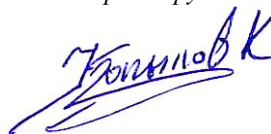


На правах рукописи



КОПЫЛОВ Кирилл Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ
ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ
ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель: Денисихина Дарья Михайловна,
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: Зиганшин Арслан Маликович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра информационных систем и
технологий в строительстве, заведующий;

Сулин Александр Борисович,
доктор технических наук, ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский университет
ИТМО», образовательный центр
«Энергоэффективные инженерные системы»,
ординарный профессор.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

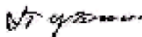
Защита диссертации состоится «16» декабря 2026 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, аудитория 220.

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 <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/kopylov-kirill-alekseevich>.

Автореферат диссертации разослан «26» октября 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В. А. Пухкал

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Применение систем вытесняющей вентиляции в общественных зданиях становится всё более распространённым. Основное преимущество таких систем перед перемешивающими – более высокое качество воздуха и равномерность распределения параметров микроклимата в обслуживаемой зоне, а также в ряде случаев снижение энергопотребления.

Известно несколько схем вытесняющей вентиляции: поршневые, активные и пассивные термовытесняющие. Однако в помещениях с рядным размещением людей (аудитории, зрительные залы, залы ожидания) при боковой подаче приточного воздуха ни одна из этих схем не отражает характер формирующегося течения, который зависит от соотношения расхода приточного воздуха и ширины зала, что, в свою очередь, влияет на распределение температуры и углекислого газа (CO_2). В результате возникает систематическая ошибка проектирования: фактические параметры в дальних рядах оказываются выше проектных, что не обеспечивает комфортных условий и качество воздуха.

Актуальность работы обусловлена необходимостью детального изучения режимов течения, реализующихся в залах с рядами людей при боковой подаче приточного воздуха и разработки обобщённых зависимостей для прогнозирования распределения температуры и CO_2 по рядам. Решение этих задач создаёт основу для повышения эффективности систем воздухо-распределения вытесняющей вентиляции в общественных зданиях за счёт более достоверного прогнозирования параметров микроклимата на стадии проектирования.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами вытесняющей вентиляции и ее применения в помещениях общественных и промышленных зданий, а также расчета, конструирования и применения низкоскоростных воздухораспределителей, занимались отечественные и зарубежные ученые: В.В. Батулин, А.М. Гримитлин, А.М. Живов, Е.О. Шилькрот, А.И. Ерёмкин, Т.А. Дацюк, В.М. Уляшева, В.Р. Таурит, А.М., Зиганшин, А.Б. Сулин, О.Н. Зайцев, Д.М. Денисихина, Н. Skistad, E. Mundt, P.V. Nielsen, J. Railio, F. Alamdari, H. Bach и др.

Целью исследования является повышение эффективности системы воздухораспределения вытесняющей вентиляции в помещениях общественных зданий с рядным размещением людей на основе выявления закономерностей формирования режимов течения и горизонтальных градиентов температуры и концентрации CO_2 , разработка обобщённых зависимостей для их прогнозирования на стадии проектирования.

Задачи исследования:

- провести анализ существующих отечественных и зарубежных методов расчета систем вытесняющей вентиляции и обосновать границы их применимости для помещений с последовательным размещением рядов людей;
- разработать математические модели низкоскоростных воздухораспределителей для вытесняющей вентиляции и обосновать их достоверность на основе сопоставления с лабораторным экспериментом;
- разработать математическую модель для решения задач организации воздушного режима помещений общественных зданий с источниками тепло-, газовыделений при реализации вытесняющей вентиляции и обосновать ее достоверность на основе сопоставления с натурным экспериментом;
- установить эмпирические зависимости изменения температуры воздуха и концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне помещений от комплексных показателей для режима с горизонтальной неравномерностью характеристик потока;
- разработать инженерную методику расчёта и рекомендации по повышению эффективности системы воздухораспределения в помещениях общественных зданий.

Объект исследования – система вытесняющей вентиляции помещений общественных зданий с рядным размещением людей.

Предмет исследования – закономерности формирования режимов течения и горизонтальных градиентов температуры и концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне при движении вытесняющего потока от воздухораспределителей к дальним рядам.

Методология и методы исследования: комплексный вычислительный эксперимент с применением сертифицированного программного кода Simcenter STAR-CCM+, натурные и лабораторные эксперименты на стендах завода «Арктос».

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п. 1 «Климатологическое обеспечение зданий. Тепломассообмен и гидроаэромеханика систем теплогазоснабжения и вентиляции, тепло и холодогенерирующего оборудования, ограждающих конструкций. Исследования теплового, воздушного, влажностного режимов помещений, зданий и сооружений», п. 4 «Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиля-

ции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности».

Научная новизна исследования:

- разработаны и верифицированы: точная и упрощенные модели низкоскоростного воздухораспределителя для вытесняющей вентиляции; численная модель исследуемого помещения с типовым рядным размещением людей (аудитории, конференц-залы), учитывающая тепловыделения от людей, инфильтрацию и теплообмен через ограждения;

- введен и обоснован безразмерный комплексный параметр P_L , характеризующий отношение интенсивности вытесняющего потока к интенсивности конвективных потоков; определены границы режимов вытесняющей вентиляции: пассивный термовытесняющий ($P_L \leq 0,1$), переходный ($0,1 < P_L < 0,5$) и термопоршневой ($P_L \geq 0,5$), характеризующийся выраженным горизонтальным градиентом температуры и CO_2 ;

- введены безразмерные комплексы Ntr и Mtr , характеризующие эффективность вытесняющей вентиляции по температуре и концентрации CO_2 . Получены обобщенные зависимости безразмерной температуры θ и безразмерной концентрации χ_{CO_2} от безразмерных комплексов Ntr и Mtr .

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании введения безразмерных комплексов, описывающих процессы формирования полей температуры воздуха и концентрации углекислого газа при вытесняющей вентиляции.

Практическая значимость работы заключается в:

- усовершенствовании инженерной методики расчёта вытесняющей вентиляции с низкоскоростными воздухораспределителями;

- разработке рекомендаций по повышению эффективности системы воздухораспределения вытесняющей вентиляции общественных зданий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Детализированная и упрощённая численные модели низкоскоростного воздухораспределителя. Достоверность моделей подтверждена результатами лабораторного эксперимента;

2. Численная модель помещения с размещением людей рядами при системе воздухораспределения вытесняющей вентиляции, подтвержденная данными натурного эксперимента;

3. Предложен безразмерный параметр P_L , устанавливающий границы режимов при вытесняющей вентиляции в помещениях с размещением людей рядами;

4. Для термодвигательного режима установлены эмпирические зависимости безразмерной температуры и концентрации CO_2 от локальных безразмерных комплексов в виде $\theta=f_1(\text{Htr})$, $\chi_{\text{CO}_2}=f_2(\text{Mtr})$, аппроксимируемые линейными функциями;

5. Разработаны рекомендации по проектированию вытесняющей вентиляции, включающие инженерную методику расчёта воздухораспределения для термодвигательного режима.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях, симпозиумах, форумах: национальная (всероссийская) научно-практическая конференция «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве» (СТИСГХ-2024, 22 марта 2024 г., Санкт-Петербург); симпозиум «Численное моделирование в климатических системах», СПбГАСУ-2025, 20-21 октября 2025г., г. Санкт-Петербург; VII Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-Строительный комплекс: Проблемы, Перспективы, Инновации» (Мин. Образования Республики Беларусь, Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой, 30 октября 2025г.); LXXIX Международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика» (СПбГАСУ–2025, 20–21 ноября 2025 г., г. Санкт-Петербург).

Публикации. Основные научные результаты диссертационного исследования опубликованы в 4 научных работах, общим объемом 3,9 п.л., входящих в перечень изданий рекомендуемых ВАК РФ.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных научных исследований внедрены в ООО «ММ-Технологии» (г. Санкт-Петербург), ООО «Арктос» (г. Санкт-Петербург), используются в образовательном процессе ФГБОУ ВО СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 127 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и приложений. Диссертация изложена на 139 страницах основного текста и 23 страницах приложений, содержит 70 рисунков и 19 таблиц.

Во введении представлена информация об актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, определены предмет и объект исследования.

В первой главе рассмотрены основные параметры, определяющие работу систем вытесняющей вентиляции. Представлен обзор существующих методов расчета вытесняющей вентиляции.

Во второй главе представлен анализ современных методов расчета воздухораспределения с применением численного моделирования. Описаны системы трехмерных дифференциальных уравнений. Разработаны подробные численные модели низкоскоростного воздухораспределителя.

В третьей главе описаны постановка лабораторного и численного экспериментов по истечению из низкоскоростного воздухораспределителя. Представлено сравнение результатов лабораторного эксперимента с результатами численного исследования. Разработаны и верифицированы упрощенные модели низкоскоростного воздухораспределителя. Описана постановка натурного эксперимента в учебной лаборатории при работе вытесняющей вентиляции. Выполнено сравнение параметров воздушной среды натурного эксперимента и разработанной математической модели.

В четвертой главе описаны постановка и результаты численных экспериментов по определению влияния геометрических и термодинамических параметров на эффективность работы вытесняющей вентиляции. Введен безразмерный режимный параметр Pl , определены границы режимов течения известного пассивного термовытесняющего, а также предлагаемых переходного и термопоршневого, в последнем горизонтальный градиент выражен наиболее сильно. Введены безразмерные комплексы Ntr и Mtr , характеризующие эффективность вытесняющей вентиляции для условий, рассмотренных в данной работе. Получены обобщенные зависимости безразмерной температуры и концентрации CO_2 от предложенных безразмерных комплексов Ntr и Mtr , а также разработана инженерная методика расчета воздухораспределения при термопоршневом режиме.

В заключении представлены основные выводы и перспективы дальнейших исследований.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Детализированная и упрощенная численные модели низкоскоростного воздухораспределителя. Достоверность моделей подтверждена результатами лабораторного эксперимента.

Низкоскоростные воздухораспределители формируют на выходе турбулентный поток с существенно неравномерным профилем скорости, который определяет дальнейшее развитие результирующей струи. Детальное описание воздухораспределительных устройств требует большого объема вычислительных ресурсов. Поэтому целесообразно проводить численное моделирование с использованием упрощенной модели воздухораспределителя.

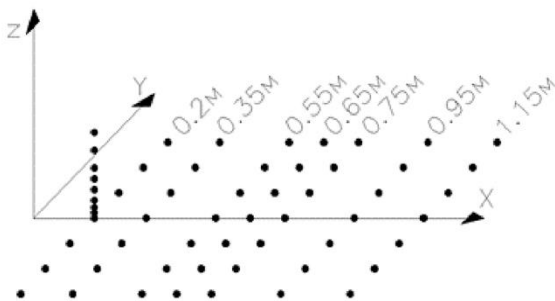
Для разработки упрощенной численной модели низкоскоростного воздухораспределителя проводились лабораторные испытания (рисунок 1 и 2)

приточного устройства 1ВНК200 с целью выявления характера формирования и развития приточной струи.

Лабораторный эксперимент проводился в неизотермическом режиме в соответствии с ГОСТ 32549 при следующих условиях: расход приточного воздуха – $434 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура приточного воздуха $t = 17,0 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $t = 19,6 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$.



а)



б)

Рисунок 1 – Этап проведения лабораторного эксперимента: а) стойка с закрепленными термоанемометрическими датчиками; б) схема точек замеров параметров воздуха

Измерения параметров неизотермической приточной струи производилось в 294 точках в поперечных сечениях струи на различных расстояниях по оси X (от 0,20 до 1,15 м) от центра воздухораспределителя. Расположение точек замеров по вертикали (ось Z) – 0,015; 0,030; 0,045; 0,065; 0,095; 0,125; 0,155 м (рисунок 1).



Рисунок 2 – Визуализация приточной струи от 1ВНК

Для проведения численных исследований построена твёрдотельная геометрия низкоскоростного воздухораспределителя в полном соответствии с воздухораспределителем 1ВНК200 (рисунок 3, *а*).

При разработке упрощенных моделей низкоскоростного воздухораспределителя (рисунок 3, *б*, *в*) рассматривались следующие варианты:

- равномерный профиль скорости на поверхности истечения;
- неравномерный профиль скорости, заданный путём разделения поверхности истечения на три сектора (зоны) с различными углами подачи воздуха.

Для упрощённых моделей все граничные условия, за исключением задания профиля скорости на истечении, приняты такими же, как для подробной модели воздухораспределителя.

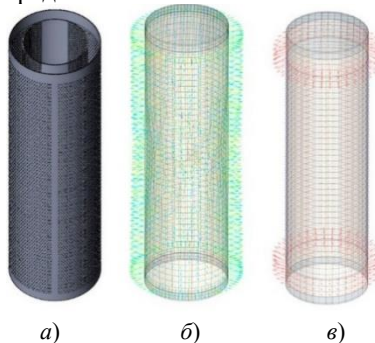


Рисунок 3 – Разработанные модели воздухораспределителя:

а) полная модель; *б*) равномерный профиль; *в*) профиль с секторами

Струя, выходящая из воздухораспределителя, имеет сложную форму (рисунок 4). Вблизи поверхности истечения за счет перфорации формируются отдельные струи, которые далее сливаются в единый поток. В структуре течения можно выделить поток, формируемый нижней частью воздухораспределителя и обладающий наибольшей скоростью. На выходе он отклонён от горизонтали примерно на 45° (рисунок 4, *а*).

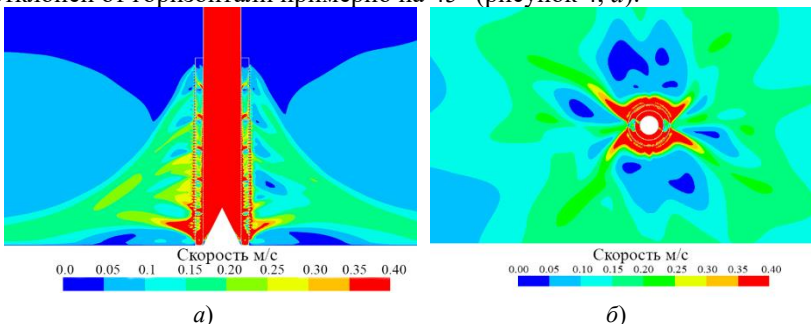


Рисунок 4 – Поле модуля скорости: *а*) в вертикальном сечении; *б*) в горизонтальном сечении, проходящем на расстоянии 75 мм от поверхности пола

При разработке упрощенной модели для достижения характера течения струи, идентичного модели с подробной геометрией, поверхность истечения делилась на три сектора со следующими граничными условиями:

- верхний сектор высота цилиндра – 70 мм, $L_1 = 130 \text{ м}^3/\text{ч}$, угол наклона 30° вверх относительно горизонтальной плоскости;
- центральный сектор высота цилиндра – 800 мм, $L_2 = 174 \text{ м}^3/\text{ч}$, угол наклона 90° относительно плоскости истечения;
- нижний сектор высота цилиндра – 70 мм, $L_3 = 130 \text{ м}^3/\text{ч}$, угол наклона 30° вниз относительно горизонтальной плоскости.

Сравнение результатов численного моделирования и лабораторного эксперимента приведены на рисунке 5.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующий вывод: характер течения струи на выходе из упрощенной модели с равномерным профилем скорости существенно отличается от струи, формируемой 1ВНК200 при лабораторных испытаниях и моделировании подробной геометрии. При этом упрощенная модель с неравномерным профилем скорости более корректно описывает истечение струи из низкоскоростного воздухораспределителя на участке формирования, а также дальнейшее ее развитие. Расхождение в значениях скоростей на основном участке струи составляет не более 8 %

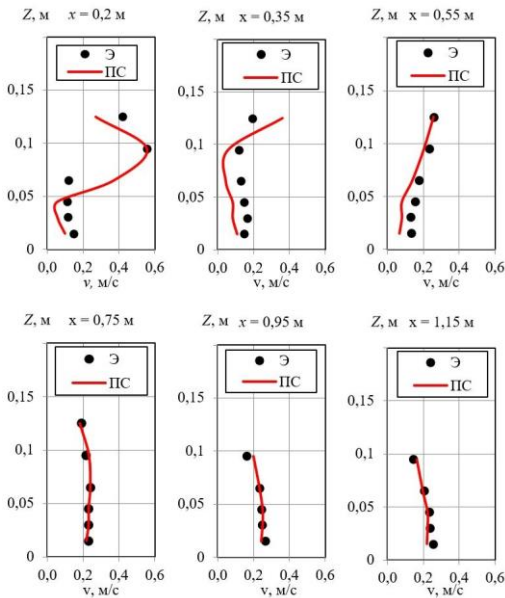


Рисунок 5 – Графики сравнения распределения модуля скорости по вертикали: Э – лабораторный эксперимент; М – результаты моделирования

В результате лабораторного и численного экспериментов установлены следующие факторы, определяющие характер истечения из низкоскоростного воздухораспределителя:

- трёхмерность течения на выходе из воздухораспределительного устройства;

- неравномерность профиля скорости в непосредственной близости от выходного сечения, эпюры скоростей во взаимно перпендикулярных плоскостях имеют существенные различия, что обусловлено влиянием внутренней геометрии воздухораспределителя (два соосных перфорированных цилиндра, отбойник в виде конуса, выравнивающие элементы);

- расхождение между численным моделированием и лабораторным экспериментом максимально в непосредственной близости от воздухораспределителя (до 0,15 м), где градиенты скорости наиболее высоки, и снижаются до 8 % на основном участке струи, наиболее важном для моделирования воздухораспределения в помещении.

2. Численная модель помещения с размещением людей рядами при системе воздухораспределения вытесняющей вентиляции, подтвержденная данными натурного эксперимента.

Проведение натурного эксперимента выполнено в учебной аудитории компании «Арктика». Для построения математической модели приняты фактические размеры учебной аудитории, 9,0 x 5,5 x 3,0 м (рисунок 6, а). Помещение имеет правильную прямоугольную форму, на двух смежных стенах которого размещены окна. На период проведения эксперимента окна закрыты жалюзийными шторами. Эксперимент проводился в холодный период года, при пасмурной погоде, температура наружного воздуха минус 4 °С.

Приток воздуха осуществлялся через полуцилиндрические низкоскоростные воздухораспределители 1ВПП250 компании «Арктос» в количестве 2 шт. Удаление воздуха из помещения осуществлялось через решетки АМН 400x150 в количестве 5 шт. Перед началом эксперимента расход приточного воздуха принят 630 м³/ч, что соответствует удельному воздухообмену ≈53 м³/ч на одного человека.

В ходе проведения эксперимента производились измерения скорости и температуры воздуха, а также концентрации углекислого газа в помещении. Использовался комплекс термоанемометрической системы Sensor AirDistSys 5000, включающий в себя 7 сферических датчиков. Датчики термоанемометрической системы размещались на вертикальной стойке, высота расположения датчиков от пола: 1 – 10 см; 2 – 40 см; 3 – 70 см; 4 – 100 см; 5 – 130 см; 6 – 160 см; 7 – 190 см.

Вертикальная стойка с приборами (рисунок 6, б) перемещалась по помещению и устанавливалась в отмеченные точки измерений. После перемещения стойки, выдерживалась пауза в течение 15 минут для стабилизации параметров микроклимата после возмущения. В каждой точке

производилось по 3 измерения в течение 5 мин. Для анализа распределения параметров использовались усредненные данные.



а)

б)

Рисунок 6 – Варианты расположения стойки с датчиками: а) расположение стойки в аудитории; б) расположение стойки около воздухораспределителя

На основе геометрических параметров учебной аудитории была построена 3D модель (рисунок 7), отражающая все значимые особенности помещения:

- оконные проемы;
- отопительные приборы, создающие конвективные потоки и излучение на поверхности помещения;
- оконные жалюзи, влияющие на воздухообмен в помещении за счет особенностей формирования ниспадающего потока вдоль поверхности окон и его распространения вглубь помещения;
- мебель, как естественные препятствия для распространения воздушных потоков.

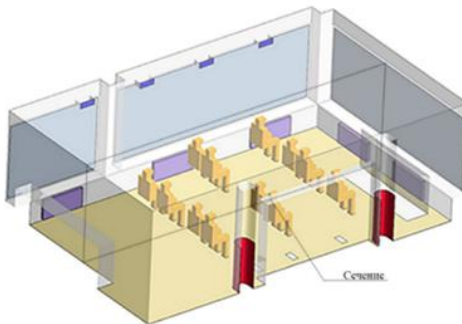


Рисунок 7 – 3D модель учебной аудитории

На основе разработанной модели в программном комплексе Simcenter STAR-CCM+ выполнена постановка численной задачи для расчёта параметров воздушной среды. Общее число ячеек конечно-объёмной расчётной сетки — 4 млн.

На рисунке 8 представлены поля температуры и концентрации CO_2 в вертикальном сечении аудитории. На основе полученных результатов (таблица 1), построены вертикальные распределения температуры по высоте помещения для натурного и численного экспериментов.

Таблица 1 – Результаты измерений математической модели и эксперимента

Высота датчика h , м	Температура, °C							
	Точка замера №1		Точка замера №2		Точка замера №3		Точка замера №4	
	Мат.м	Экс.	Мат.м	Экс.	Мат.м	Экс.	Мат.м	Экс.
0,1	19,6	20,8	19,6	20,6	18,8	20,3	20,0	19,8
0,4	19,9	21,0	19,6	20,6	20,1	20,5	20,0	19,7
0,7	20,4	21,1	20,5	20,9	20,6	21,0	20,4	20,6
1,0	21,8	21,6	21,7	21,1	21,5	21,0	21,6	21,2
1,3	21,9	22,2	21,9	22,1	21,9	21,9	22,0	21,8
1,6	22,0	22,0	22,0	21,3	22,0	21,1	22,0	21,4
1,9	22,0	22,1	22,0	21,8	22,1	21,6	22,1	21,7

Продолжение таблицы 1

Высота датчика h , м	Температура, °C							
	Точка замера №5		Точка замера №6		Точка замера №7		Точка замера №8	
	Мат.м	Экс.	Мат.м	Экс.	Мат.м	Экс.	Мат.м	Экс.
0,1	19,9	20,5	19,6	20,1	19,6	20,3	19,9	20,1
0,4	19,8	20,6	19,6	20,6	20,1	21,0	19,9	20,7
0,7	20,4	20,8	20,6	21,0	20,4	21,0	20,0	20,7
1,0	21,7	21,0	21,3	21,1	21,6	21,2	21,6	21,4
1,3	22,0	22,0	21,9	22,1	22,0	21,8	22,0	21,0
1,6	22,0	21,9	22,1	21,8	22,1	21,4	22,1	21,6
1,9	22,1	21,9	22,2	22,0	22,1	21,6	22,1	21,0

Анализ полученных в ходе натурного эксперимента и численного моделирования распределений температуры воздуха и концентрации углекислого газа позволяет сделать вывод об идентичности процессов вентиляции в объеме натурального помещения и модели, что позволяет использовать ее для

дальнейших исследований для анализа формирования воздушного режима при исследовании вытесняющей вентиляции.

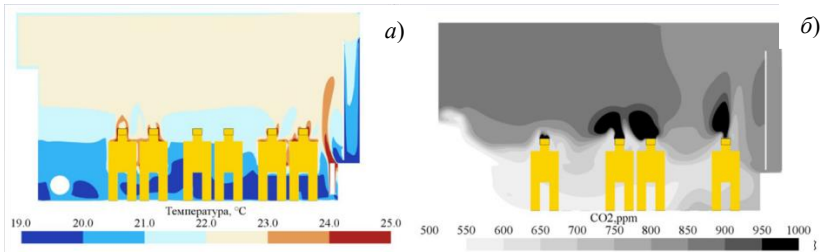


Рисунок 8 – Поперечное сечение аудитории: а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

Как пример, на рисунке 9 приведены распределения температуры воздуха по высоте помещения для модели и натурного эксперимента. Количественное различие связано с принятыми в математической модели упрощениями, точностью граничных условий и натурных измерений. Для оценки количественного совпадения введены безразмерные величины температуры воздуха и концентрации углекислого газа, рассчитано большое количество вариантов с разным набором исходных параметров.

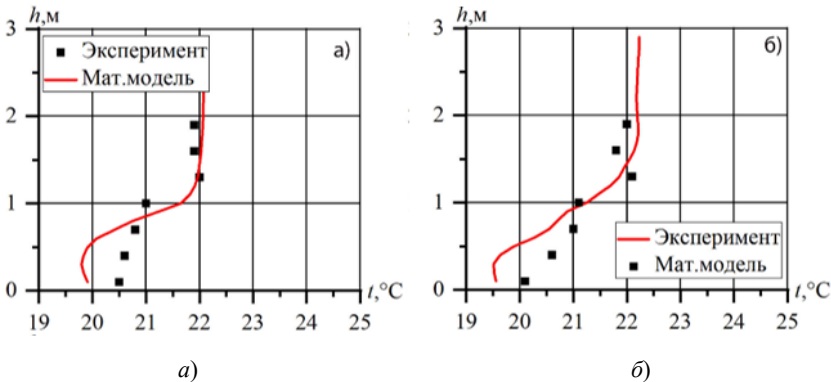


Рисунок 9 – Графики распределения температуры по высоте помещения:
а) точка замера №5; б) точка замера №6

Установлено, что тёплый воздух с высокой концентрацией CO_2 из верхней зоны помещения распространяется вниз вдоль холодных поверхностей окон (в пространстве между остеклением и жалюзи), частично разбавляется инфильтрационным воздухом и поступает в основной объём помещения в зоне подоконника (рисунок 10).

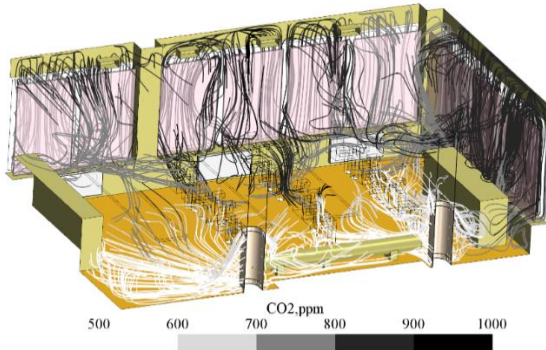


Рисунок 10 – Траектории движения воздуха от низкоскоростного воздухораспределителя CO₂

Наличие в помещении холодных вертикальных поверхностей (остекления) влияет на распределение концентраций CO₂, т.е. отличается от характерного для вытесняющей вентиляции и ухудшает качество воздуха в обслуживаемой зоне по сравнению с помещением, не имеющим холодных поверхностей. Данный эффект подтверждён как натурными, так и численными экспериментами. На рисунке 10 показано формирование воздушного режима в исследуемом помещении (траектории движения воздуха) при работе двух воздухораспределителей. Вблизи оконных конструкций (холодные поверхности) движение воздуха осуществляется сверху-вниз.

3. Предложен безразмерный параметр $П_L$, устанавливающий границы режимов при вытесняющей вентиляции в помещениях с размещением людей рядами.

На основе разработанных численных моделей низкоскоростного воздухораспределителя и воздушного режима помещения, валидированных лабораторным и натурным экспериментами, выполнена серия численных расчетов для определения факторов, влияющих на распределение параметров воздушной среды при вытесняющей вентиляции.

Исследования показали, что при увеличении соотношения между расходом воздуха и шириной зала меняется структура течения. При этом классическая термовытесняющая схема вентиляции, при которой основной движущей силой перемещения масс воздуха в помещении являются естественно-конвективные потоки от людей, нарушается. Помимо вертикального градиента начинает формироваться горизонтальный градиент по обслуживаемой зоне.

Для оценки влияния указанных выше параметров на характер и структуру течения с использованием пи-теоремы введён безразмерный режимный параметр Π_L , характеризующий соотношение скоростей вытесняющего и свободно-конвективных потоков в обслуживаемой зоне:

$$\Pi_L = \frac{L/b}{u_{\text{конв}} \cdot h_{0.3}}, \quad (1)$$

где L/b – удельный расход воздуха на единицу ширины зала, $\frac{\text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{м}}$; $u_{\text{конв}}$ – характерная скорость конвективного потока от людей, м/с; $h_{0.3}$ – высота обслуживаемой зоны, м; b – ширина помещения, м.

Для дальнейших расчетов принята скорость свободно-конвективного потока над человеком $u_{\text{конв}} = 0,2$ м/с, высота обслуживаемой зоны для сидящих людей $h_{0.3} = 1,5$ м.

Для исследования влияния режимного параметра Π_L на воздухораспределение рассмотрены шесть вариантов расчета (№R1 – №R6), отличающихся расходом воздуха, шириной и длиной зала, числом людей и температурой приточного воздуха. Исходные данные для вариантов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для численного моделирования

Параметры	Номера вариантов					
	№R1	№R2	№R3	№R4	№R5	№R6
Температура приточного воздуха, $t_{\text{пр}}$, °C	19,0	21,5	19,0	19,0	19,0	19,0
Количество людей, $N_{\text{людей}}$	20	20	40	84	84	84
Ширина помещения, b , м	7,2	7,2	7,2	21,6	7,2	3,6
Длина помещения, a , м	14,6	14,6	14,6	8,0	14,6	26,0
Расход приточного воздуха, L_0 , $\text{м}^3/\text{ч}$	884	1767	1767	3710	3710	3710
Режимный параметр, Π_L	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	1,0

На рисунках 11–13 представлены поля температуры и модуля скорости в продольном сечении зала с рядами людей при различных значениях режимного параметра Π_L . Анализ характера течения воздуха позволяет выде-

лить три характерных режима: пассивно термовытесняющий, описывающий традиционную схему вытесняющей вентиляции; и предложенные режимы – переходной и термопоршневый.

Пассивный термовытесняющий режим ($\Pi_L=0,1$, вариант №R1). При $\Pi_L \leq 0,1$ холодный приточный воздух опускается к полу и растекается вдоль него. При этом люди, находящиеся на пути распространения воздуха, способствуют движению воздуха: восходящие конвективные потоки от людей эжектируют приточный воздух, вытесняя вредности в верхнюю зону (рисунок 11).

Переходный режим ($\Pi_L=0,2$, варианты №R2, №R3, №R4). При $0,1 < \Pi_L < 0,5$ действие вынужденной конвекции начинает влиять на распространение свободно-конвективных потоков от людей (рисунок 12). Начинает проявляться горизонтальное изменение параметров вдоль обслуживаемой зоны.

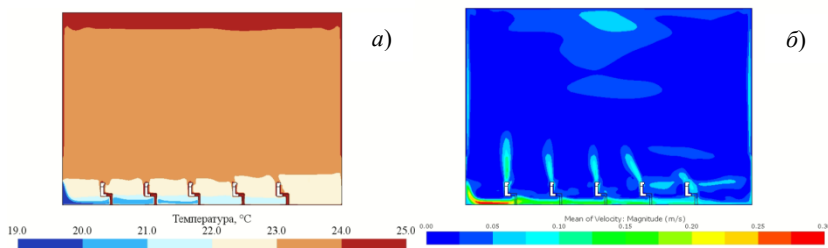


Рисунок 11 – Распределение параметров для Варианта №R1, режимный параметр $\Pi_L=0,1$: а) температура; б) модуль скорости

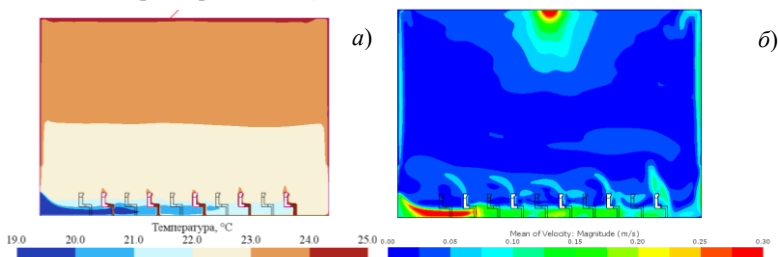


Рисунок 12 – Распределение параметров для Варианта №R3, режимный параметр $\Pi_L=0,2$: а) температура; б) модуль скорости

Варианты №R2, №R3 и №R4 отличаются геометрией, числом людей и температурой притока, но при $\Pi_L=0,2$ во всех случаях наблюдается картина: искажение свободно-конвективных струй без формирования устойчивого фронта распространения приточного потока.

Переходный режим ($0,1 < P_L < 0,5$) не поддаётся обобщённому описанию, так как структура течения в нём неустойчивая, и каждый проектный случай требует отдельного расчета методами 3D численного моделирования.

Термопоршневой режим ($P_L = 0,5$, вариант №R5; $P_L = 1,0$, вариант №R6). При $P_L \geq 0,5$ приточный воздух образует однонаправленный вытесняющий поток по обслуживаемой зоне с постепенной ассимиляцией теплоты от людей. При этом уровень вертикальной стратификации остается чётко выраженным.

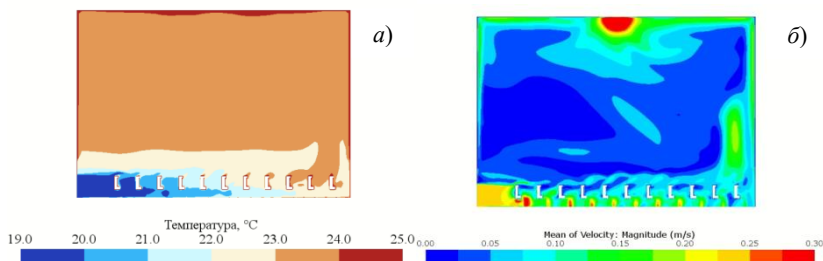


Рисунок 13 – Распределение параметров для Варианта №R5, режимный параметр $P_L = 0,5$: а) температура; б) модуль скорости

Формируется термопоршневой режим, комбинированный режим, сочетающий поршневое вытеснение с вертикальной стратификацией, характерной для пассивной термовытесняющей схемы. В этом режиме возникает выраженный горизонтальный градиент температуры и CO_2 , возрастающий от первого ряда людей к последнему.

Таким образом, из трёх рассмотренных режимов практический интерес для дальнейшего исследования представляет термопоршневой режим ($P_L \geq 0,5$), для которого существующие методы расчёта пассивной термовытесняющей вентиляции не обеспечивают требуемой точности: они основаны на гипотезе горизонтальной однородности параметров, которая при $P_L \geq 0,5$ несправедлива.

4. Для термопоршневого режима установлены эмпирические зависимости безразмерной температуры и концентрации CO_2 от локальных безразмерных комплексов в виде $\theta = f_1(Htr)$, $\chi_{\text{CO}_2} = f_2(Mtr)$, аппроксимируемые линейными функциями.

На основании проведённых численных исследований установлено, что изменение температуры воздуха в зоне нахождения человека при движении вытесняющего потока от воздухораспределителей к первому ряду и затем к последующим не является случайным, а подчиняется общей зависимости, для чего на основе теории размерностей предложены обобщённые безразмерные комплексы тепло- и массопереноса:

$$\text{Htr} = \frac{q_{\text{л}} \cdot x \cdot \rho_{\text{л}} \cdot b}{\rho \cdot C_p \cdot (t_{0.3} - t_0) \cdot L}, \quad (2)$$

$$\text{Mtr} = \frac{\dot{M}_{\text{CO}_2} \cdot x \cdot \rho_{\text{л}} \cdot b}{\rho \cdot (C_{0.3} - C_0) \cdot 1,53 \cdot 10^{-6} \cdot L} \quad (3)$$

где $\rho_{\text{л}}$ – плотность людей, чел/м²; $q_{\text{л}}$ – явные тепловыделения от одного человека, Вт/чел; t_0 – температура приточного воздуха, °C; $t_{0.3}$ – нормируемая температура в обслуживаемой зоне, °C; $\dot{M}_{\text{CO}_2}$ – выделения CO₂ от одного человека, кг/с; x – расстояние от первого ряда зрителей до текущего, м; ρ – плотность воздуха кг/м³; L – суммарный расход воздуха м³/с; $C_{0.3}$ – концентрация углекислого газа в обслуживаемой зоне, ppm; C_0 – концентрация углекислого газа на притоке соответственно, ppm; C_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C).

Безразмерные комплексы Htr, Mtr объединяют геометрические параметры зала, плотность размещения людей, расход приточного воздуха и нормируемые параметры обслуживаемой зоны. Htr – отношение теплопритока от людей на участке от первого ряда до текущего к тепловому потоку, необходимому для нагрева приточного воздуха от t_0 до $t_{0.3}$. Mtr – массовый поток CO₂, выделяемый людьми на участке от первого ряда до текущего, отнесенный к массовому потоку CO₂, который необходимо удалить для поддержания нормируемой концентрации в обслуживаемой зоне.

Для обобщения полученных результатов предложено использовать безразмерные значения температуры воздуха и концентрации углекислого газа:

$$\theta = \frac{t - t_0}{t_{0.3} - t_0}; \quad (4)$$

$$\chi_{\text{CO}_2} = \frac{C - C_0}{C_{0.3} - C_0} \quad (5)$$

На рисунке 14 приведены значения параметров в обслуживаемой зоне по мере удаления от воздухораспределителя, представленные в виде изменения безразмерных температуры воздуха и концентрации CO₂ от безразмерного комплекса теплопереноса Htr (рисунок 14 а) и безразмерного комплекса массопереноса Mtr (рисунок 14 б), полученные в ходе численных экспериментов.

Представленные на графиках режимы (№0 – №8) отличаются плотностью рассадки людей, расходом и температурой приточного воздуха, длиной и шириной помещения, а также типом низкоскоростного воздухораспределителя. Параметры для представленных на рисунке 14 расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для численного моделирования

Параметры	Номера вариантов								
	№0	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
Температура приточного воздуха, $t_{пр}$, °С	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	17,3	19
Плотность размещения людей, ρ_l , чел/м ²	0,97	0,48	0,72	1,21	1,15	0,83	0,65	0,97	0,97
Ширина помещения, b , м	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	7,2
Длина помещения, a , м	26	50	34	21	22	30	36	26	14,5
Расход приточного воздуха, L_0 , м ³ /ч	3710	3710	3710	3710	3710	3710	3710	2780	3710
Тип воздухораспределителей	пл	цил	пл	пл	пл	пл	пл	пл	пл
Режимный параметр, P_L	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,71	0,48

При обработке результатов численных исследований изменения температуры воздуха и концентрации углекислого газа по рядам определялись путём осреднения соответствующих величин по ячейкам расчётной сетки в пределах зоны, приходящейся на одного человека, с последующим осреднением полученных значений по ряду.

Получено, что при введении безразмерных комплексов тепло- и массопереноса все выполненные численные исследования распространения воздушного потока в обслуживаемой зоне помещений с размещением людей рядами могут быть описаны обобщёнными зависимостями для безразмерной температуры воздуха и безразмерной концентрации CO_2 .

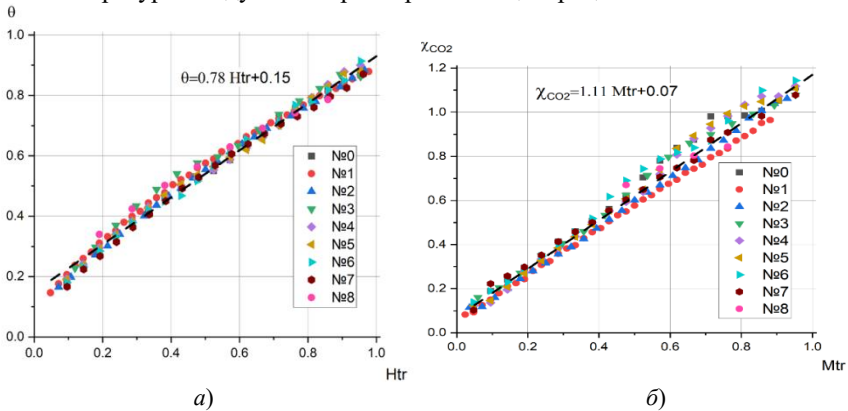


Рисунок 14 – Изменение параметров в обслуживаемой зоне: а) безразмерной температуры от безразмерного комплекса теплопереноса Htr ; б) безразмерной концентрации CO_2 от безразмерного комплекса массопереноса Mtr

Для аппроксимации экспериментальных данных использованы линейные зависимости. Статистические данные обобщающих уравнений $y=a+bx$ представлены в таблице 4.

Таблица 4 –Статистические данные обобщающих уравнений

y	X	a	b	r ²	Fstat
θ	Htr	0,152	0,784	0,99	15909
χ_{CO_2}	Mtr	0,068	1,108	0,98	8636

Примечание: r^2 –коэффициент детерминации; Fstat – критерий Фишера.

Обобщённые зависимости для расчета изменения температуры и концентрации углекислого газа в зоне нахождения людей вдоль пути распространения приточного воздуха будет иметь вид:

$$\theta = 0,784 \cdot Htr + 0.152, \quad (6)$$

$$\chi_{CO_2} = 1,108 \cdot Mtr + 0.068. \quad (7)$$

На основании проведенных исследований и полученных обобщённых зависимостей, определяющих изменения параметров температуры и углекислого газа приточного воздуха по мере распространения приточных струй от воздухораспределителей, предложена методика расчета.

5. Разработаны рекомендации по проектированию вытесняющей вентиляции, включающие инженерную методику расчёта воздухораспределения для термопоршневого режима.

Разработана методика расчета для помещений с массовым пребыванием людей, которые находятся в положении сидя. Данная методика позволяет определить температуру и концентрацию у самого удаленного человека от воздухораспределителя, а также в произвольном ряду людей, проанализировать зону обслуживания одним воздухораспределителем и прогнозировать параметры микроклимата при различных условиях эксплуатации:

1. Площадь обслуживаемого помещения «разбивается» на модули площадью $F_{0.3}=a \cdot b$, приходящейся на один воздухораспределитель. В частном случае модулем может быть всё помещение;

2. Определяется расход воздуха на один воздухораспределитель L_0 , м³/ч;

3. Подбирается воздухораспределитель так, чтобы при входе в обслуживаемую зону скорость воздуха не превышала нормируемые значения;

4. Рассчитывается удельный на ширину помещения расход приточного воздуха L_0/b ;

5. Если $L_0/b < 500$, то для расчета параметров среды следует воспользоваться теорией классической термopассивной вытесняющей вентиляции;

6. Если $L_0/b \geq 500$, то для определения увеличения температуры и концентрации CO_2 к последнему ряду рассчитать:

6.1. По исходным данным:

$\rho_{\text{л}}$ – плотность людей, чел/м²; $q_{\text{л}}$ – явные тепловыделения от одного человека, Вт/чел; t_0 – температура приточного воздуха, °C; $t_{0.3.}$ – нормируемая температура в обслуживаемой зоне, °C; $\dot{M}_{\text{CO}_2}$ – выделения CO_2 от одного человека, г/ч; a' – часть длины модуля, занятая людьми, м, рассчитывается значение безразмерного комплекса теплопереноса

$$\text{Htr}(a') = \frac{3,6 \cdot q_{\text{л}} \cdot a' \cdot \rho_{\text{л}} \cdot b}{\rho (t_{0.3.} - t_0) \cdot L_0}; \quad (8)$$

6.2. Рассчитывается величина безразмерной температуры в последнем ряду

$$\theta(a') = 0,784 \cdot \text{Htr}(a') + 0,152; \quad (9)$$

6.3. Рассчитывается величина температуры в обслуживаемой зоне последнего ряда

$$t(a') = \theta(a') \cdot (t_{0.3.} - t_0) + t_0; \quad (10)$$

6.4. Рассчитывается значение безразмерного комплекса массопереноса

$$\text{Mtr}(a') = \frac{\dot{M}_{\text{CO}_2} \cdot a' \cdot \rho_{\text{л}} \cdot b}{\rho \cdot (C_{0.3.} - C_0) \cdot 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot L_0}; \quad (11)$$

6.5. Рассчитывается величина безразмерной концентрации CO_2 в последнем ряду

$$\chi_{\text{CO}_2}(a') = 1,108 \cdot \text{Mtr}(a') + 0,068; \quad (12)$$

6.6. Рассчитывается величина концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне последнего ряда

$$C(a') = \chi_{\text{CO}_2}(a') \cdot (C_{0.3.} - C_0) + C_0. \quad (13)$$

Полученные значения $t(a')$, $C(a')$ сравниваются с нормативными параметрами. В случае, если рассчитанные значения оказываются выше нормируемых, то необходимо переопределить величины исходных данных. Для новых значений выполнить пункты п. 6.1–6.6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы

1. Анализ существующих методов расчёта вытесняющей вентиляции показал, что традиционные аналитические и полуэмпирические методы не позволяют достоверно описать изменение параметров воздушной среды при вентилировании помещений с размещением людей рядами, что приводит к систематическим ошибкам при проектировании.

2. Разработаны и верифицированы численные модели низкоскоростных воздухораспределителей, включая упрощённую модель с разделением поверхности истечения на три сектора. Показано, что упрощённая модель воспроизводит поле скорости в приточной струе на основном участке с погрешностью не более 8 % по сравнению с лабораторным экспериментом, что позволяет использовать её в инженерных расчётах вместо трудоёмких геометрически подробных численных моделей.

3. Проведён натурный эксперимент в учебной аудитории с вытесняющей вентиляцией и разработана валидированная численная модель помещения, учитывающая тепловыделения людей, инфильтрацию и теплообмен через ограждения. Согласование результатов подтверждает адекватность модели для дальнейших исследований.

4. Выявлен и обоснован эффект искажения вертикальной стратификации CO_2 под действием холодных поверхностей окон: ниспадающий поток переносит CO_2 из верхней зоны в обслуживаемую, что приводит к локальному повышению концентрации у пола. Эффект зафиксирован в натурном и численном экспериментах и должен учитываться при проектировании вытесняющей вентиляции.

5. Установлено, что при вытесняющей вентиляции в залах с рядами людей формируется горизонтальный градиент температуры и концентрации CO_2 , не учитываемый классическими методами, основанными на гипотезе горизонтальной однородности. Величина градиента возрастает с увеличением числа рядов и зависит от режима течения.

6. Введён безразмерный режимный параметр $P_L = \frac{L/b}{u_{\text{конв}} \cdot h_{0.3}}$, характеризующий отношение интенсивности вытесняющего потока к интенсивности конвективных потоков. Определены границы режимов: пассивный термовытесняющий ($P_L \leq 0,1$), переходный ($0,1 < P_L < 0,5$) и термoporшневой ($P_L \geq 0,5$). В этом режиме возникает выраженный горизонтальный градиент температуры и CO_2 , возрастающий от первого ряда людей к последнему.

7. Установлено, что тип и размеры низкоскоростного воздухораспределителя не оказывают существенного влияния на стратификацию температуры и CO_2 в объёме помещения: поля температуры и концентрации практически совпадают для различных типов воздухораспределителей.

8. Получены обобщённые зависимости безразмерной температуры θ и безразмерной концентрации χ_{CO_2} от безразмерных комплексов Ntr и Mtr :

$$\theta = 0,784 \cdot \text{Ntr} + 0.152; \chi_{\text{CO}_2} = 1,108 \cdot \text{Mtr} + 0.068$$

Показано, что различные комбинации параметров, приводящие к одинаковым значениям комплексов, дают одинаковое распределение θ и χ_{CO_2} .

9. Разработаны практические рекомендации по проектированию вытесняющей вентиляции, включающие инженерную методику расчёта воздухораспределения для термопоршневого режима. Указанная методика, содержащая полученные зависимости для расчёта температуры и концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне, вошла в «Указания по расчёту и применению воздухораспределителей завода «Арктос».

10. Использование полученных зависимостей и методики приводит к повышению эффективности систем вытесняющей вентиляции в общественных зданиях, в которых люди расположены рядами, обеспечивая нормируемые параметры микроклимата во всех рядах без необоснованного увеличения расхода воздуха.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в учёте нестационарных режимов течения (изменение количества людей во времени) и разработке программного модуля для автоматизированного расчёта распределения параметров на основе введённых комплексов.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. **Копылов К.А.** Численное исследование истечения низкоскоростного воздухораспределителя / К.А. Копылов // Инновации и инвестиции. - 2024.-№1.- С. 176–179.

2. **Копылов, К.А.** Разработка математических моделей для численного моделирования приточной струи из низкоскоростных воздухораспределителей / Д.М. Денисихина, К.А. Копылов, К.В. Кочарьянц // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 9. – С. 515–518.

3. **Копылов, К.А.** Влияние расположения источников теплогазовыделений на эффективность вытесняющей вентиляции / К.А. Копылов // Известия вузов. Строительство. – 2026. – № 6. – С. 74–84.

4. **Копылов, К.А.** Экспериментальные и численные исследования воздушного режима аудитории при вытесняющей вентиляции / К. А. Копылов, Д. М. Денисихина, К. В. Кочарьянц // Вестник гражданских инженеров. – 2026. – № 3(116). – С. 130–141.

Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 09.10.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 109.

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