной модели испарения пленки воды с поверхности сотового увлажнителя получены количественные характеристики процесса увлажнения

Для расчета тепломассообменных процессов в насадке сотового увлажнителя использованы уравнения Рейнольдса для описания турбулентных потоков, дополненные уравнениями конвективно-диффузионного переноса для осредненной скалярной субстанции $\bar{a}$ (температура, водяной пар) аналогично системе (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j + \bar{\rho}' \bar{u}_j') &= S_m \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) &= - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + S_i \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a} \bar{u}_j)}{\partial x_j} &= - \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_j' \bar{a}')}{\partial x_j} + \bar{J}_a \end{aligned} \quad (4)$$

где μ — коэффициент динамической вязкости; $\bar{a}$ — осредненные значения удельной плотности скалярной величины; S_m, S_i — интенсивность источников массы и импульса; $\bar{J}_a$ — интенсивность источников примеси.

В связи со сложностью аналитического решения процессов тепломассообмена в сотовых увлажнителях в инженерной практике для подбора данных аппаратов используются результаты экспериментальных исследований. В данной работе предпринята попытка использования программного комплекса StarCCM+ для численных исследований тепло- и гидроаэродинамических процессов в кассете сотового увлажнителя. Рассмотрена нестационарная задача испарения жидкой пленки. На рисунке 10 представлена разработанная автором расчетная сетка канала с кассетой. На развитой поверхности насадки задана жидкая пленка толщиной 1 мм, которая стекает под действием силы тяжести. Пленка поддерживается за счет потока массы на верхней кромке волнистых листов 0,00055 кг/с. На нижней кромке потоки воды и воздуха разделяются: воздух идет дальше по каналу, а вода уходит за пределы рассматриваемой области. Сетка существенно сгущается вблизи испаряющих поверхностей увлажнителя.

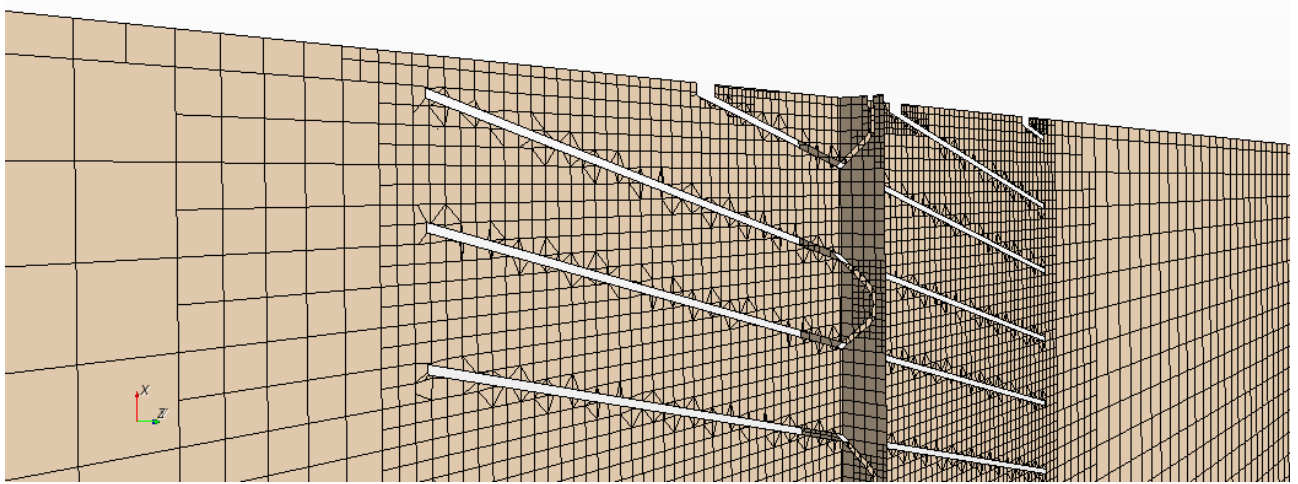


Рисунок 10 – Расчетная сетка канала с кассетой для увлажнения

При решении задачи используется k - ϵ модель турбулентности. Смесь воздуха и водяных паров считается идеальным несжимаемым газом. Давление насыщения водяных паров рассчитывается по уравнению Антуана. Интенсивность испарения составляет около $0,0005 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, что соответствует данным производителя и экспериментальным исследованиям. Шаг по времени составил $0,01 \text{ с}$. На каждый шаг физического времени приходилось по 5 итераций. Для перехода от дифференциальных уравнений к дискретным применен метод конечных объемов.

Скорость воздуха принимается равной $2,5 \text{ м/с}$, что является наиболее рациональной скоростью для работы увлажнителей данного типа (допустимый диапазон $1,5 - 4,5 \text{ м/с}$). В качестве граничных приняты следующие условия: температура воздуха на входе в канал 21°C , влагосодержание $4,16 \text{ г/кг}$ сухого воздуха. Температура воды, подаваемой на верхнюю часть увлажнителя равна 16°C , что примерно соответствует температуре воздуха по мокрому термометру при заданных условиях (в реальных аппаратах вода из поддона постоянно циркулирует, и поэтому температура воды принимается равной температуре воздуха по мокрому термометру).

В качестве начальных условий приняты следующие: параметры воздуха в объеме канала имеют те же параметры что и поток воздуха на входе, температура 21°C , влагосодержание $4,16 \text{ г/кг}$ сухого воздуха, температура жидкой пленки на развитой поверхности кассеты также 16°C .

На рисунках 11-13 приведены результаты численного эксперимента. При проведении численного эксперимента выполнена оценка сходимости, расчет считался законченным при достижении стационарности отслеживаемых параметров. На рисунке 12 наблюдается процесс выравнивания интенсивности испарения по высоте пластины, что позволяет прогнозировать равномерность распределения этого параметра в кассетах реальных размеров. Как известно, в сотовых увлажнителях реализуются процессы, близкие к адиабатическому увлажнению, т.е. с понижением температуры обрабатываемого воздуха, что наглядно видно на рисунке 13.

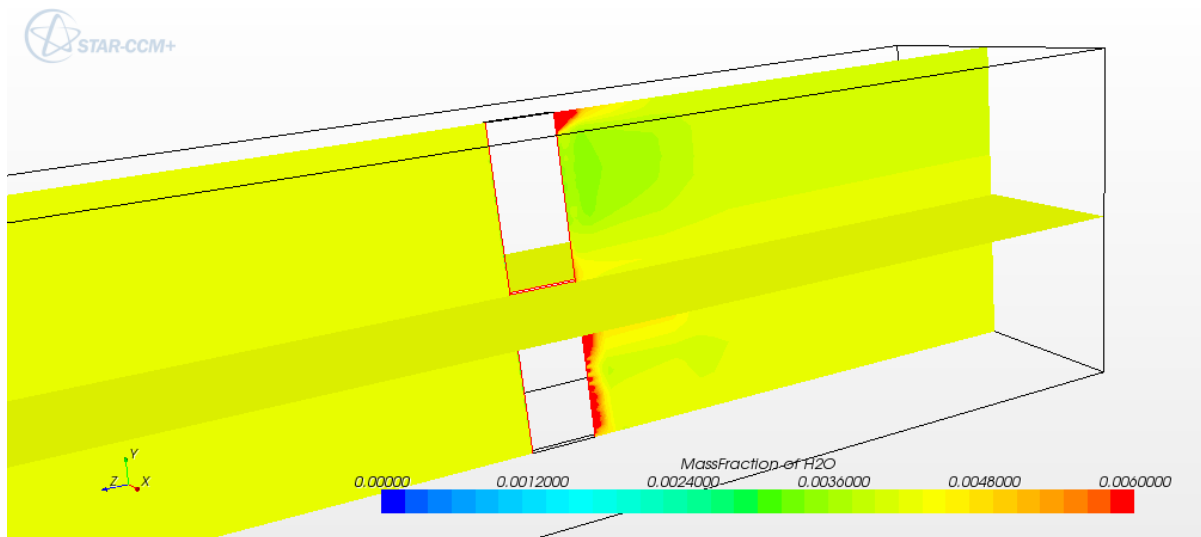


Рисунок 11 – Распределение влагосодержания, кг/кг сухого воздуха

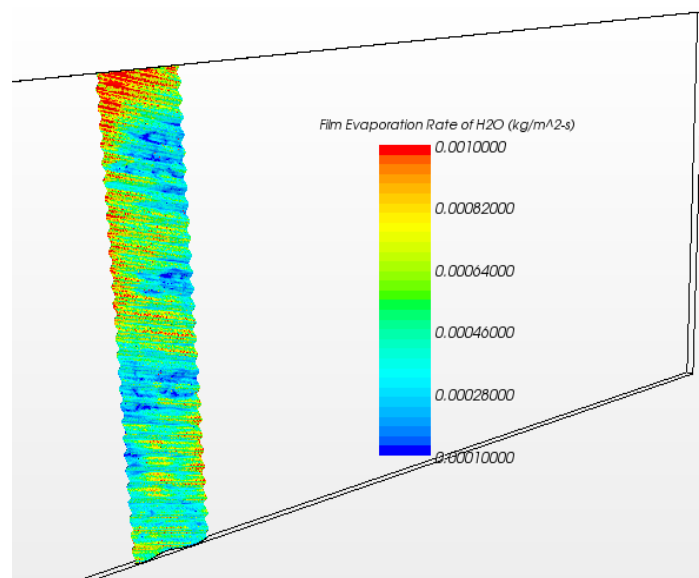


Рисунок 12 – Распределение интенсивности испарения, кг/(м²·с)

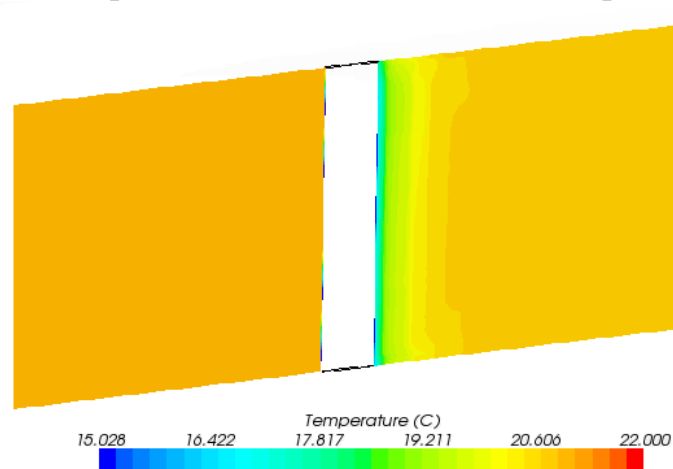


Рисунок 13 – Распределение температуры воздуха

Анализ результатов численного моделирования тепломассообменных процессов при испарении жидкой пленки с поверхности изогнутой пластины подтверждает сложный нестационарный характер увлажнения воздуха в сотовых увлажнителях. Данные исследований позволяют спрогнозировать количественные характеристики параметров в аппаратах реальных размеров.

5. На основании анализа и обобщения результатов экспериментальных и теоретических исследований получена зависимость для расчета критерия Нуссельта, определяющего процесс испарения в сотовом увлажнителе

При подборе сотовых увлажнителей принято отталкиваться от номинальной адиабатической эффективности процесса увлажнения, которая обычно составляет 65, 85 и 95% для кассет глубиной соответственно 100, 200 и 300 мм. При этом фактическая адиабатическая эффективность может существенно отличаться от номинальной.

Для определения адиабатической эффективности существует теоретическая зависимость:

$$Ea = 1 - e^{-\frac{\alpha F}{G_{Bc_p}}} \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности тепломассообмена, м²; G_B – расход воздуха, кг/с;

Данная зависимость подтверждается рядом экспериментов, в том числе проведенных автором (рисунок 14).

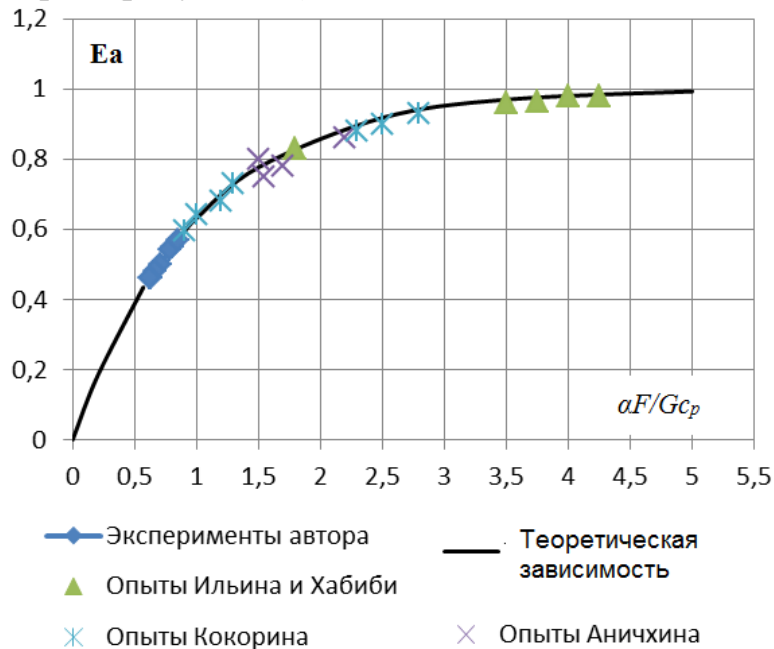


Рисунок 14 – Сопоставление результатов экспериментальных исследований различных авторов с теоретической зависимостью

В формуле 3 используется коэффициент теплоотдачи α , Вт/м²·К, который вычисляется через критерий Нуссельта. Зависимости для нахождения критерия Нуссельта определяются эмпирическим путем.

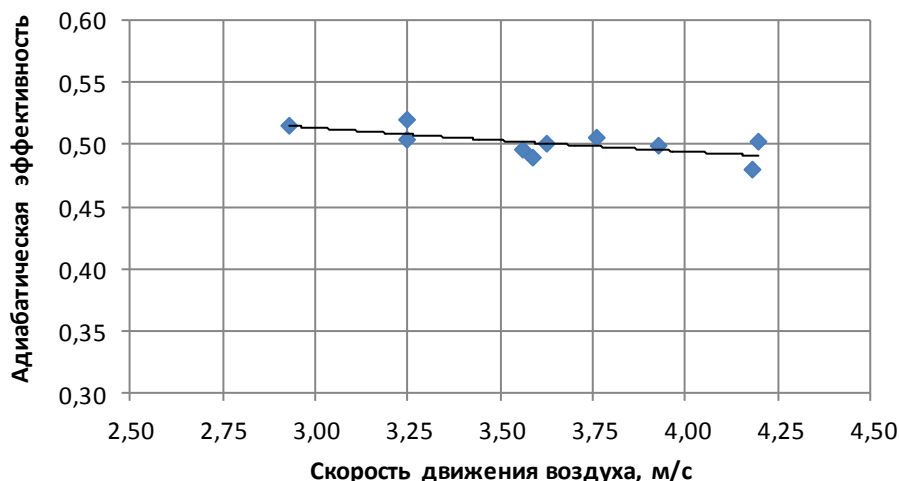


Рисунок 15 – Зависимость адиабатической эффективности процесса увлажнения от скорости движения воздуха в насадке

В исследованиях массообмена в различных аппаратах (с осиновыми и сосновыми стружками, стекловолокном) Кокориным О.Я. была предложена критериальная зависимость следующего вида (при $C=0,104$; $n=0,8$; $m=-0,11$):

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Gu^m \quad (6)$$

В данной работе была принята гипотеза о целесообразности использования подобной зависимости. Анализ результатов обработки экспериментальных данных (рисунок 16) позволил получить значение коэффициента $C=0,03$, что удовлетворительно соответствует результатам экспериментальных и аналитических расчетов.

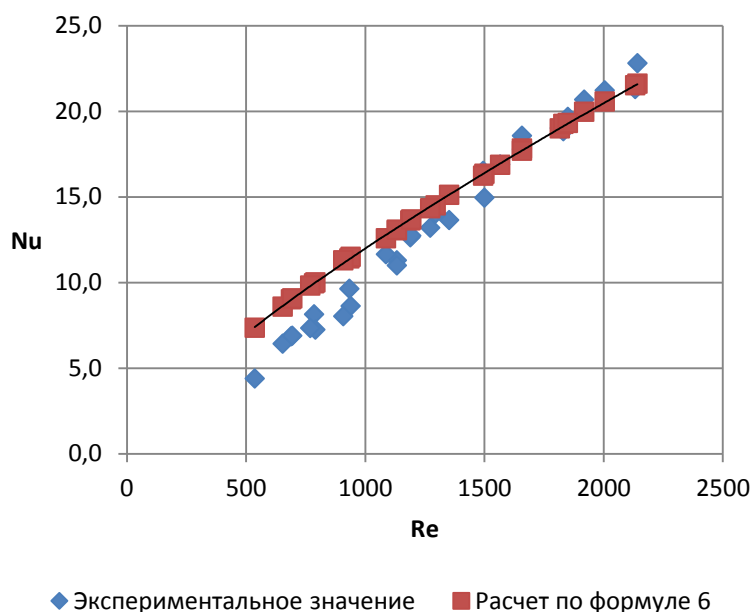


Рисунок 16 – Зависимость критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса

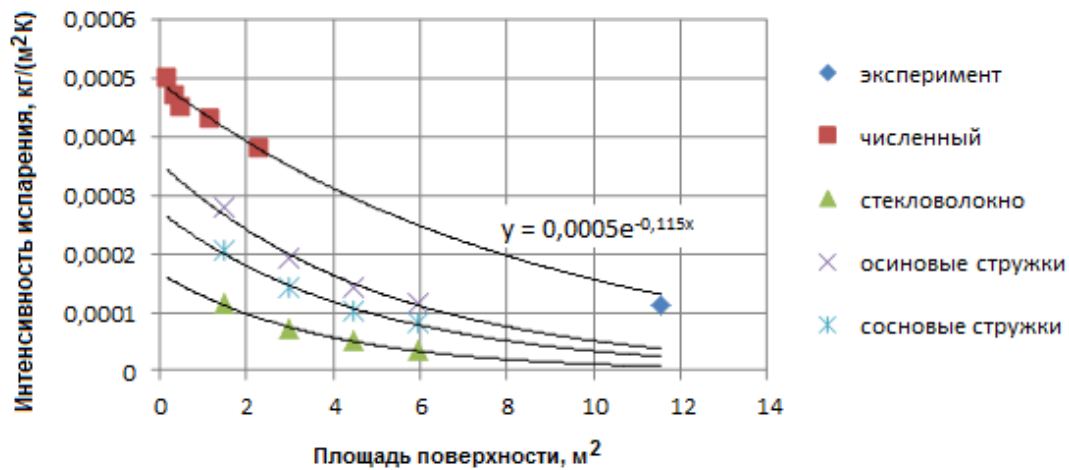


Рисунок 17 – Зависимость интенсивности испарения от площади поверхности теплообмена

Сравнение результатов численных и лабораторных экспериментов автора с экспериментальными исследованиями других авторов (рисунок 17) отражает идентичный характер зависимости интенсивности испарения от площади поверхности контакта. Интенсивность испарения зависит от структуры материала заполнителя и способа его укладки.

6. На основе численного моделирования получены расчетные поля распределения параметров микроклимата и обоснована целесообразность использования сотового увлажнителя

Для прогнозирования количественных характеристик микроклимата в офисном помещении при использовании исследуемого способа увлажнения воздуха выполнено численное моделирование на основе рассмотренной ранее математической модели тепловлажностного состояния воздушной среды.

На рисунке 18 приведены некоторые результаты численного моделирования при увеличении влагосодержания приточного воздуха до минимально необходимой величины ($d=5 \cdot 10^{-3}$ кг/кг сухого воздуха).

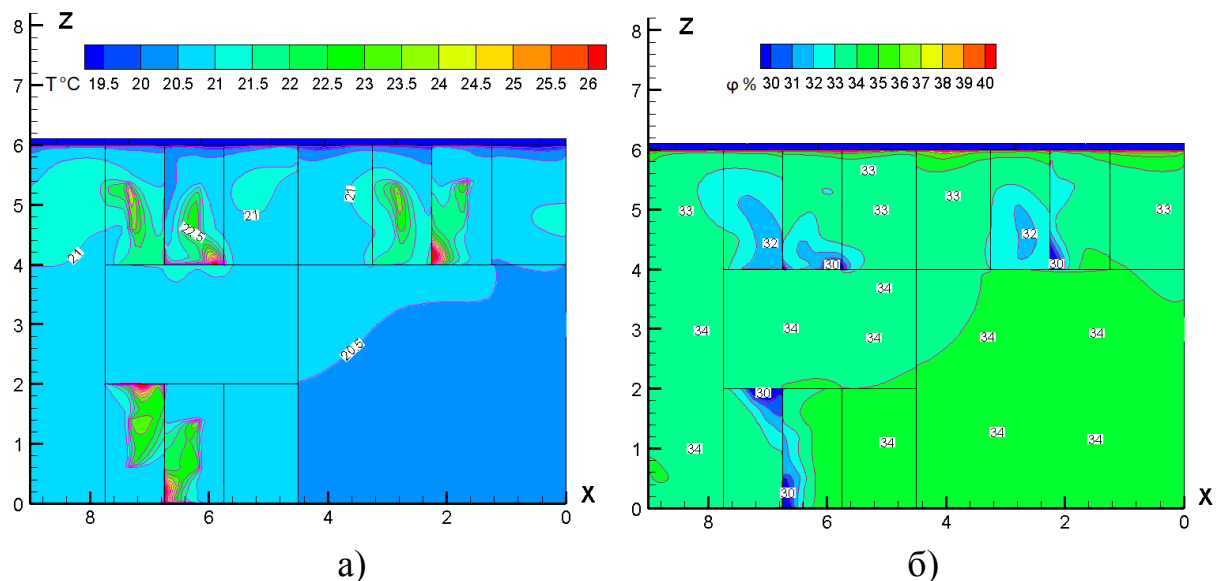


Рисунок 18 – Распределение температуры и относительной влажности воздуха в помещении при предполагаемой системе обеспечения микроклимата

На рабочих местах значения температуры воздуха и диапазон ее изменения $20 \div 22$ °С соответствуют требованиям нормативных документов. Что касается распределения относительной влажности воздуха в горизонтальной плоскости на уровне обслуживаемой зоны помещения (1,5 м), то необходимо отметить, что средние значения относительной влажности соответствуют нормируемым значениям. Диапазон изменения относительной влажности воздуха в обслуживаемой зоне $33 \div 35\%$.

Удовлетворительное соответствие данных численного моделирования требованиям нормативных документов позволило обосновать проектное решение системы кондиционирования воздуха для административного здания ООО «Техстроймонтаж» с применением сотового увлажнителя. Предполагаемый экономический эффект от внедрения разработанного автором проекта составляет 81636 руб/год.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам работы над диссертацией получены следующие результаты:

1. На основании экспериментальных исследований выявлено существенное отклонение относительной влажности воздуха помещений административных зданий, расположенных в северной климатической зоне, от нормируемых значений.

2. В результате анализа данных натурных исследований и численного моделирования при использовании модели турбулентности Спаларта-Аллмареса (SA) подтверждена корректность выбранного метода численного моделирования.

3. Получены экспериментальные данные распределения параметров воздуха для рециркуляционного промышленного аппарата испарительного охлаждения и увлажнения воздуха ССХ 2.5 фирмы Munters, предоставленного фирмой ООО «2Н АКВА Групп», определяющие область применения данного типа аппаратов и разработаны рекомендации по его рациональному использованию.

4. Разработана и реализована схема опытной установки для исследования сотовых увлажнителей. Получены поля распределения относительной влажности, температуры и скорости движения воздуха в выходном отверстии насадки и зависимости вышеуказанных параметров, а также адиабатической эффективности и коэффициентов тепло- и массоотдачи от начальных условий.

5. Разработана численная модель процессов тепломассообмена в сотовом увлажнителе с применением модели турбулентности $k-\varepsilon$. Произведена оценка сходимости численного метода при испарении жидкой пленки с поверхности изогнутой пластины. Данные исследований позволяют спрогнозировать количественные характеристики параметров в аппаратах реальных размеров.

6. На основании анализа и обобщения результатов экспериментальных и теоретических исследований получена зависимость для расчета критерия Нуссельта, определяющего тепломассообменные процессы в сотовом увлажнителе.

7. По результатам численного моделирования тепловлажностного режима административного помещения при использовании сотового увлажнителя выявлено соответствие параметров микроклимата нормируемым значениям.¹

8. Доказана экономическая эффективность применения сотового увлажнителя на примере системы кондиционирования воздуха для административного здания ООО «Техстроймонтаж», расположенного в северной климатической зоне.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в развитии методов численного моделирования для прогнозирования характеристик тепломассообменных аппаратов систем кондиционирования воздуха.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. **Канев, М.А.** Особенности формирования микроклимата административных помещений в северных климатических условиях [Текст] / В.М. Уляшева, М.А.Канев // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №2 (37). – С.162–166. (0,3 п.л./0,15 п.л.)

2. **Канев, М.А.** Численное моделирование воздушных потоков в кондиционируемом помещении [Текст] / В.М. Уляшева, М.А.Канев // Известия ВУЗов. Строительство. – 2014. – № 9-10. – С.65-70. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

3. **Канев, М.А.** Моделирование тепло-влажностного режима в офисном помещении [Электронный ресурс] / М.А. Канев / Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2015. – №1. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-19563> (дата обращения: 07.06.2015).

4. **Канев, М.А.** Численное моделирование процесса испарения в сотовом увлажнителе [Электронный ресурс] / М.А. Канев / Электронный научный «Современные проблемы науки и образования». – 2015. – № 2. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/122-20735> (дата обращения: 23.07.2015).

5. **Канев, М.А.** Численное моделирование тепловлажностных процессов в административных помещениях в северных климатических условиях [Текст] / М.А. Канев // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – №5 (52). – С.171–178. (0,5 п.л.)

Статьи в других изданиях

6. **Канев, М.А.** Особенности обеспечения нормируемых параметров воздуха в северных условиях [Текст] / В.М. Уляшева, М.А. Канев // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы X Международной научной конференции, 13–20 мая 2012 г., г. Будапешт ; Волгогр. гос. архит.–строит. ун–т, Будапештский ун–т технологий и экономики, Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). – Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. – С. 221–226. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

7. **Канев, М.А.** Состояние воздушной среды административных помещений в северных климатических условиях [Текст] / В.М. Уляшева, М.А. Канев // Инженерно-экологические системы: материалы Международной научно-практической конференции 10-12 октября 2012г. / под общей редакцией Т.А. Дацюк; СПбГАСУ. – СПб., 2012. – С.125–129. (0,3 п.л./0,15 п.л.)

8. **Канев, М.А.** Увлажнение воздуха офисных помещений в северных климатических условиях [Текст] / М.А. Канев // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы XI Международной научной конференции, 23 марта–5 апреля 2013 г., г.Ханой/ М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр.гос.архит.–строит.ун–т, Национальный строительный университет, г.Ханой, Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). – Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. – С. 104–107. (0,3 п.л.)

9. **Канев, М.А.** Нормирование климатических характеристик [Текст] / В.М. Уляшева, С.В. Дубенков, М.А. Канев / Вентиляция общественных и промышленных зданий : научные чтения, посвященные 85-й годовщине со дня рождения д.т.н., профессора М.И. Гримитлина, 29 марта 2013г. – С. 34–36. . (0,2 п.л./0,1 п.л.)

10. **Канев, М.А.** Показатели воздушной среды для проектирования кондиционирования воздуха офисных помещений [Текст] / М.А. Канев / Актуальные проблемы современного строительства: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ.– СПб., 2013. – С. 121–123. (0,2 п.л.)

11. **Канев, М.А.** К вопросу влияния наружного климата на состояние воздушной среды административно-офисных помещений [Текст] / М.А. Канев / Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы XII Международной научной конференции, 23 марта–3 апреля 2014 г., г.Хайфа/ М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.–строит. ун–т, Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). – Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. – С. 177–183. (0,4 п.л.)

12. **Канев, М.А.** К вопросу обеспечения тепловлажностного и воздушного режима административных помещений [Текст] / В.М. Уляшева,

М.А. Канев / Строительная физика. Системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях : Международная конференция - академические чтения / МГСУ. – М., 2014. – С. 103 – 109. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

13. **Канев, М.А** Транспортирование взвешенной влаги в потоке воздуха [Текст] / В.М. Уляшева, М.А. Канев / Материалы II Международной научно-практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени».– Екатеринбург, 2014. – С. 73-75. (0,2 п.л./0,1 п.л.)

14. **Канев, М.А** Математическое моделирование тепловлажностных процессов в офисном помещении [Текст] / М.А. Канев / Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы XIII Международной научной конференции, 15–28 апреля 2015 г., г.Сиань / М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.–строит. ун–т, Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). – Волгоград: ВолгГАСУ, 2015. – С. 224–228. (0,3 п.л.)

15. **Канев, М.А.** Исследование работы сотового увлажнителя [Текст] / М.А. Канев / Актуальные проблемы современного строительства: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ.– СПб., 2015. – С. 168–174. (0,4 п.л.)