

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Денисихина Дарья Михайловна

Санкт-Петербург – 2026

Оглавление

Введение	4
1 Теории и практики применения системы вытесняющей вентиляции	9
1.1 Характеристика вытесняющей вентиляции	9
1.2 Методы расчета вытесняющей вентиляции	14
1.3 Зональная модель расчета вытесняющей вентиляции	23
1.4 Выводы по первой главе.....	28
2 Разработка численной модели воздухораспределителя	29
2.1 Система нелинейных дифференциальных уравнений Навье-Стокса для задач воздухообмена в помещениях общественных зданий	30
2.2 Уравнения Рейнольдса.....	33
2.3 Модель турбулентности k-ε стандартная	35
2.4. Разработка детализированной численной модели низкоскоростного воздухораспределителя	37
2.4.1 Геометрия воздухораспределителя.....	38
3 Численные и лабораторные исследования низкоскоростного воздухораспределителя.....	47
3.1 Лабораторные испытания низкоскоростного воздухораспределителя ...	47
3.2 Разработка упрощенной численной модели низкоскоростного воздухораспределителя.....	57
3.3 Обоснование достоверности модели воздухораспределения	60
3.3.1 Проведение натурного эксперимента	60
3.3.2 Разработка модели учебной аудитории	66
3.3.3 Результаты исследования	69
3.4 Выводы по третьей главе.....	76
4 Влияние геометрических и термодинамических параметров на эффективность работы вытесняющей вентиляции.....	77

4.1 Влияние расхода приточного воздуха на температурную и концентрационную стратификацию в помещении	77
4.2 Влияние глубины модуля помещения, обслуживаемого низкоскоростным воздухораспределителем	82
4.3 Влияние расположения источников тепло-газовыделений в помещении.....	85
4.4 Влияние типа воздухораспределителя	87
4.5 Влияние режимного параметра.....	92
4.6 Влияние плотности размещения людей.....	98
4.7 Обобщённые зависимости для распределения температуры и концентрации CO ₂ в обслуживаемой зоне.....	107
4.8.Методика расчета воздухораспределения при термопоршневом режиме вытесняющей вентиляции	113
4.9. Выводы по четвертой главе	118
Заключение.....	120
Список литературы	123
Приложение А – Акты внедрения в проектирование.....	140
Приложение Б – Результаты лабораторных аэродинамических испытаний и математического моделирования	143
Приложение В – Результаты математического моделирования	144
Приложение Г – Распределение температуры и концентрации углекислого газам.....	159

Введение

Актуальность выбранной темы. 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 воздухораспределения 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. Батурин, 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, Н. 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, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности».

Научная новизна работы:

- 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 PL , характеризующий отношение интенсивности вытесняющего потока к интенсивности конвективных потоков; определены границы режимов вытесняющей вентиляции: пассивный термовытесняющий ($PL \leq 0,1$), переходный ($0,1 < PL < 0,5$) и термoporшневой ($PL \geq 0,5$), 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 обобщённые зависимости безразмерной температуры θ и безразмерной концентрации χ_{CO_2} от безразмерных комплексов N_{tr} и M_{tr} .

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

Практическая значимость 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 термодоршневого режима установлены эмпирические зависимости безразмерной температуры и концентрации CO_2 от локальных безразмерных комплексов в виде $\theta=f_1(N_{tr})$, $\chi_{CO_2}=f_2(M_{tr})$, аппроксимируемые линейными функциями;
5. Разработаны рекомендации по проектированию вытесняющей вентиляции, включающие инженерную методику расчёта воздухораспределения для термодоршневого режима.

Достоверность результатов исследований подтверждается натурными и лабораторными экспериментами с применением поверенных средств измерений. Достоверность моделей течения подтверждается их физической

непротиворечивостью, согласованием результатов расчета с экспериментальными данными, использованием сертифицированных программных средств.

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 2025г., 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 подтверждается актами о внедрении результатов исследований в практическую область работы ООО «ММ-Технологии» (г. Санкт-Петербург), ООО «Арктос» (г. Санкт-Петербург) и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО СПбГАСУ (Акт о внедрении от 24.06.2026 г. № 2А–ОД–05).

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

1 Теории и практики применения системы вытесняющей вентиляции

1.1 Характеристика вытесняющей вентиляции

Выбор принципиальной схемы подачи воздуха системами вентиляции зависит от санитарно-гигиенических требований и экономической целесообразности применения систем [64,66]. Различают два основных принципа вентилирования помещений: перемешиванием и вытеснением [5]. При проектировании традиционно предпочтение отдается перемешивающим системам, способным полностью обеспечить параметры микроклимата. Однако, в современной практике все чаще к помещениям предъявляются повышенные требования по уровню комфорта [28,62,88,90,], а к системам вентиляции – по снижению энергопотребления [61,92,93].

Вследствие пандемии вируса *COVID-19* значительно повышены требования к воздухораспределению и параметрам микроклимата не только в медицинских учреждениях, но и в общественных и административных помещениях [85, 95, 119].

В настоящее время системы вытесняющей вентиляции широко применяются в производственных помещениях с достаточно большой теплонапряженностью [58,69,87]. Наибольшую эффективность такие системы показывают при поступлении теплоты и загрязнений от единичных источников [1,56,72]. Системы вытесняющей вентиляции с подачей воздуха «снизу-вверх» получили широкое применение в помещениях со статичным (нахождение в определенном месте без движения) пребыванием людей и источников тепловыделений: зрительные залы, читальные залы, офисы, переговорные, учебные аудитории, центры обработки данных [9,35,47,97,117].

Принципиальную схему работы вытесняющей вентиляции с подачей воздуха «снизу-вверх» можно описать следующим образом [122,123] (рисунок 1.1): организация подачи большого количества приточного воздуха с низкой скоростью $v_{пр}=0,2-0,3$ м/с неизотермической струей с разностью температур Δt воздуха помещений $t_{п}$ и приточного воздуха $t_{пр}$, равной 1–3 °С. Подача воздуха

осуществляется в нижнюю часть обслуживаемой зоны с удалением воздуха из верхней зоны помещения [6].

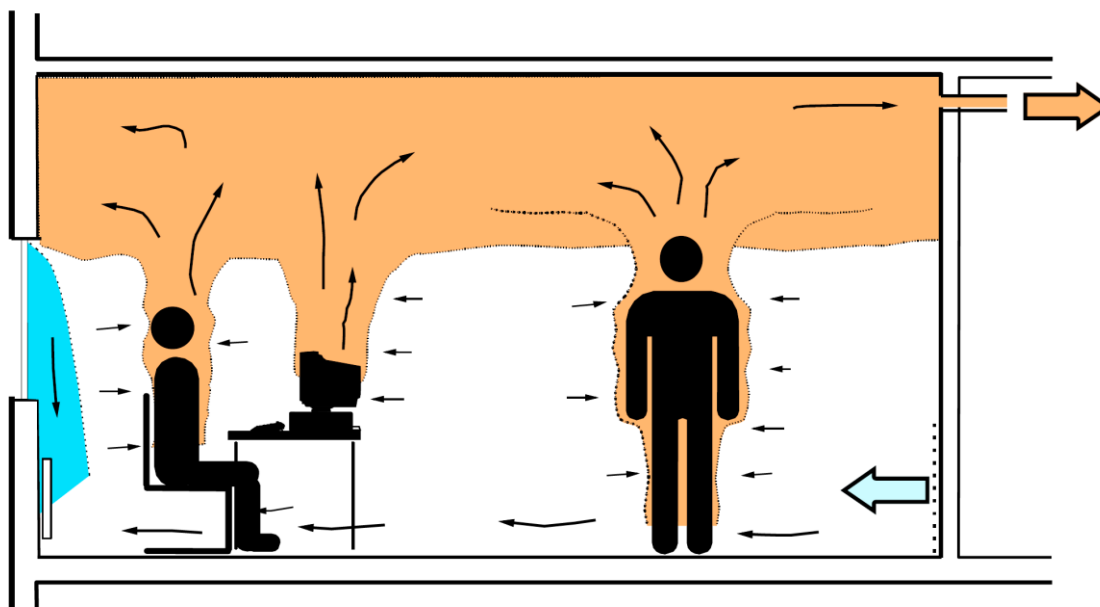


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение воздушных потоков в помещении с вытесняющей вентиляцией

При некоторых условиях (распределение воздуха от пола в компьютерных центрах и в административных помещениях) возможно увеличение разности температур до $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ [56].

Воздушный поток, выходящий из воздухораспределителя, имеющий малую скорость на выходе ($0,1 - 0,2\text{ м/с}$) и обладающий низким уровнем турбулентности [1,56], формирует равномерный поток воздуха во всей нижней части помещения.

При работе вытесняющей вентиляции с подачей воздуха «снизу-вверх» формируются восходящие конвективные потоки от источников теплоты, «подхватывающие» приточный воздух из нижней зоны помещения и направляющиеся в верхнюю зону помещения к вытяжным устройствам.

Движение воздуха во всем объеме помещения можно описать принципом «поршня», когда происходит выталкивание приточным воздухом и конвективными потоками всех вредностей в верхнюю часть помещения, создавая расслоение воздушных масс, тем самым уменьшая концентрацию вредностей в нижней части на $20 - 25\%$ [98].

Эффективность вытесняющей вентиляции [79,98] по сравнению с перемешивающей определяется коэффициентом эффективности воздухообмена $K_{эф}$, который для вытесняющей вентиляции составляет, как правило 2,3. Экономическая эффективность определяется иногда более низкими значениями расхода приточного воздуха, что снижает затраты на охлаждение (потребление электроэнергии) [36,37,39]. Также использование схемы воздухораспределения «снизу-вверх» позволяет уменьшить теплопоступления в зону обслуживания от осветительного оборудования (снижение явных теплопоступлений – на 18%).

Схема циркуляции воздуха внутри помещения при использовании вытесняющей вентиляции определяется конвективными потоками от источников теплоты. В качестве источников теплоты рассматриваются люди, оборудование, нагретые поверхности.

Особое внимание необходимо уделить процессу формирования конвективных потоков от человека. В комфортной среде средняя температура поверхности тела человека составляет 30 – 34 °С; вокруг него формируется пограничный слой воздуха толщиной 50 мм, который обволакивает поверхность человека и движется вверх, создавая профиль конвективного потока, по мере подъема профиль восходящего потока теряет форму и преобразуется в струю. Следует отметить, что источник, помещенный в среду с неподвижным воздухом, изменяет равновесное состояние подвижности воздуха и формирует узкие восходящие или нисходящие потоки; направление потоков зависит от температуры источника относительно температуры воздуха в помещении.

Впервые применение вытесняющей вентиляции началось в промышленных помещениях; принципы подачи воздуха в нижнюю часть помещения описал В.В Батурин в 1940 годах [2]. Также широкое распространение вытесняющей вентиляции получило в Скандинавских странах во второй половине 20 века. Основные преимущества такой организации воздухообмена в помещении – повышенное качество воздуха в обслуживаемой зоне и энергоэффективность всей системы [108,127].

Одной из основополагающих характеристик помещений с постоянным пребыванием людей, непосредственно определяющих тепловой комфорт и качество воздуха в обслуживаемой зоне, является воздушно-тепловой режим (ВТР). В данной работе основное внимание направлено на исследование внутренней задачи воздушного режима помещения, обеспечивающей формирование полей скоростей, температур, концентраций внутри обслуживаемого помещения. К внутренней задаче относятся следующие вопросы:

- определение параметров внутреннего воздуха: температура, скорость, концентрация вредных веществ;
- определение количества поступающих вредностей (теплоизбытки, газы, пары, пыль);
- расчет требуемого воздухообмена в помещении;
- расчет воздухораспределения;
- анализ пространственного распределения вредностей при различных условиях подачи приточного воздуха для выбора оптимального варианта расположения воздухораспределителей;
- расчет аэродинамических и температурных характеристик приточной струи.

Эффективность вытесняющей вентиляции по сравнению с перемешивающей в значительной степени определяется характером распределения теплоизбытков в объеме помещения. Наибольшую эффективность вытесняющая вентиляция показывает, когда теплопоступления в помещение происходят от единого источника или группы статичных источников с умеренными теплоступлениями [9, 29,127]. Основными преимуществами данной схемы является высокое качество воздуха в обслуживаемой зоне и малые скорости приточного воздуха, а следовательно, и в объеме помещения. Сравнение показателей вентиляции помещений перемешиванием и вытеснением подтверждено многочисленными экспериментами и исследованиями [9,29].

При реализации систем вытесняющей вентиляции следует упомянуть факторы, при которых эффективность системы уменьшается:

- наличие холодных поверхностей, у которых образуются нисходящие конвективные потоки;
- если источник вредностей не выделяет явную теплоту или тепловыделения являются незначительными;
- источник расположен вне зоны влияния потоков приточного воздуха;
- помещение с технологическими процессами, при которых выделяется большое количество теплоты;
- помещение имеет малую высоту (менее трех метров).

При расчете вытесняющей вентиляции решаются следующие задачи:

- разделение помещения на верхнюю и нижнюю зону; определяется назначением помещения; высота обслуживаемой зоны принимается с учетом температурной стратификации для вытесняющей вентиляции;
- определение и расчет тепловых источников в нижней зоне помещения, включающих: людей, оборудование, нагретые поверхности, теплопоступления через ограждающие конструкции, инфильтрация наружного воздуха;
- определение и расчет восходящих конвективных потоков над источниками теплоты в нижней зоне;
- расчет и обеспечение требуемого расхода приточного, подаваемого с малыми скоростями в нижнюю часть обслуживаемого помещения, в достаточном количестве, которое способное «затопить» весь объем помещения, распределиться по нижней зоне и не вызвать процессов перемешивания;
- обеспечение вытеснения вредностей в верхнюю часть помещения за счет конвективных потоков [29,109] для обеспечения качества воздуха;
- обеспечение требуемых параметров внутреннего воздуха [47,63].

Все физические процессы при формировании воздушно-теплого режима объясняются законами переноса импульса, теплоты и массы [15,16], что делает задачу определения распределения параметров внутри помещения неравномерной. Неравномерность по вертикали для систем вытесняющей вентиляции определяется температурной стратификацией.

Согласно фундаментальным положениям гидрогазодинамики и теплофизики, поля параметров воздушной среды в помещении могут быть полностью описаны системой дифференциальных уравнений: уравнение неразрывности, сохранения импульса (уравнение Навье-Стокса) и уравнение сохранения энергии. Подробнее данные методы рассмотрены в главе 2.

Для постановки и формулирования численной модели необходимо выявить следующие параметры: распределение температуры, скорости и концентраций вредных веществ в объеме помещения. Процесс разработки таких моделей и постановки задач описан в главе 3.

1.2 Методы расчета вытесняющей вентиляции

В существующей практике при проектировании и расчете вытесняющей вентиляции применяется метод, определяющий высоту стратификации воздуха и определении требуемого расхода приточного воздуха через расчет баланса расхода конвективных потоков от тепловых источников [75].

Температура, скорость, расход воздуха в потоке над источниками различной геометрической формы определяются эмпирическим, аналитическим и вычислительными методами гидрогазодинамики [32,67 68].

Как правило, конвективные потоки имеют турбулентный тип течения [57,68,102]. Теплота, передаваемая от источника к прилегающим слоям воздуха, побуждает к расширению граничных слоев воздуха, которые по мере расширения становятся менее плотными и вытесняются вверх, в свою очередь менее нагретый воздух из окружающего пространства замещает нагретый поток, нагревается, увеличивается в объеме и перемещается вверх [32,114,120]. Расход воздуха пропорционально увеличивается по высоте от источника теплоты (рисунок 1.2). Многочисленные исследования формирования конвективных потоков от различных источников теплоты позволяют точно описать структуру конвективных потоков над точечными и линейными источниками [32,68,120]. Получены аналитические

зависимости для определения распределения скоростей, температур и объемных расходов. Зависимости осевой скорости, избыточной температуры, расхода воздуха от точечных и линейных и вертикальных источников представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Характеристики тепловых конвективных потоков над точечными и линейными источниками

Наименование характеристик	Ламинарное течение	Турбулентное течение
Расход воздуха $q_{v,z}$, л/с – для точечного источника, л/(с·м) – для линейного источника	$q_{v,z} = 5 \cdot \Phi^{\frac{1}{3}} \cdot z^{\frac{5}{3}}$	$q_{v,z} = 13 \cdot \Phi^{\frac{1}{3}} \cdot z$
Осевая скорость V_z , м/с	$V_z = 1,128 \cdot \Phi^{\frac{1}{3}} \cdot z^{-\frac{1}{3}}$	$V_z = 0,067 \cdot \Phi^{\frac{1}{3}}$
Осевая избыточная температура, $\Delta\theta_z$, °С	$\Delta\theta_z = 0,329 \cdot \Phi^{\frac{2}{3}} \cdot z^{-\frac{5}{3}}$	$\Delta\theta_z = 0,094 \cdot \Phi^{\frac{2}{3}} \cdot z^{-1}$

Примечание: Φ – конвективный тепловой поток источника, Вт; z – расстояние от точечного источника, м.

Таблица 2 – Характеристики конвективных потоков вдоль вертикальных поверхностей

Наименование характеристик	Ламинарное течение	Турбулентное течение
Расход воздуха $q_{v,z}$, л/(с·м)	$q_{v,z} = 2,87 \cdot \Delta\theta^{0,25} \cdot z^{0,75}$	$q_{v,z} = 2,75 \cdot \Delta\theta^{0,4} \cdot z^{1,2}$
Толщина пограничного слоя, δ , м	$\delta = 0,05 \cdot \Delta\theta^{-0,25} \cdot z^{0,25}$	$\delta = 0,11 \cdot \Delta\theta^{-0,1} \cdot z^{0,7}$
Максимальная скорость, V_z , м/с	$V_z = 0,1 \cdot \sqrt{\Delta\theta \cdot z}$	$V_z = 0,1 \cdot \sqrt{\Delta\theta \cdot z}$

Примечание: $\Delta\theta$ – разность температур поверхности и окружающего воздуха, °С.

Следует отметить, что полученные выражения подходят для очень малого размера источника теплоты, и не учитывают в себе фактические размеры источников [4], однако эти исследования позволяют получить приемлемую оценку расхода воздуха в конвективном потоке для реального объекта.

Наиболее распространенным способом учета действительных размеров источника при расчете расхода воздуха в конвективном потоке является представление в виде виртуального источника (рисунок 1.2). Возможность оценки положения виртуального источника даёт метод «максимального случая» и «минимального случая» [4,84].

а) Точечный источник

б) Линейный источник

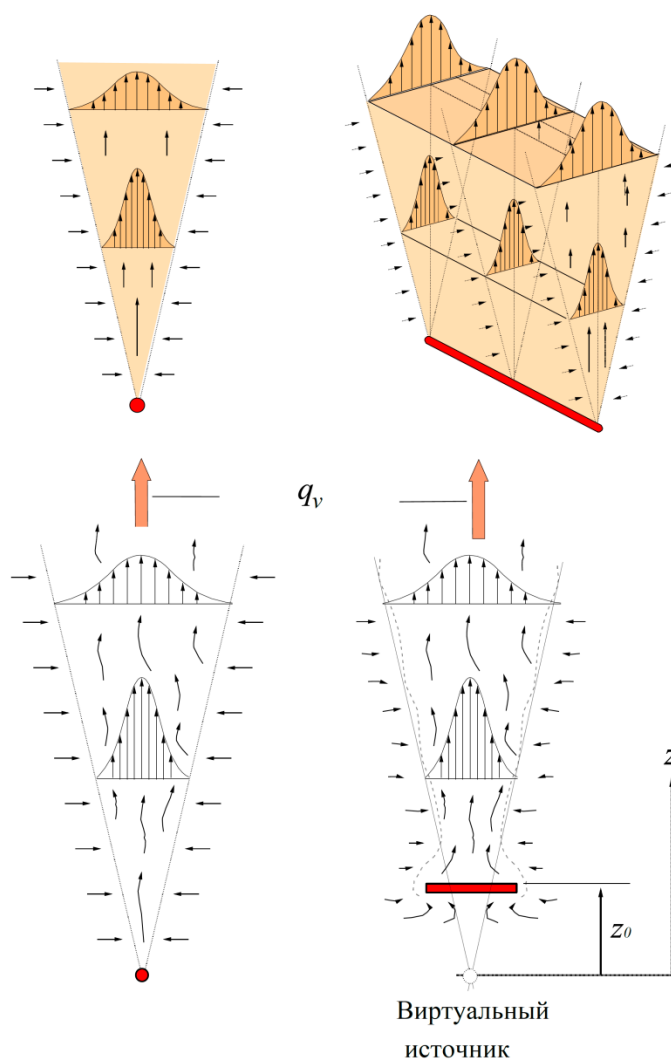


Рисунок 1.2 – Конвективные потоки в помещении от точечного и линейного источников

Второй вариант расчета, предложенный на основе работ [4,84], следующий:

- устанавливается толщина пограничного слоя, формирующегося наверху вертикальной поверхности источника (таблица 2), δ , м ;
- к полученному значению прибавляется диаметр источника D , м;

– рассчитывается положение виртуального источника

$$z_0 = 2,1 \cdot (D + 2\delta), \text{ м} \quad (1.1)$$

к объемному расходу, вычисленному по зависимостям из таблицы 1, прибавляется объемный расход от вертикальных поверхностей.

При расчете расходов от конвективных потоков учитывается влияние температурной стратификации в помещении, так как характеристики конвективных потоков зависят от разности плотностей (температур) в потоке и окружающего воздуха. Температурную стратификацию в помещениях описывали В.В. Батурин [3], И.А. Шепелев [67], Е.В. Кудрявцев [44], G.A. Batchelor [74], B.R. Morton [104], P.V. Nielsen [108], H. Brohus [77] и другие [89,113,116].

Границы зон зависят от расположения источников теплоты в помещении, соотношения расходов воздуха в конвективных потоках и расхода приточного воздуха [17]. При расположении источников теплоты преимущественно в нижней зоне увеличивается температурный градиент, в свою очередь в верхней зоне сохраняется постоянство температур, эта закономерность симметрична при изменении расположения тепловых источников.

Основным при расчете систем вытесняющей вентиляции является определение минимального расхода приточного воздуха $G_{пр}$, обеспечивающего одновременно два условия: обеспечение нормируемой температуры и удаление вредных веществ.

Сложность расчета заключается в том, что температура удаляемого воздуха t_{yx} в верхней части помещения неизвестна и определяется решением систем уравнений теплового баланса [59]. В балансе учитываются все значимые источники тепlopоступлений: конвективная составляющая от людей и оборудования, радиационные поступления, солнечная радиация и теплопередача через наружные ограждающие конструкции [15,16,17]. В современной практике существуют три основных подхода к решению:

– аналитическая модель, основанная на балансовых уравнениях массы и энергии; температура удаляемого воздуха определяется через эффективность стратификации и температуру притока;

– зональная модель, при которой помещение делится по высоте на несколько объемов; уравнения баланса решаются для каждой;

– *CFD* моделирование, при котором решается полная система трехмерных дифференциальных уравнений Навье-Стокса.

Аналитическая модель.

Основные параметры, которые требуется определить при использовании аналитического метода:

- температурную стратификацию и концентрацию вредных веществ;
- расход воздуха приточного воздуха м³/ч;
- количество и тип низкоскоростных воздухораспределителей.

Аналитические модели, приведённые к упрощенной схеме, не позволяют решать задачи, в которых присутствует сложная геометрия помещения или особые условия, и применимы в основном для помещений с малой тепловой нагрузкой и равномерным распределением тепловых источников. Способ, основанный на аналитических расчетах и математических моделях, приведён в [53,63,65,83].

Ввиду сложностей учёта всех процессов формирования воздухообмена в методику вводятся допущения:

- температурный градиент, равный

$$\Delta t = \frac{t_{yx} - t_{пр}}{h_{\pi}}, \quad (1.2)$$

принимается линейным;

– тепловой баланс лучистой $Q_{\text{л}}$ и конвективной $Q_{\text{к}}$ теплоты рассчитываются отдельно для верхней и нижней зоны;

– температура зоны обслуживания или рабочей зоны принимается постоянной по высоте ($h_{\text{рз}}=1,5$ м от пола – в помещении, где работают сидя, и $h_{\text{рз}} = 1,8$ м – где работают стоя);

– перепад температур по фигуре человека от уровня лодыжек до уровня головы не должен превышать 2-3 °C;

– величина градиента температуры по высоте помещения $\Delta t/h_{\pi}$ не должна превышать 2-2,5 °C/м или 1,2-1,8 °C/м, в зависимости от вида работ [115].

Расчет включает определение основных параметров:

- теплотехнический расчет всех ограждающих конструкций, и расчет тепlopоступлений от всех источников теплоты;
- расход приточного воздуха $G_{\text{пр}}$;
- температурную стратификацию, температуру помещения t и концентраций вредных веществ;
- температуру удаляемого воздуха $t_{\text{ух}}$;
- мощность и характер распределения конвективных потоков от источников теплоты Q_k ;
- коэффициент эффективности всей системы.

Определение средней конвективной составляющей теплообмена в помещении $q_{\text{к.ср}}$. Исходя из тепловой мощности каждого источника теплоты $Q_{\text{ист}}$ конвективная составляющая источника $q_{\text{к.ист}}$ определяется по зависимости

$$q_{\text{к.ср}} = \frac{\sum(Q_{\text{ист}} \cdot q_{\text{к.ист}})}{\sum q_{\text{ист}}} \quad (1.3)$$

Расчет среднего значения лучистой составляющей теплообмена в рабочей зоне $q_{\text{л.ср}}$, исходя из полной тепловой мощности $q_{\text{ист}}$ и лучистой составляющей $q_{\text{л.ист}}$ каждого источника теплоты:

$$q_{\text{л.ср}} = \frac{\sum(Q_{\text{ист}} \cdot q_{\text{л.ист}})}{\sum q_{\text{ист}}} \quad (1.4)$$

Определение коэффициента эффективности воздухообмена $k_{\text{э(п)}}$ в первом приближении:

$$k_{\text{э(п)}} = \frac{1}{q_{\text{л.ср}} \cdot (1 - q_{\text{к.ср}})} \quad (1.5)$$

Выбор расчетной разности температур приточного воздуха и воздуха рабочей зоны $\Delta t_p = t_{\text{пр}} - t_{\text{р.з}}$ в зависимости от расстояния от рабочего места до воздухораспределителя.

Предварительный расчет величины воздухообмена $G_{\text{пр(п)}}$. Принимая в первом приближении $k_{\text{э}} = 0,5 \cdot k_{\text{э(п)}}$, величина теплообмена определяется по уравнению:

$$G_{\text{пр(п)}} = \frac{\sum Q_{\text{ист}}}{C_p \cdot \Delta t_p \cdot k_3}. \quad (1.6)$$

Определение коэффициента эффективности воздухообмена k_3 с использованием методики и номограмм из работы [58].

Сравнение значения k_3^* с значением k_3 , рассчитанным как $0,5 k_{3(\text{п})}$. Если величина $\frac{(k_3^* - k_3)}{k_3^*}$ окажется менее 0,1, то переходим к расчету температуры удаляемого воздуха, если эта величина более 0,1, принимаем $k_3 = k_3^*$ и повторяем расчет.

Расчет температуры удаляемого воздуха t_{yx} [51]:

$$t_{yx} = t_{\text{пр}} + k_3 \cdot \Delta t_p. \quad (1.7)$$

Расчет температуры приточного воздуха $t_{\text{пр}}$, исходя из заданной температуры в рабочей зоне $t_{\text{р.з}}$, по формуле:

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{р.з}} - \Delta t_p. \quad (1.8)$$

Расчет температурного градиента $\Delta t/h_{\text{п}}$ по высоте помещения H :

$$\Delta t/h_{\text{п}} = \frac{t_{yx} - t_{\text{р.з}}}{H - h_{\text{р}}} = \frac{\Delta t_p \cdot (k_{3(\text{п})} - 1)}{H - h_{\text{р.з}}}. \quad (1.9)$$

Если полученное значение $\Delta t/h_{\text{п}}$ больше нормативного, следует уменьшить величину Δt_p и повторить расчет.

Расчет приточного воздухообмена с использованием окончательных значений k_3 и Δt_p выполняется по зависимости (1.8).

Рассмотрим существующие методики расчета зарубежных организаций *ASHRAE* (Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха) [70,82], *REHVA* (Федерация европейских ассоциаций по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха) [84].

Американское общество инженеров предлагает методику расчета вытесняющей вентиляции, заключающуюся в определении наибольшего расхода на ассимиляцию теплоизбытков Q_{DV} , рассчитываемых по зависимости (1.10), и требуемого расхода приточного воздуха Q_{oz} по зависимости (1.12).

$$Q_s = \max[Q_{DV}, Q_{oz}] \quad (1.10)$$

$$Q_{DV} = \frac{0,295q_{oe} + 0,132q_i + 0,185q_{ex}}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta t_{hf}} \quad (1.11)$$

где q_{oe} – теплопоступление от источников теплоты,

q_i – теплопоступление от освещения;

q_{ex} – теплопоступление от солнечной радиации;

Δt_{hf} – разница температуры на уровне головы и стоп человека.

Коэффициенты: 0,295; 0,132; 0,185 – эмпирические доли конвективной теплоты, которые формируют температурную стратификацию, получены из экспериментальных исследований учеными *Mundt* [105,106,107], *Nielsen* [108,110] и другими исследователями [76,99].

Коэффициент 0,295 – доля явного тепловыделения от человека, влияющего на конвективные струи, влияющие на стратификацию. Остальная часть выделяемой человеком теплоты поднимается в верхнюю часть помещения.

Коэффициент 0,132 – доля теплоты от осветительного оборудования, которая передается конвективным потоком в нижнюю зону помещения, остальное – лучистый теплообмен, направленный на нагрев окружающих поверхностей.

Коэффициент 0,185 – доля теплового потока от оборудования, передающего энергию конвективным потоком, остальное – лучистый теплообмен.

По стандарту *ASHRAE* 62.1-2011 [70,71,82] определяется расход наружного воздуха в обслуживаемой зоне

$$Q_{oz} = \frac{R_p \cdot P_z + R_A \cdot A_z}{E_z} \quad (1.12)$$

где R_p – требуемый расход воздуха на человека,

P_z – количество людей в обслуживаемой зоне;

R_A – требуемый расход на единицу площади;

A_z – площадь обслуживаемой зоны;

E_z – эффективность вентиляции.

Температура приточного воздуха

$$t_s = t_{sp} - \Delta t_{hf} - \frac{A_z \cdot q_t}{0,584 \cdot Q_s^2 + 1,208 \cdot A \cdot Q_s} \quad (1.13)$$

Температура вытяжного воздуха:

$$t_e = t_s + \frac{q_t}{1,208 \cdot Q_s} \quad (1.14)$$

Коэффициенты 0,584, 1,208 – эмпирические коэффициенты, связывающие давление воздуха и конвективный теплообмен в модели *REHVA*. Физически они являются производными от произведения площади поперечного сечения помещения, плотности воздуха и удельной теплоемкости.

Коэффициент 0,584 описывает влияние скоростного (динамического) напора воздуха на теплоперенос. При увеличении расхода воздуха его вклад растет квадратично, что отражает турбулентный характер на границе слоев.

Коэффициент 1,208 – произведение расхода воздуха на площадь, описывающую ламинарную составляющую переноса теплоты в нижней части помещения.

Данные коэффициенты связывают гидро-газодинамику воздуха и геометрию помещения для определения температуры притока.

Одним из отслеживаемых параметров является разность температуры в верхней части помещения и вдоль пола; согласно рекомендациям необходимо, чтобы температура приточного воздуха была не ниже 17,2 °C (63 °F). Если при расчете по зависимостям (1.13), (1.14) значение выше, необходимо выполнить расчет по выравниванию баланса по следующей зависимости

$$Q_{DV} = \frac{q_t}{1,208 \cdot (t_e - t_s)} \quad (1.15)$$

Европейская ассоциация предоставляет два метода расчета расхода приточного воздуха для вытесняющей вентиляции. Первый основывается на тепловом комфорте и расчете расхода на ассимиляцию тепловых нагрузок, второй – на уровне качества воздуха в помещении и прогнозируется от распределения вредностей в помещении. Далее приведен метод расчета на ассимиляцию тепловых нагрузок.

Расчет начинается с определения полной тепловой нагрузки помещения

$$q_{total} = q_{oe} + q_i + q_{ex} \quad (1.16)$$

Максимальная температура в помещении на основе стратификации воздуха по высоте помещения:

$$t_e - t_s = 2 \cdot s \cdot h \quad (1.17)$$

где s – рекомендованный градиент температуры в помещении;

h – высота помещения.

Температура приточного воздуха:

$$t_s = t_{sp} - s \cdot (h + h_{sp}) \quad (1.18)$$

Расход приточного воздуха:

$$q = \rho \cdot C_p \cdot Q \cdot \Delta t \quad (1.19)$$

$$Q_{DV} = \frac{q_t}{\rho \cdot C_p \cdot (t_e - t_s)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_t}{\rho \cdot C_p \cdot s \cdot h} \quad (1.20)$$

Температура вдоль уровня пола:

$$t_{af} = t_s + \frac{1}{2} \cdot \frac{q_t}{\rho \cdot C_p \cdot Q_s} \quad (1.21)$$

$$s = \frac{(t_e - t_s)}{2 \cdot h} \quad (1.22)$$

1.3 Зональная модель расчета вытесняющей вентиляции

Метод расчета вытесняющей вентиляции через уравнения теплового баланса в зонах помещения был предложен Гримитлиным М.И, Дацюк Т.А, Крупкиным Г.Я. [52]. Рассмотрено применение зональной модели для расчета вытесняющей вентиляции в производственных зданиях.

Анализ литературных данных [17,56,58,94] позволяет сделать вывод, что данная методика также справедлива для расчета вытесняющей вентиляции общественных помещений [70, 82,110].

На рисунке 1.3 показана типовая схема распространения тепловых потоков в помещении при работе вытесняющей вентиляции [29].

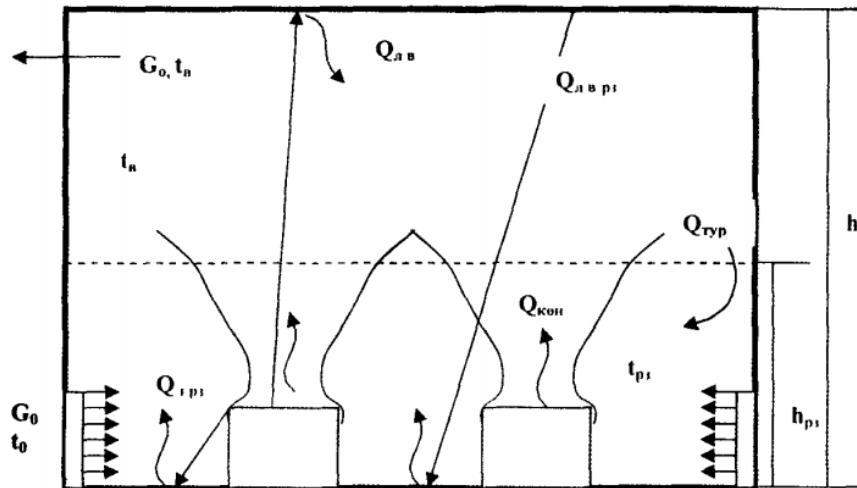


Рисунок 1.3 – Схема распространения воздушных и тепловых потоков в помещении при вытесняющей вентиляции

Уравнение теплового баланса поверхностей в нижней зоне помещения определяется:

$$Q_{лн} + Q_{лв-н} = Q_{кн}. \quad (1.23)$$

Уравнение теплового баланса поверхностей в верхней зоне:

$$Q_{лв} + Q_{лв-н} = Q_{кв}. \quad (1.24)$$

Уравнение теплового баланса воздуха в нижней обслуживаемой зоне:

$$Q_{кв} + \beta \cdot Q_{кист} + Q_{тв-н} = Q_n. \quad (1.25)$$

Уравнение теплового баланса воздуха в верхней зоне:

$$Q_v = Q_{кв} + (1 - \beta) \cdot Q_{кист} - Q_{тв-н}. \quad (1.26)$$

Применительно к рассматриваемым случаям

$$Q_{лн} = \varphi(1 - \psi) \cdot Q_0. \quad (1.27)$$

$$Q_{лв} = (1 - \varphi) \cdot (1 - \psi) \cdot Q_0 + Q_{инс}. \quad (1.28)$$

$$Q_{лв} = \psi \cdot Q_k. \quad (1.29)$$

$$\beta = \frac{Q_{кистрз}}{Q_{кист}}, \quad (1.30)$$

$$Q_H = C_p \cdot G_0 \cdot (t_{pz} - t_0). \quad (1.31)$$

$$Q_B = C_p \cdot G_0 \cdot (t_B - t_{pz}). \quad (1.32)$$

Решение системы уравнений (1.27 – 1.32) получено относительно комплекса:

$$K_t = \frac{t_B - t_0}{t_{pz} - t_0}, \quad (1.33)$$

получившего название коэффициента эффективности воздухообмена по температуре:

$$K_t = \frac{1 + \frac{k \cdot \alpha_l \cdot f_l + \alpha_{тур} \cdot f_{тур}}{C_p \cdot G_{пр}} t_B - t_0}{[\varphi \cdot (1 - \psi) + \beta \cdot \psi + \frac{k \cdot \alpha_l \cdot f_l + \alpha_{тур} \cdot f_{тур}}{C_p \cdot G_{пр}}]} \quad (1.34)$$

В теории вентиляции справедливо следующее положение: чем выше значение коэффициента эффективности воздухообмена $K_{эф}$, тем ниже требуемый воздухообмен и, как правило, выше эффективность всей системы.

Как правило, при перемешивающей вентиляции коэффициент эффективности воздухообмена приближен к 1, для вытесняющей вентиляции, основанной на принципе стратификации воздуха по высоте помещения, $K_{эф} > 1$, что подтверждено экспериментальными и численными исследованиями. Определение коэффициента эффективности воздухообмена $K_{эф}$ необходимо для расчета расхода приточного воздуха в вентилируемых и кондиционируемых помещениях с тепловыделениями. В частности, величина воздухообмена для ассимиляции избыточной теплоты определяется по зависимости:

$$G_0 = \frac{Q_{изб} - Q_{мо}}{c \cdot K_t \cdot (t_{pz} - t_{пр})} \quad (1.35)$$

$$G = \frac{\Pi_{вр}}{K_{эф} \cdot (c_{pz} - c_{пр})} \quad (1.36)$$

где $K_{эф}$ – коэффициент эффективности воздухообмена;

$$K_{эф} = \frac{c_{уд} - c_{пр}}{c_{pz} - c_{пр}} \quad (1.37)$$

Приведённая структура зависимости (1.34) показывает, что лучистый и турбулентный теплообмен в помещении способствуют переносу теплоты между верхней и нижней зонами и, в определённой степени, «сглаживают» температурную стратификацию. Очевидно, что для случаев перемешивающей и вытесняющей вентиляции значения коэффициента турбулентного теплообмена $\alpha_{\text{тур}}$ будут различны.

Для вытесняющей вентиляции, когда в помещении формируется устойчивое температурное расслоение по высоте и выделяются две характерные зоны, нижняя – условно чистая, верхняя – с аккумуляцией теплоты и загрязнений, турбулентный теплообмен определяется градиентом температуры по высоте в зоне разделения. Коэффициент турбулентного теплообмена может быть определён с помощью зависимости (1.38).

В условиях устойчивой стратификации величина коэффициента турбулентного теплообмена $\alpha_{\text{тур}}$ существенно ниже его значения в условиях равномерного (изотермического) распределения температуры по высоте, что объясняется подавлением турбулентных пульсаций архимедовой (подъёмной) силой, препятствующей вертикальному перемешиванию. Данное явление, известное как затухание турбулентности в стратифицированных средах, достаточно хорошо изучено [29, 67, 98,].

$$\alpha_{\text{тур}} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot A_{\text{тур}} \cdot \frac{dT}{dz}}{t_{\text{верх}} - t_{\text{рз}}} - 1 \quad (1.38)$$

Значение $A_{\text{тур}}$ в условиях стратификации воздуха может быть рассчитано по формуле:

$$A_{\text{тур}} = A_0 \cdot \left(1 + \frac{10}{3} \cdot Ri\right)_2^3, \quad (1.39)$$

как функция числа Ричардсона, Ri .

Число Ri согласно [56]:

$$Ri = \frac{g}{T} \cdot \left(\frac{\frac{dT}{dz}}{(\frac{dV}{dz})^2} \right). \quad (1.40)$$

Формула (1.34) отражает баланс механизмов теплопереноса:

- I слагаемое знаменателя – определяет долю теплоты от источников тепловыделений - конвективная составляющая, поступающая в воздушную среду;
- II слагаемое знаменателя – описывает теплообмен за счет излучения от нагретых поверхностей; теплота аккумулируется, а затем передается в помещение;
- III слагаемое знаменателя – описывает турбулентный теплообмен между различными зонами.

Таким образом, зависимость (1.34) в явном виде показывает, что увеличение доли лучистой и турбулентной составляющих теплообмена приводит к усилению вертикального переноса теплоты и, как следствие, к снижению степени стратификации. Следовательно, при проектировании систем вытесняющей вентиляции необходимо минимизировать нежелательный турбулентный перенос, избегать высокоскоростных струй, препятствий на пути восходящих конвективных потоков.

Проектирование систем вытесняющей вентиляции, как правило, базируется на аналитических расчетах. Применение программных комплексов вычисления гидродинамики *CFD* становится целесообразным и востребованным при проектировании нестандартных и уникальных задач [24,27, 33, 63].

Уже исследованные задачи позволяют описать относительно простую и методику расчета, которая показывает удовлетворительный результат для большинства случаев. Однако процесс формирования математической задачи и определения всех граничных условий требует дополнительных навыков владения и остается недоступной для большинства специалистов, что в свою очередь приводит к потребности создания унифицированных зависимостей описывающие воздухораспределения при вытесняющей вентиляции без применения численного моделирования.

Важнейшим критерием корректности выполненного расчета является проверка условия: если полученное значение уровня температурной стратификации оказывается меньше высоты обслуживаемой зоны, это свидетельствует о невозможности обеспечения нормируемых параметров микроклимата и требуется уменьшить величину разности температуры и повторить расчет.

1.4 Выводы по первой главе

1. Рассмотренные методы расчёта вытесняющей вентиляции основаны на гипотезе горизонтальной однородности на фиксированной высоте параметры воздушной среды одинаковы во всех точках помещения. Для помещений с расположением людей это допущение в общем случае необоснованно, поскольку каждый следующий ряд омывается воздухом, нагретым и загрязнённым предыдущими рядами.

2. Особенности формирования течения при движении воздуха вдоль рядов людей и возникающий при этом горизонтальный градиент температуры и CO_2 в литературе не исследованы: рассматривались только единичные или равномерно распределённые источники. Как следствие, горизонтальный градиент не учитывается при проектировании, что может приводить к систематической ошибке.

3. Для выявления закономерностей формирования течения и распределения параметров при расположении людей рядами требуется проведение численных исследований, поскольку аналитические методы не позволяют описать эти процессы, а экспериментальное изучение всего многообразия геометрических и режимных параметров затруднено. Численное моделирование даёт возможность проанализировать поля скорости, температуры воздуха и концентрации CO_2 и получить исходные данные для обобщённых зависимостей.

4. Для корректного задания граничных условий на приточных устройствах при численном моделировании помещений с вытесняющей вентиляцией необходима разработка математической модели низкоскоростного воздушораспределителя, воспроизводящей неравномерность истечения.

2 Разработка численной модели воздухораспределителя

В современных общественных помещениях основным потребителем энергии является оборудование, обеспечивающее заданные параметры микроклимата, к которым относятся системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Учитывая влияние многочисленных внутренних и внешних факторов, в настоящее время для исследований воздушного режима помещений широко используется математическое моделирование.

Для численных исследований тепловоздушного режима в помещениях необходимо, в том числе, корректное задание геометрически сложных низкоскоростных воздухораспределителей [100]. Такие устройства формируют на выходе поток с существенно неравномерным профилем скорости, что напрямую влияет на дальнейшее развитие струи в обслуживаемой зоне.

Для построения математических моделей при решении задач в различных областях таких физических процессов, как: гидрогазодинамика [34, 50], тепломассобмен [30,31], акустика, многофазные потоки и прочие [18,21,45], применяются расчетные комплексы, основанные на решении системы трехмерных дифференциальных уравнений [10,19,22,54,79]. Наиболее популярными расчетными комплексами являются: *Simcenter STAR-CCM+* [38], *STAR-CD*, *FLUENT*, *CFX*, *Ansys* [73] и др. Основное преимущество данных комплексов является возможность расчета формирования воздушных потоков в объеме помещения без трудоемких и дорогостоящих лабораторных и натурных экспериментов [86]. Построение полей распределения исследуемых параметров воздуха, точечные замеры в построенных математических моделях позволяют проанализировать гипотезы, спрогнозировать и оптимизировать динамику воздухораспределения и эффективность работы систем вентиляции, данные методы широко используются в современной практике исследования воздухораспределения [20, 26, 51,91].

Несмотря на указанные преимущества, применение численного моделирования для конкретных типов систем вентиляции, в частности для вытесняющей, сопряжено с необходимостью учёта целого ряда специфических факторов [31]. Кроме того,

известные работы по математическому моделированию вытесняющей вентиляции [41,43,46,96] демонстрируют использование различных моделей турбулентности и граничных условий, что указывает на отсутствие универсальных рекомендаций. В связи с этим возникает необходимость в создании специальных математических моделей, которые в полной мере отражают как конструктивные особенности низкоскоростных воздухораспределителей, так и параметрические характеристики помещений общественных зданий с минимальным количеством допущений на основе применения методов численного моделирования. Начальным этапом, обеспечивающим достоверность применения численного моделирования, является обоснованный выбор параметров расчётной модели и модели турбулентности, соответствующих условиям решаемой задачи [124].

2.1 Система нелинейных дифференциальных уравнений Навье-Стокса для задач воздухообмена в помещениях общественных зданий

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию физико-математического моделирования вентиляционных процессов, ориентированного на достижение нормативных параметров микроклимата. Ключевым методологическим подходом к решению краевых задач, описывающих распределение температуры, относительной влажности, концентраций газовых примесей и вредных веществ в помещениях с источниками тепло-, влаго- и газовыделений, является численное решение осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса. Указанные задачи характеризуются сложным взаимодействием свободных конвективных течений и низкоскоростных приточных струй, формируемых воздухораспределителями систем вытесняющей вентиляции.

Метод, предложенный О. Рейнольдсом в конце XIX века, возник из необходимости практического расчёта турбулентных течений, которые невозможно описать детерминированно из-за хаотического характера пульсаций. Осреднение уравнений Навье–Стокса по времени (*RANS*) позволило перейти от описания каждой

турбулентной пульсации к анализу осреднённых параметров потока, что сделало задачу вычислительно разрешимой для инженерной практики. С появлением вычислительной гидродинамики (*CFD*) в 1970-х годах и её внедрением в вентиляционную отрасль [80,81].

RANS модели обладают рядом неоспоримых преимуществ – требует на один-два порядка меньше вычислительных ресурсов, чем методы крупных вихрей (*LES*), и на несколько порядков меньше, чем прямое численное моделирование (*DNS*).

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0. \quad (2.1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau} + \bar{\tau}_t) + \rho \vec{g}, \quad (2.2)$$

где тензор вязких напряжений $\bar{\tau}$ определен с помощью реологического закона Ньютона:

$$\bar{\tau} = \mu(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \vec{I}, \quad (2.3)$$

а $\bar{\tau}_t$ – неизвестный тензор турбулентных напряжений, определяемый с помощью одной из полуэмпирических моделей турбулентности.

Приведенные выше уравнения (2.1) – (2.3) используются для решения ряда практических задач, связанных с моделированием турбулентных течений.

При решении, где плотность течения зависит только от температуры и не зависит от давления:

$$\rho = f(T) = \frac{p_0}{RT}. \quad (2.4)$$

Такой подход позволяет значительно сократить время расчета по сравнению со случаем использования полных уравнений для сжимаемого газа.

Применение полных уравнений для сжимаемого газа сопровождается существенными вычислительными мощностями и затратами, что стимулирует использование упрощенных подходов. Для решения данной задачи широкое

распространение в *CFD* моделировании получило приближение Буссинеска. Данный подход позволяет избежать вычислительных трудностей для течений с малым числом *Маха*, приводя решение к несжимаемой формулировке. Приближение подразумевает учет зависимости плотности воздуха от температуры в уравнениях сохранения только для сил плавучести $(\rho(T)\vec{g})$.

При решении практических задач, связанных с теплообменом и распространением примесей (CO_2 , паров H_2O), требуется определение не только векторного поля скорости, но и полей температуры, концентрации и относительной влажности.

Уравнение сохранения массы для i -ой компоненты (перенос компоненты пара):

$$\frac{\partial \rho c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_i \vec{V}) = -\nabla \cdot (\vec{J}_i + \vec{J}_{it}), \quad (2.5)$$

где диффузионный поток i -ой компоненты:

$$\vec{J}_j = -\rho D \nabla c_i, \quad (2.6)$$

а, $\vec{J}_{it}$ – неизвестный турбулентный поток массы i -ой компоненты, определяемый с помощью полуэмпирической модели турбулентности

Величины в уравнениях (2.1) – (2.6) являются осредненными по всему спектру турбулентных пульсаций.

Для замыкания осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса применяют дополнительно уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}[\rho E + p]) = \nabla \cdot (\vec{V} \cdot [\bar{\tau} + \bar{\tau}_t]) - \nabla \cdot (\vec{q} + \vec{q}_t) + S_r, \quad (2.7)$$

молекулярная составляющая вектора плотности теплового потока:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T + \sum_j h_j \vec{J}_j, \quad (2.8)$$

где $\vec{q}_t$ – неизвестная турбулентная составляющая вектора плотности теплового потока, определяемая с помощью полуэмпирической модели турбулентности;

S_r – источниковый член радиационного потока теплоты.

Для помещений зданий, в которых присутствуют существенные теплопритоки от оборудования, освещения, систем напольного отопления и охлаждения или имеет место значительный нагрев поверхностей за счет солнечной радиации, необходимо учитывать лучистую составляющую тепловых потоков, в противном случае это приводит к заметному искажению расчетных полей температуры подвижности воздуха в помещении.

В связи с этим, для расчета вентиляционных течений систему уравнений (2.1) – (2.7) необходимо дополнить уравнениями радиационного теплообмена.

2.2 Уравнения Рейнольдса

Классическая процедура вывода уравнений Рейнольдса состоит в осреднении нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса по временному интервалу, намного большему характерных времен всех турбулентных пульсаций рассматриваемого течения.

Данная операция позволяет выделить осреднённую (детерминированную) составляющую течения и отделить от неё турбулентные флуктуации, что является основой для построения практически всех современных моделей турбулентности, используемых в инженерных расчётах.

Средние значения параметров потока определяются в соответствии с выражением:

$$\bar{U}(\vec{x}) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U(\vec{x}, t) dt \quad (2.9)$$

В результате в осреднённых уравнениях появляются корреляции пульсационных величин $\overline{\tau_t} = -\overline{\rho u'_i u'_j}$, $\vec{J}_{it} = -\overline{\rho \vec{v}' c'_i}$, $\vec{q}_t = -\overline{\rho \vec{v}' h'}$, значения которых неизвестны, а следовательно система уравнений (2.1) – (2.8) незамкнута. Поэтому для замыкания системы уравнений используются различные полуэмпирические модели турбулентности.

Большинство моделей турбулентности используют обобщенную гипотезу Буссинеска, которая предполагает линейную связь между тензором Рейнольдсовых напряжений $\bar{\tau}_t$ и тензором скоростей деформаций:

$$\bar{\tau}_t = \mu_t(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3}\mu_t \nabla \cdot \vec{V} \vec{I} - \frac{2}{3}\rho k \vec{I}, \quad (2.10)$$

где μ_t – турбулентная вязкость, Па·с, которая рассчитывается с помощью одной из полуэмпирических моделей турбулентности.

По аналогии с гипотезой Буссинеска о турбулентной вязкости, связывающей напряжения с градиентом скорости, гипотеза градиентной диффузии позволяет описать турбулентный перенос массы. В её основе лежит допущение о том, что турбулентный поток массы) $\vec{J}_{it}$ для i -го компонента газовой смеси компоненты смеси газов такие, как CO_2 , пропорционален градиенту среднемассовой концентрации этого компонента:

$$\vec{J}_{it} = -\frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla c_i, \quad (2.11)$$

Аналогично, согласно градиентной гипотезе, выражается величина вектора турбулентного теплового потока $\vec{q}_t$ через осредненные параметры течения:

$$\vec{q}_t = -\lambda_t \nabla T + \sum_j h_j \vec{J}_{jt}, \quad (2.12)$$

а турбулентная теплопроводность выражается при помощи аналогии Рейнольдса:

$$\lambda_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}, \quad (2.13)$$

где Pr_t – турбулентный аналог числа Прандтля, как правило, полагаемый равным константе ($Pr_t = 0,9$);

Sc_t – турбулентное число Шмидта, характеризующее соотношение процессов турбулентного переноса импульса и вещества в потоке, также полагаемый равным константе ($Sc_t = 0,9$).

Таким образом, осреднение по Рейнольдсу позволяет перейти от детерминированного описания турбулентного движения, требующего сверх детальных сеток и шагов по времени, к инженерно-приемлемой формулировке, в

которой влияние турбулентности моделируется через осреднённые характеристики, что широко применяется в задачах вентиляции и воздухораспределения.

В настоящее время в практике вычислительной гидродинамики (*CFD*) разработан широкий спектр полуэмпирических моделей турбулентности, различающихся по степени сложности, вычислительным затратам и области применимости. К числу наиболее распространённых относятся семейство k - ε , k - ω и *SST* модели турбулентности, последняя является удачной комбинацией k - ε и k - ω подходов и демонстрирует повышенную точность в областях течения с сильным градиентом.

Вместе с тем, как обоснованно отмечается в фундаментальных обзорах [101], по исследованиям турбулентности крупные когерентные структуры потока существенно различаются от одного течения к другому, что обусловлено высокой чувствительностью турбулентных режимов к граничным условиям, геометрии и воздействию внешних сил. Существующие модели замыкания, как правило, калибруются на ограниченном классе течений, и их применимость к нестандартным или сильно анизотропным течениям требует отдельного обоснования.

Тем не менее, для решения практических инженерных задач, включая задачу вытесняющей вентиляции и истечение из низкоскоростного воздухораспределителя, основным подходом остаётся именно метод, использующий осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (*RANS*). Этот выбор обусловлен, прежде всего, адекватностью требуемых вычислительных ресурсов.

2.3 Модель турбулентности k - ε стандартная

В рамках k - ε модели турбулентности, являющейся одной из наиболее распространённых полуэмпирических моделей замыкания в вычислительной гидродинамике (*CFD*) [125,126], решаются два дополнительных дифференциальных уравнения переноса: уравнение для кинетической энергии турбулентности k (характеризует интенсивность турбулентных пульсаций) и уравнение для скорости её

диссипации ε (определяет масштаб турбулентности, на котором происходит рассеяние энергии в теплоту).

Данная модель была разработана Б. Э. Лаундером и Д. Б. Сполдингом в 1974 году [96] и первоначально предназначалась для расчёта струйных течений, к числу которых относится и большинство вентиляционных потоков (приточные струи, конвективные потоки над людьми и оборудованием). Выбор именно двухпараметрической схемы k - ε обусловлен тем, что для описания турбулентного переноса недостаточно знания только масштаба скорости (кинетической энергии), а требуется также знание характерного пространственного масштаба турбулентности (связанного с ε). Благодаря способности обеспечивать рациональную точность для широкого класса турбулентных течений, включая свободные струи, пристеночные течения, течения с рециркуляцией и течения с плавучестью, при использовании соответствующих поправок k - ε модель и её модификации *Realizable* k - ε получили широкое распространение при решении разнообразных прикладных инженерных задач. В частности, в практике проектирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВиК) данная модель остаётся «стандартом выбора» для предварительных расчётов и оптимизации воздухораспределения, включая и задачи вытесняющей вентиляции, благодаря своему балансу между вычислительной эффективностью и достоверностью результатов.

Вместе с тем, следует отметить ограничения стандартной k - ε модели, особенно для сильно анизотропных течений и зон отрыва. В таких случаях часто применяются более сложные модели рейнольдсовых напряжений (*RSM*) или используются нестационарные подходы, однако для типовых инженерных задач с умеренными требованиями к точности k - ε модель остаётся востребованным и надежным инструментом.

Как отмечено выше, в модели турбулентности записываются два дополнительных уравнения для расчета кинетической энергии турбулентности k и скорости её диссипации ε . Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_B - \rho \varepsilon, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 1} C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} P_B - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.15)$$

где генерационный член в уравнениях переноса (2.14), (2.15);

$$P_k = \mu_t S^2; S^2 = 2S_{ij}S_{ji};$$

P_B – дополнительный генерационный член, учитывающий влияние сил плавучести на характеристики турбулентности $P_B = -\frac{1}{Pr_t} \frac{\mu_t}{\rho} \vec{g} \cdot \nabla \rho$;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – турбулентные числа Прандтля для k и ε .

Турбулентная вязкость в k - ε модели определяется по формуле:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (2.16)$$

Эмпирические константы, входящие в уравнения (2.14) – (2.16):

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Также существует модификация стандартной k - ε модели – нелинейная или квадратичная k - ε модель турбулентности. Нелинейная k - ε модель вместо использования гипотезы Буссинеска (2.10), предполагает нелинейную связь между тензором рейнольдсовых напряжений и тензором скоростей деформации. Модель хорошо зарекомендовала себя для существенно анизотропных потоков, течений с сильной завихренностью.

2.4 Разработка детализированной численной модели низкоскоростного воздухораспределителя

Численное исследование тепловоздушного режима помещений с вытесняющей вентиляцией требует корректное задание граничных условий на приточных устройствах.

Низкоскоростные воздухораспределители представляют собой геометрически сложные устройства. Детальное воспроизведение их конструкции сопряжено с большими вычислительными затратами, однако без такого воспроизведения невозможно получить достоверную картину истечения и, следовательно, корректно поставить задачу о воздухораспределении в помещении. В связи с этим первой задачей численного исследования явилась разработка подробной модели воздухораспределителя, позволяющей установить характер истечения и оценить влияние внутренней геометрии на структуру приточной струи.

Для численного моделирования в работе применялся метод конечных объемов. При использовании данного метода расчетная область разбивается на систему непересекающихся конечных объемов (ячеек). В центре каждой ячейки располагается узел, где вычисляются основные физические параметры: скорость, температура, давление и т. д. Изменение определяемых величин внутри объема формируется за счет баланса конвективных и диффузионных потоков через его грани. В стационарном режиме этот баланс равен нулю. Сформированный в итоге дискретный аналог исходной системы уравнений описывает законы сохранения массы и энергии для каждого элемента расчетной сетки.

2.4.1 Геометрия воздухораспределителя

3D геометрия низкоскоростного воздухораспределителя 1ВНК200 построена в программном комплексе *SolidWorks* по размерам, снятым с натурного образца (рисунок 2.1), который испытывался в лабораторных условиях. Воздухораспределитель состоит из двух перфорированных цилиндров разного диаметра, вставленных соосно один в другой. Между цилиндрами предусмотрены конструктивные элементы, предназначенные для выравнивания потока по высоте воздухораспределителя [8]. Также внутри корпуса установлен отбойник в виде конуса.

Такая конструкция формирует сложное трёхмерное течение с неравномерным распределением скорости по поверхности истечения, что определяет необходимость детального воспроизведения геометрии при численном моделировании.



Рисунок 2.1 – Воздухораспределитель 1ВНК 200: а) натурный образец, б) твердотельная геометрия

Граничные условия. Задача решалась в неизотермической постановке. Расчётная область представляла собой объём размерами $20 \times 20 \times 10$ м, в котором размещался воздухораспределитель. Граничные условия назначались в соответствии с условиями лабораторного эксперимента:

Граничные условия:

- стены и перекрытия – непроницаемая стенка (*Wall*), температура поверхности $t = 25$ °C;
- входной патрубок – массовый расход (*Inlet*) $L = 434$ м³/ч
- выходные отверстия – массовый расход (*Outlet*) $L = 434$ м³/ч;
- температура приточного воздуха $t = 19$ °C;

Соответствие граничных условий лабораторному эксперименту обеспечивает возможность прямого сопоставления результатов численного и физического моделирования, представленного в разделе 3.3.

Численные расчёты с идентичными исходными данными выполнены в двух программных комплексах – *Simcenter STAR-CCM+* и *ANSYS CFX*. Применение двух независимых вычислительных платформ преследовало несколько целей: оценку устойчивости результатов к программной реализации модели турбулентности, учёт влияния схемной вязкости и численной диффузии, а также сопоставление двумерной осесимметричной и трёхмерной постановок.

В *2D* осесимметричной постановке размеры и количество элементов сетки определялись методом сеточной сходимости. В *3D*-постановке процедура сеточной сходимости не была завершена: увеличение числа ячеек сверх 68 млн оказывалось невозможным по вычислительным ресурсам, в связи с чем расчёты проводились на максимально доступной сетке.

В таблице 2.1 приведены параметры используемых расчетных сеток. Фрагмент расчётной сетки, использовавшийся при проведении расчетов в программном комплексе *Simcenter STAR-CCM+* представлен на рисунке 2.3, расчётная сетка содержит 68 млн ячеек; наибольшее сгущение выполнялось в области отверстий перфорированных листов. В *2D*-модели для программного комплекса *ANSYS CFX* расчётная сетка содержит 25 млн ячеек (рисунок 2.2). При этом размер ячеек в *2D* модели меньше, чем в *3D* модели, поскольку вся вычислительная мощность сосредоточена в одной плоскости, что позволяет более детально описать структуру течения вблизи перфорации.

Таблица 2.1 – Параметры расчётной сетки

Инструмент исследования	Модель турбулентности	Описание модели	Количество расчетных ячеек, млн. ⁺
<i>ANSYS CFX</i>	k- ϵ	Осесимметричная постановка, рассмотрен сектор 7°15', конструкция ВР подробно воспроизведена	25
<i>STAR-CCM+</i>	«стандартная» k- ω	3D постановка, конструкция ВР подробно воспроизведена	68

2.4.2 Результаты трёхмерного моделирования в *Simcenter STAR-CCM+*

В 3D-постановке расчёт выполнялся в полной постановке без использования допущений о симметрии. Для замыкания уравнений Рейнольдса применялась k - ε модель турбулентности – модель, наиболее подходящая для описания пульсационных характеристик струйных течений.

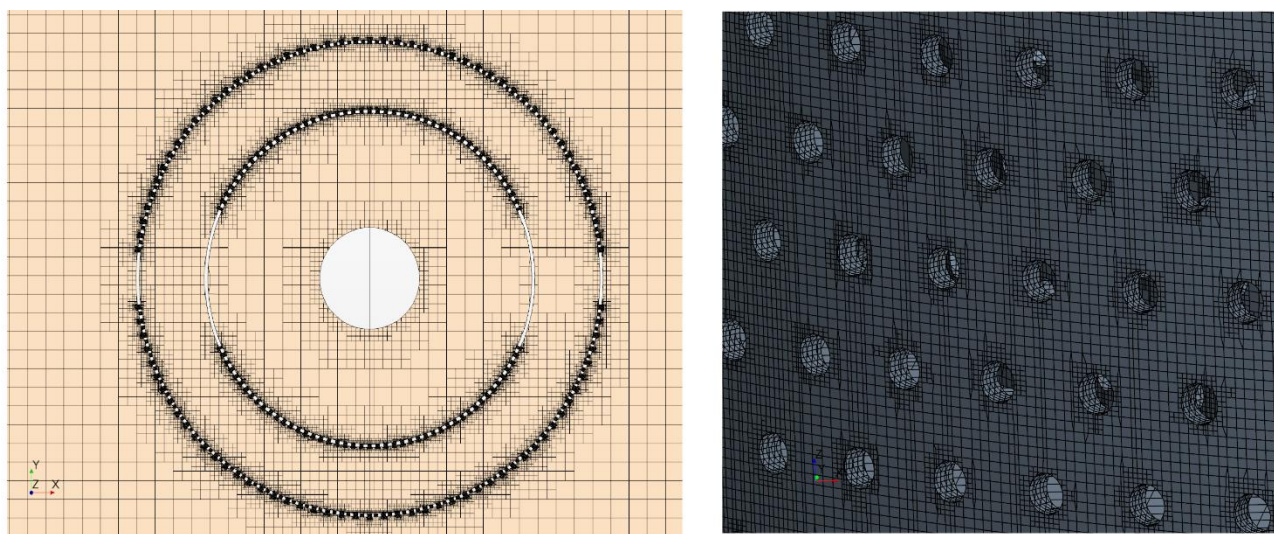


Рисунок 2.2 – Расчётная сетка для низкоскоростной воздухораспределителя *STAR-CCM+*

Поля модуля скорости в продольном сечении XZ и в горизонтальных сечениях $Z=0,075$ м, $Z=0,140$ м, $Z=0,275$ м приведены на рисунках 2.3 – 2.6.

Анализ продольного сечения (рисунок 2.3) показывает, что струя, выходящая из воздухораспределителя, имеет сложную форму. Вблизи плоскости истечения за счет перфорации формируются отдельные струйные течения, которые далее сливаются в единый поток. Максимальные скорости (0,3–0,4 м/с) сосредоточены непосредственно у выхода из воздухораспределителя; по мере удаления от него скорость монотонно убывает. В структуре течения можно выделить поток, формируемый нижней частью воздухораспределителя и обладающий наибольшей скоростью. На выходе он отклонён от горизонтали примерно на 45° (рисунок 2.3). После объединения с потоками, истекающими из средней и верхней зон, формируется единая струя, которая распространяется вдоль поверхности пола. Форма

результатирующего течения обусловлена действием сил плавучести, а также влиянием отбойника, конструктивных элементов внутри корпуса.

На горизонтальных сечениях (рисунки 2.3 – 2.6) отчётливо выражена неосесимметричность течения: распределение скорости имеет сложную лепестковую структуру, число и расположение максимумов не соответствует равномерному распределению по окружности. Это означает, что перфорация воздухораспределителя формирует не равномерный кольцевой поток, а систему отдельных струй, взаимодействующих между собой [23,41].

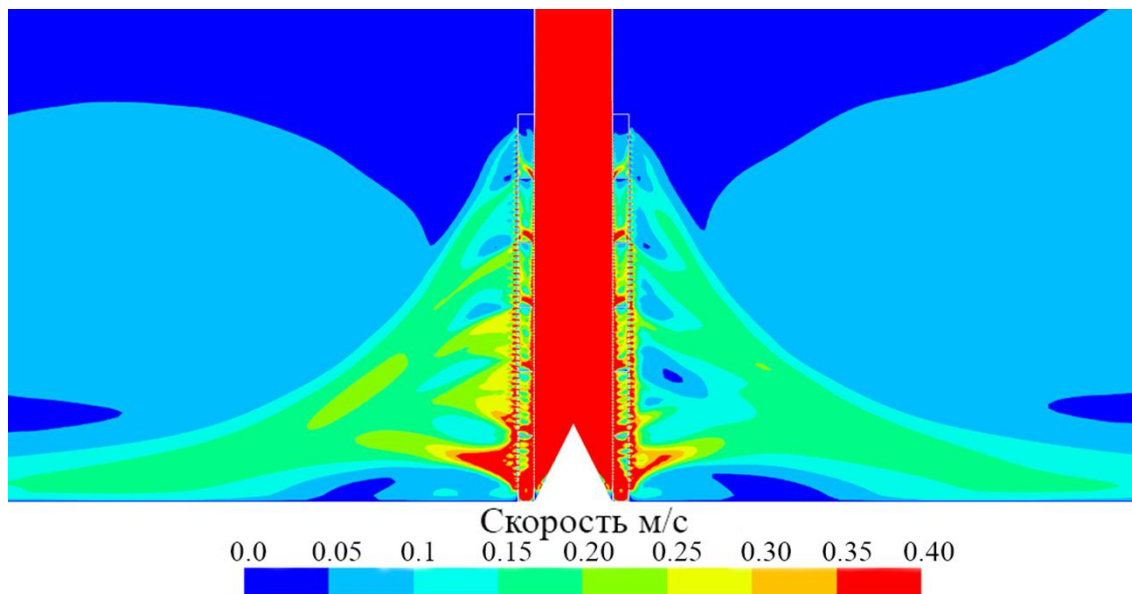


Рисунок 2.3 – Поле модуля скорости в плоскости XZ, расчетный комплекс *Star CCM+*

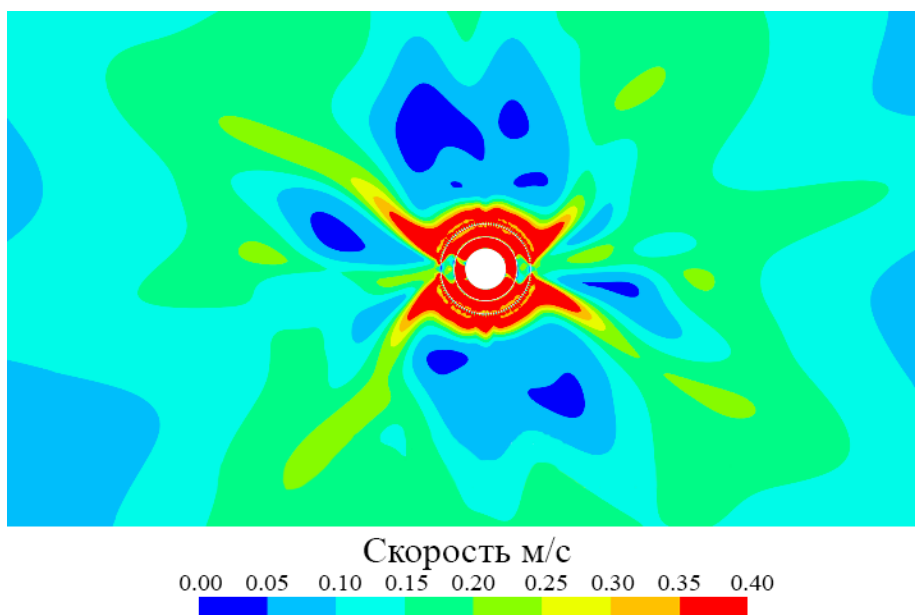


Рисунок 2.4 – Поле модуля скорости в горизонтальном сечении $Z=0,075$

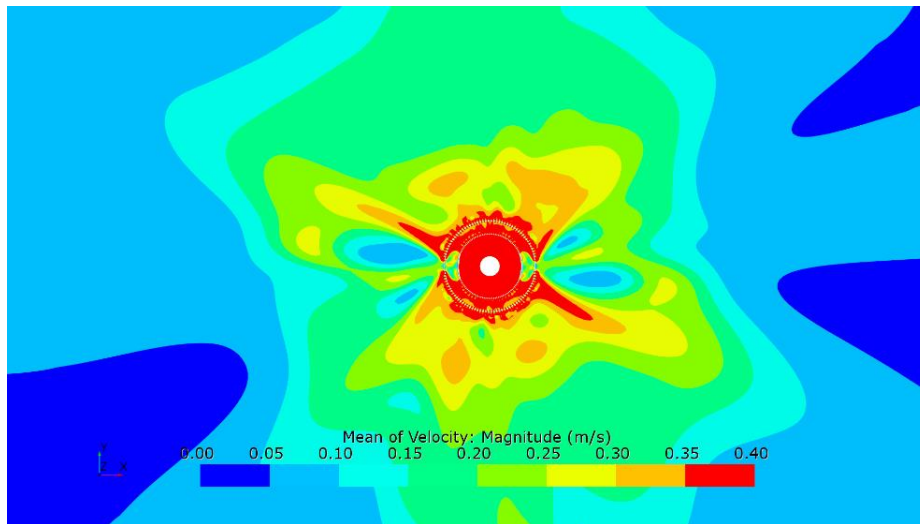


Рисунок 2.5 – Поле модуля скорости в горизонтальном сечении $Z=0,140$ м

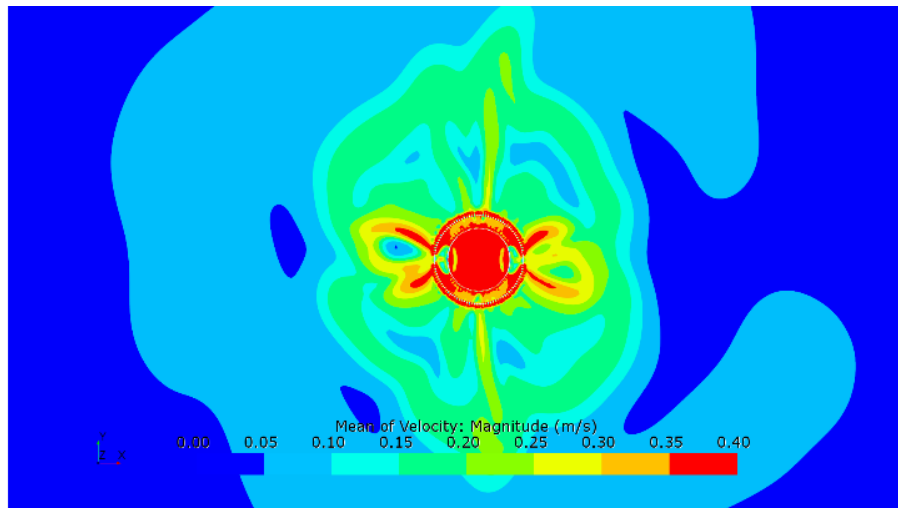


Рисунок 2.6 – Поле модуля скорости в горизонтальном сечении $Z=0,275$ м

2.4.3 Результаты двумерного моделирования в *ANSYS CFX*

Использовалась осесимметричная постановка: рассматривался сектор $7^{\circ}15'$, что при использовании условия симметрии соответствует полному углу 360° . Для замыкания уравнений Рейнольдса, как и при расчете 3D модели, применялась $k-\varepsilon$ модель турбулентности.

На рисунках 2.7 и 2.8 представлено поле модуля скорости, формирующееся в объёме воздухораспределителя и вблизи его истечения. Применение более мелкой расчётной сетки в 2D-постановке обеспечивает более детальное описание структуры течения в окрестности выходного сечения по сравнению с 3D-моделью, а именно:

разрешение отдельных струй, истекающих из перфорации, их взаимодействия и формирования единого потока. Однако осесимметричная постановка принципиально не способна воспроизвести трёхмерные эффекты: окружную неравномерность истечения при формировании отдельных струй и не осесимметричное распределение результирующего потока [23]. Допущение об осевой симметрии приводит к осреднению этих составляющих, вследствие чего картина течения искажается.

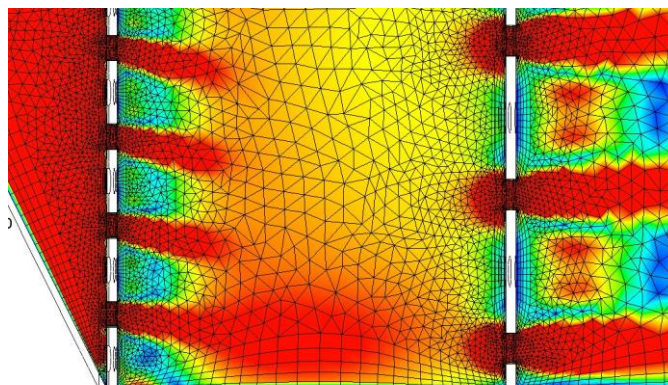


Рисунок 2.7 – Детализация расчетной сетки вблизи перфорации в *ANSYS CFX*

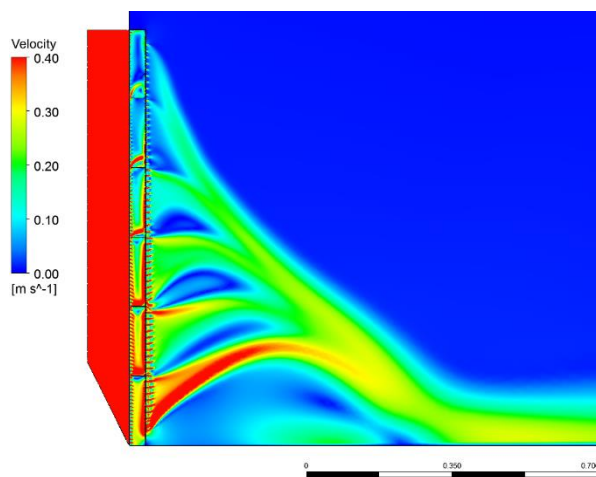


Рисунок 2.8 – Поле модуля скорости. Осесимметричная постановка

Сопоставление *2D*- и *3D*-моделей показывает, что двумерная постановка за счёт меньшего размера ячеек детальнее описывает локальную структуру течения вблизи перфорации, однако не воспроизводит трёхмерные эффекты; трёхмерная модель, напротив, корректно передаёт трёхмерность течения, но при 68 млн ячеек не обеспечивает той степени детализации формирования начального участка струи,

которая достигается в осесимметричной 2D-постановке при 25 млн ячеек. Иными словами, увеличение размерности задачи не компенсирует разрешающую способность сетки: трёхмерная модель проигрывает двумерной в описании локальной структуры течения.

Полученный результат позволяет сформулировать принципиальное ограничение, имеющее важное методическое значение для задач вытесняющей вентиляции: применение детализированных моделей низкоскоростных воздухораспределителей в трёхмерной постановке ограничено вычислительными ресурсами, а дальнейшее измельчение сетки приводит к лавинообразному росту вычислительных затрат и делает такой подход практически неприменимым для многовариантных расчётов воздухораспределения в помещении.

Таким образом, детализированное моделирование воздухораспределителя не может служить инструментом параметрических исследований вытесняющей вентиляции. Возникает необходимость в разработке упрощённой математической модели, которая, с одной стороны, воспроизводила бы результирующий поток с достаточной точностью, а с другой – не требовала бы недопустимых вычислительных ресурсов. Такая модель должна основываться на специальном задании граничных условий, отражающих интегральные характеристики истечения, а не его локальную структуру.

2.5 Выводы по второй главе

1. Разработаны подробные численные модели низкоскоростного воздухораспределителя 1ВНК200 в двух вариантах: 3D-постановка в программном комплексе *Simcenter STAR-CCM+* и 2D осесимметричная постановка в *ANSYS CFX*.

2. Установлено, что применение детализированных моделей низкоскоростных воздухораспределителей в задачах вытесняющей вентиляции ограничено вычислительными ресурсами. При 68 млн ячеек 3D-модель уступает 2D-постановке по детализации формирования начального участка струи; дальнейшее

измельчение сетки в $3D$ приводит к лавинообразному росту вычислительных затрат, что делает такой подход непригодным для многовариантных расчётов.

3. Обоснован вывод о необходимости разработки упрощённой модели воздухораспределителя со специальным заданием граничных условий, которая корректно описывала бы результирующий поток и могла использоваться при расчёте воздухораспределения в помещениях с вытесняющей вентиляцией.

3 Численное и лабораторное исследования низкоскоростного воздухораспределителя

3.1 Лабораторные испытания низкоскоростного воздухораспределителя

Лабораторные испытания приточного устройства 1ВНК200 [8] выполнялись с целью выявления характера формирования и развития приточной струи, а также определения ее кинематических параметров [13]. Испытания проводились на аэродинамическом стенде размерами $20 \times 12 \times 10$ м в научно-исследовательской лаборатории завода «Арктос». Воздух в систему вентиляции стенда подавался с приточной установки «Standart 100», расположенной в отдельном техническом помещении. После установки воздух подавался в камеру статического давления размерами $2 \times 1,5 \times 1,5$ м, в которой установлен выпрямитель потока - хонейкомб глубиной 100 мм. Для формирования равномерного профиля скорости воздуха на выходе из камеры статического давления установлено профилированное сопло диаметром $D=200$ мм. К соплу монтировался воздуховод такого же диаметра длиной 3 м, в котором производились измерения параметров приточного воздуха. Перед воздухораспределителем установлен дополнительный элемент (выпрямитель) для выравнивания потока. Удаление воздуха осуществлялось из верхней части помещения. На потолке стенда установлены инфракрасные нагреватели, которые осуществляли нагрев поверхности пола. Мощность нагрева подобрана таким образом, чтобы обеспечить необходимый тепловой режим в помещении. Элементы, входящие в состав аэродинамического стенда, представлены на рисунке 3.1.

Перед началом эксперимента определены точки измерений, в которых определялись параметры: динамическое P_d давления в характерном сечении воздуховода, температура окружающего воздуха, максимальные значения скоростей $V_{x/y}$ воздуха в струе на различных расстояниях x или y от воздухораспределителя.

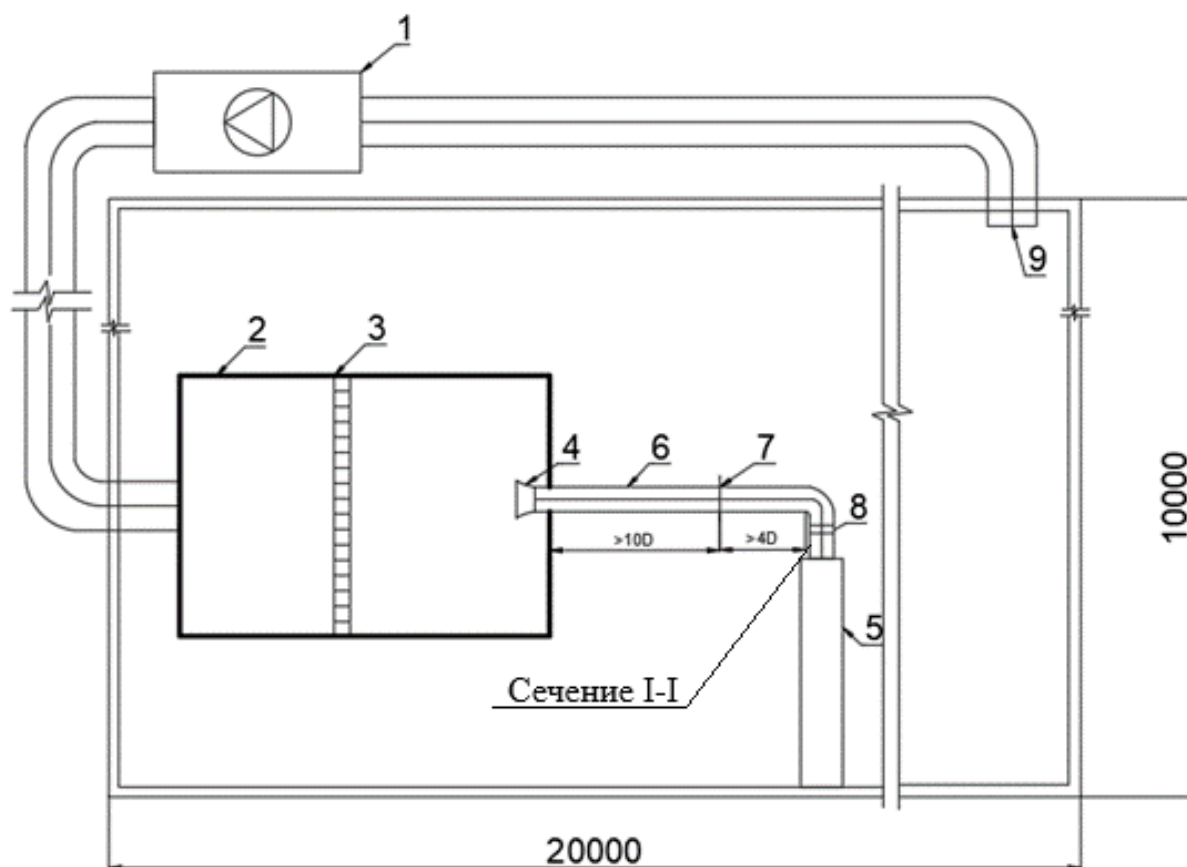


Рисунок 3.1 – Схема аэродинамического стенда

1 – вентиляционная установка; 2 – камера статического давления; 3 – выпрямитель; 4 – профилированное сопло (коллектор); 5 – воздухораспределитель; 6 – воздуховод; 7 – измерительное сечение; 8 – фильтр (выпрямитель); 9 – вытяжное отверстие

Во время испытаний фиксировалась температура и относительная влажность окружающего воздуха, а также и атмосферное давление. Измерения температуры окружающего воздуха и относительной влажности в помещении проводилось с помощью термогигрометра, расположенного в 2 метрах от воздухораспределителя на высоте 1,5 метра от уровня пола.

Температура воздуха в воздуховоде определялась на прямом участке на расстоянии 1 м от фасонных элементов непосредственно перед подключением к воздухораспределителю.

Объемный расход воздуха, подаваемый в воздухораспределитель, определялся путем измерения динамического давления P_d , Па, [11] Мерное сечение расположено на прямом участке воздуховода, для измерений использовались пневмометрическая трубка ПИТО и микроманометр.

Измерения параметров приточной струи, а именно скорости и температуры воздуха выполнялось с помощью термоанемометрической системы *AirDistSys 5000* (рисунок 3.2, рисунок 3.3). Система включает 7 сферических датчиков (измерение модуля скорости), которые располагались на стойке. Расстояние между датчиками 100 мм. Характеристики средств измерений, используемых во время проведения эксперимента, представлены в таблице 3.1

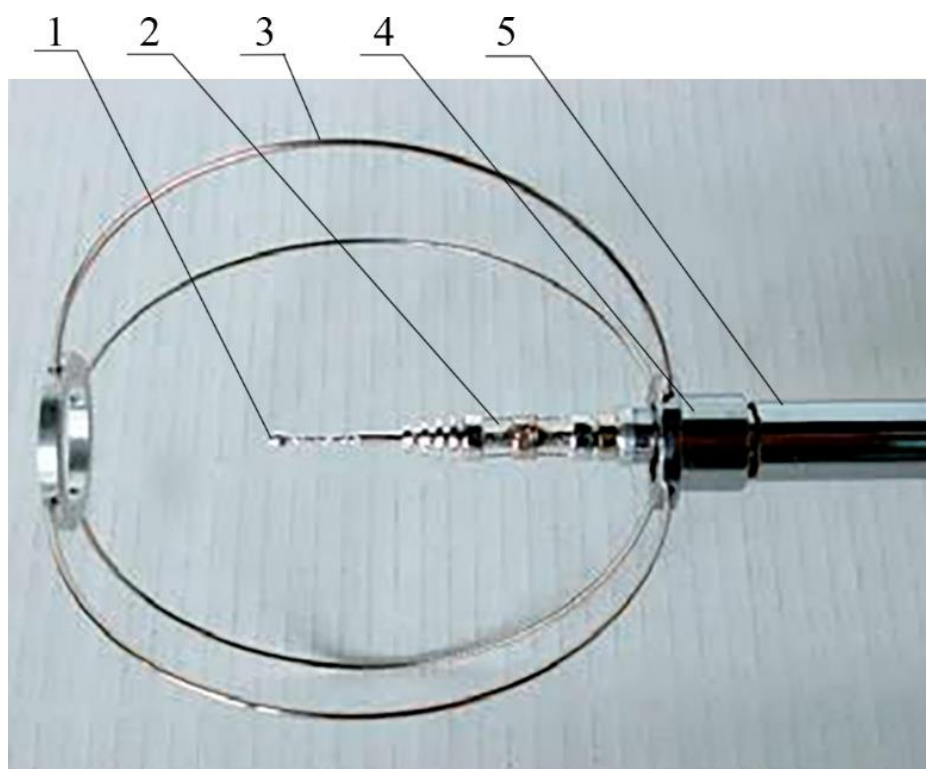


Рисунок 3.2 – Сферический датчики: 1 – датчик скорости; 2 – датчик температуры; 3 – ажурная корзина; 4 – экранирующая трубка; 5 – зажимной винт.

На рисунке 3.4 представлена фотография аэродинамического стенда. Для визуализации истечения приточного воздуха из низкоскоростного воздухораспределителя использовалось задымление (рисунок 3.5). Визуализация позволяет оценить форму приточной струи и зону действия приточного потока.

Для обработки полученных измерений и фиксации изменений параметров использовалось программное обеспечение «*AirDistSys 5000*».

Таблица 3.1 – Технические характеристики применяемого оборудования

Наименование СИ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность
Термоанемометрическая система с 7 сферическими датчиками	скорость воздуха	от 0,05 до 10 м/с	$0.05 \div 2 \text{ м/с: } 0,02 \text{ м/с} \pm 1,5\%;$ $< 2 \text{ м/с: } \pm 2,5\%$
	температура воздуха	-10 до 40 °С	$\pm 0,2 \text{ °С}$
Барометр БР-52	давление	96-104 кПа 720-780 мм.рт.ст	не более $\pm 0,8 \text{ мм.рт.ст}$
Многофункциональный микроманометр МР200Р (КИМО)	давление	от 0 до 500Па	$\pm 100\text{Па: } \pm 0,2\%$ от показаний $\pm 0,8\text{Па}$; за пределами указанного диапазона: $\pm 0,2\%$ от показаний $\pm 1,5\text{Па}$
Комбинированный приемник давления (трубка Пито)	давление	от 2 до 30 м/с	$\pm 3\%$ от показаний; КПито=1,007
Термогигрометр 610 (Testo)	температура	-10 +50 С°	$\pm 0,5 \text{ °С}$ от показаний
	относительная влажность	0 -100%	$\pm 2,5\%$ от показаний в диапазоне 5-95%



Рисунок 3.3 – Стойка с закрепленными сферическими датчиками



Рисунок 3.4 – Аэродинамический стенд для испытания диффузора 1ВНК

3.1.2 Постановка лабораторного эксперимента

Измерения проводились в неизотермическом режиме в соответствии с методиками [7,11, 14, 48,]. Расход воздуха задавался в объеме 434 м³/ч, температура приточного воздуха составляла $t=17,0 \pm 0,2$ °С, температура окружающего воздуха представлена в таблице 3.2

В период проведения испытаний производилось 3 параллельных опыта с интервалом по времени 3 часа.

Расчет скорости воздуха в измерительном воздуховоде V_0 , м/с, производился по формуле:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2(P_d \cdot K_{\text{Пито}})}{\rho}} \quad (3.1)$$

где $K_{\text{Пито}}$ – поверочный коэффициент трубки Пито, безразмерный;

ρ – плотность воздуха, кг/м³.



Рисунок 3.5 – Визуализация истечения из воздухораспределителя с помощью задымления

Таблица 3.2 – Исходные данные и результаты лабораторных исследований

№ опыта	Параметры окружающего воздуха				Установка		Сечение I-I ($d=200$ мм)				Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$
	$t, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$	$P_{\text{атм.}}, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	Схема	Режим	$P_{\text{д1.}}, \text{Па}$	$K_{\text{пито}}$	$F_1, \text{м}^2$	$v, \text{м/с}$	L
1	19,6	29	102015	1,210	Приток	42 Гц	7,8	1,005	0,031	3,6	434
2	19,7	29	102015	1,210	Приток	41 Гц	7,8	1,005	0,031	3,6	434
3	19,6	29	102015	1,210	Приток	42 Гц	7,8	1,005	0,031	3,6	434

Полученные в измерительном сечении воздуховода значения динамического давления усреднялись, и для расчета скорости использовалось усредненное значение.

Плотность перемещаемого воздуха определялась по формуле

$$\rho = \frac{B_a + P_{\Pi}}{RK_{\phi}(t + 273)} \quad (3.2)$$

где B_a – барометрическое давление окружающей среды, кПа;

P_{Π} — полное давление потока, Па;

K_{φ} — коэффициент, зависящий от температуры и относительной влажности перемещаемого воздуха. Значение K_{φ} определяется по таблице 3.2;

t — температура окружающего воздуха, °С.

По полученному значению скорости определялся расход воздуха, м³/ч, по формуле:

$$L = 3600 \cdot V_0 \cdot S \quad (3.3)$$

где S — площадь поперечного сечения воздуховода, м².

Измерения параметров приточной струи производилось в 294 точках, расположенных по горизонтали и вертикали относительно центра воздухораспределителя. Первая точка расположена непосредственно вблизи внешней перфорации воздухораспределителя, последующие измерения проводились с шагом 0,2 м по горизонтали до значения 1 м, смещение по вертикали от значения 0,015 м с последующими замерах на высоте 0,030; 0,045; 0,065; 0,095; 0,125; 0,155 м, точки замеров представлены на рисунке 3.6.

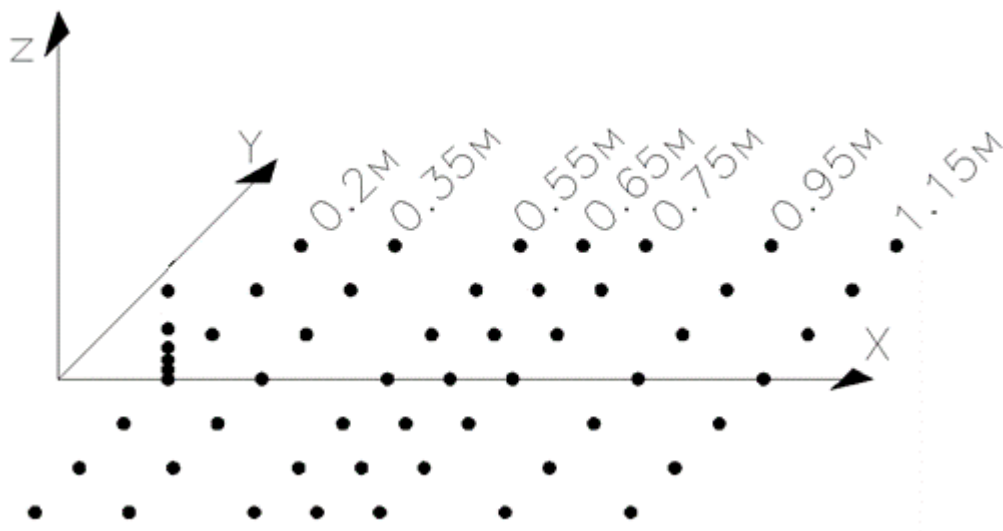


Рисунок 3.6 – Схема точек замеров параметров воздуха

Для каждой замеряемой точки (i, j) ($i = \overline{1,8}$; $j = \overline{1,7}$) определено среднее арифметическое модуля скорости:

$$\overline{V_{ij\text{ ср}}} = \frac{\sum_{k=1}^m V_{ijk}}{m} \quad (3.4)$$

где m – количество параллельных измерений, $m=3$.

Для воспроизводимости измерений для каждой замеряемой точки с координатами (i, j) вычисляются квадраты разностей между найденным средним значением и результатами параллельных измерений $\overline{V_{ij\text{ ср}}}$, а также сумма квадратов $\sum_{k=1}^m (V_{ijk} - \overline{V_{ij\text{ ср}}})^2$ указанных разностей по всем параллельным измерениям: при числе степеней свободы $f=m-1=31$.

$$S_{ij}^2 = \frac{(\overline{V_y} - \overline{V_{\text{ср}}})^2}{f} \quad (3.5)$$

Результаты осреднений значений скорости в точках представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Результаты измерений скорости в точках

Z/X, м	0,2, м	0,35, м	0,55, м	0,65, м	0,75, м	0,95, м	1,15, м
	Осредненные значения скорости в точке, v, м/с						
0,125	0,42	0,19	0,26	0,23	0,19	-	-
0,095	0,56	0,12	0,23	0,22	0,22	0,16	0,15
0,065	0,12	0,13	0,18	0,21	0,24	0,23	0,21
0,045	0,11	0,15	0,16	0,20	0,23	0,25	0,23
0,030	0,12	0,16	0,13	0,19	0,23	0,25	0,24
0,015	0,15	0,15	0,13	0,18	0,23	0,27	0,26

Результаты лабораторных испытаний и численного моделирования, выполненного в 2.4, а именно значения скорости воздуха на различных расстояниях от воздухораспределителя, представлены в где Э – результаты лабораторного эксперимента; *CFX* – результаты, полученные в расчетном комплексе *Ansys CFX*; *CCM* – результаты, полученные в расчетном комплексе *STAR CCM+*.

Таблица 3.4 – Скорость воздуха в приточной струе на различных расстояниях от воздухораспределителя

Z, м	0,2			0,35			0,55			0,65		
	X, м											
	Э	CFX	CCM	Э	CFX	CCM	Э	CFX	CCM	Э	CFX	CCM
0,125	0,42	0,35	0,27	0,19	0,05	0,28	0,26	0,11	0,17	0,23	0,28	0,18
0,095	0,56	0,49	0,34	0,12	0,06	0,19	0,23	0,03	0,18	0,22	0,23	0,17
0,065	0,12	0,05	0,21	0,13	0,07	0,09	0,18	0,06	0,16	0,21	0,14	0,17
0,045	0,11	0,06	0,06	0,15	0,08	0,13	0,16	0,11	0,14	0,20	0,08	0,16
0,03	0,12	0,07	0,07	0,16	0,09	0,16	0,13	0,15	0,12	0,19	0,07	0,15
0,015	0,15	0,06	0,07	0,15	0,08	0,19	0,13	0,18	0,10	0,18	0,09	0,13

Продолжение таблицы 3.4

Z, м	0,75			0,95			1,15		
	X, м								
	Э	CFX	CCM	Э	CFX	CCM	Э	CFX	CCM
0,125	0,19	0,22	0,19						
0,095	0,22	0,25	0,19	0,16	0,14	0,18	0,15	0,12	0,13
0,065	0,24	0,23	0,18	0,23	0,22	0,20	0,21	0,19	0,18
0,045	0,23	0,19	0,18	0,25	0,27	0,20	0,23	0,23	0,20
0,03	0,23	0,16	0,18	0,25	0,28	0,20	0,24	0,26	0,20
0,015	0,23	0,12	0,15	0,27	0,28	0,17	0,26	0,26	0,16

На основе полученных данных построены профили скорости в приточной струе в каждой точке замеров, результаты представлены на рисунке 3.7.

Результаты вычислительного эксперимента свидетельствуют, что на выходе из воздухораспределительного устройства формируется течение с выраженной неравномерностью профиля скорости. В непосредственной близости от выходного сечения воздухораспределителя эпюры скоростей во взаимно перпендикулярных плоскостях демонстрируют существенные различия, что указывает на трёхмерный характер течения и значительное влияние внутренней геометрии диффузора на начальный участок формируемой струи.

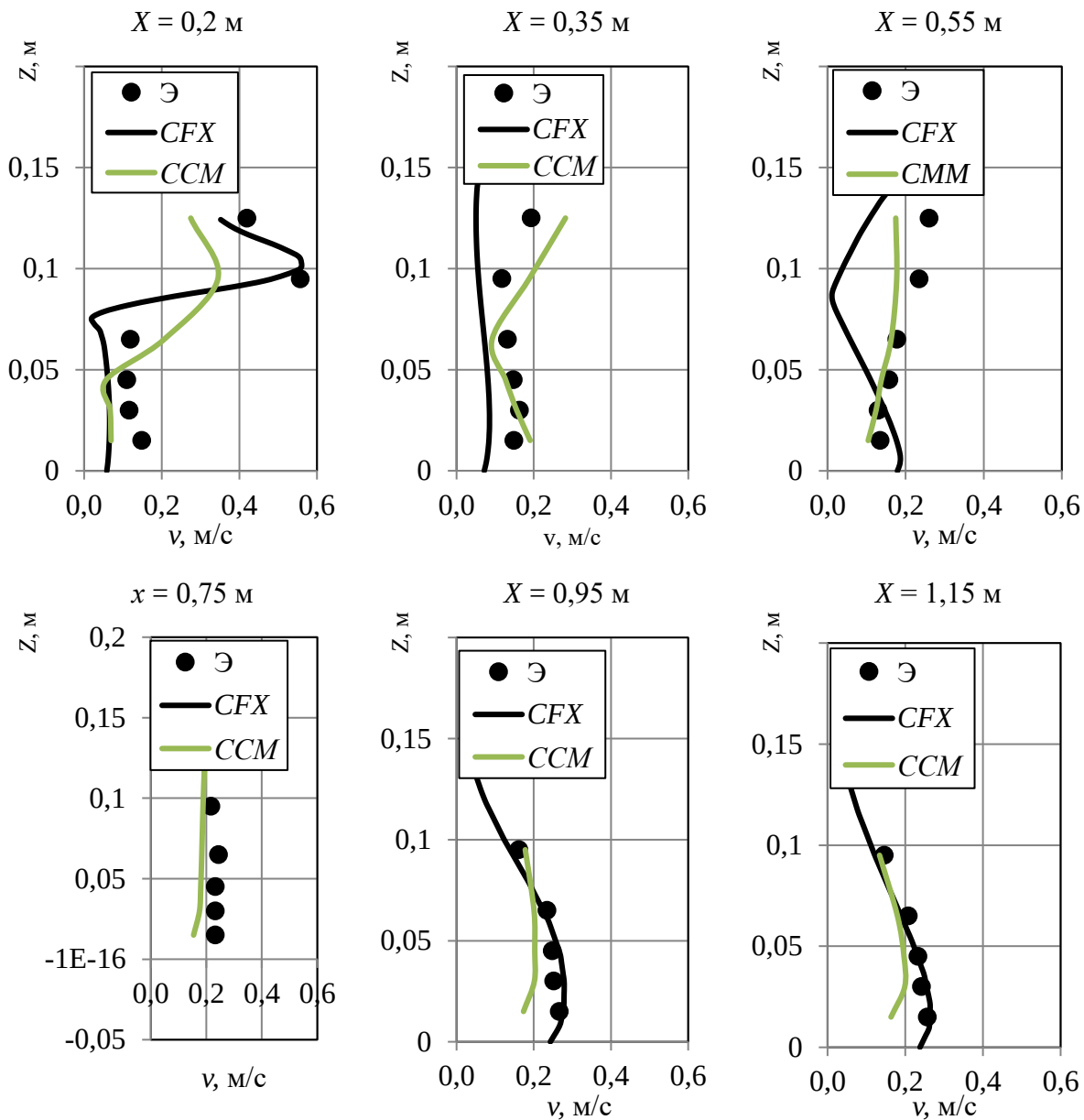


Рисунок 3.7 – Графики сравнения распределения скоростей по вертикали

Получено, что к наименьшему расхождению результатов численного и лабораторного исследований приводит подробная детализация геометрии воздухораспределителя и сгущение сетки в зонах наибольших градиентов скорости, наблюдаемых в непосредственной близости к плоскости истечения ($x=0,15 \text{ м}$, рисунок 3.7). При этом, по мере развития струи происходит уменьшение градиентов скорости, и влияние количества элементов нивелируется, что показано на построенных профилях скорости, начиная с расстояния $x = 0,75 \text{ м}$.

3.2 Разработка упрощенной численной модели низкоскоростного воздухораспределителя

Для поиска оптимальных параметров создания упрощенной модели низкоскоростного воздухораспределителя рассматривались следующие варианты (рисунок 3.8):

- равномерный профиль скорости на плоскости истечения (РП);
- задание неравномерного профиля скорости на истечении, путем деления плоскости истечения на сектора с различными углами подачи воздуха (ПС).

При разработке упрощенных моделей использовались такие же граничные условия, как и для подробной модели воздухораспределителя.

Поверхность истечения упрощенной модели с неравномерным профилем для достижения характера течения струи, идентичного подробной геометрии, делилась на три сектора со следующими начальными условиями:

- верхний сектор: высота цилиндра 70 мм, $L1 = 130 \text{ м}^3/\text{ч}$, угол наклона приточного потока 30° вверх относительно горизонтальной плоскости;
- центральный сектор: высота цилиндра 800 мм, $L2 = 174 \text{ м}^3/\text{ч}$, угол наклона – 90° относительно плоскости истечения;
- нижний сектор: высота цилиндра 70 мм, $L3 = 130 \text{ м}^3/\text{ч}$, угол наклона – 30° вниз относительно горизонтальной плоскости.

Результаты расчета и сравнения разработанных вариантов упрощенных моделей с лабораторным экспериментом и подробной геометрией воздухораспределителя представлены в виде эпюр скоростей на различных расстояниях от истечения (рисунок 3.9).

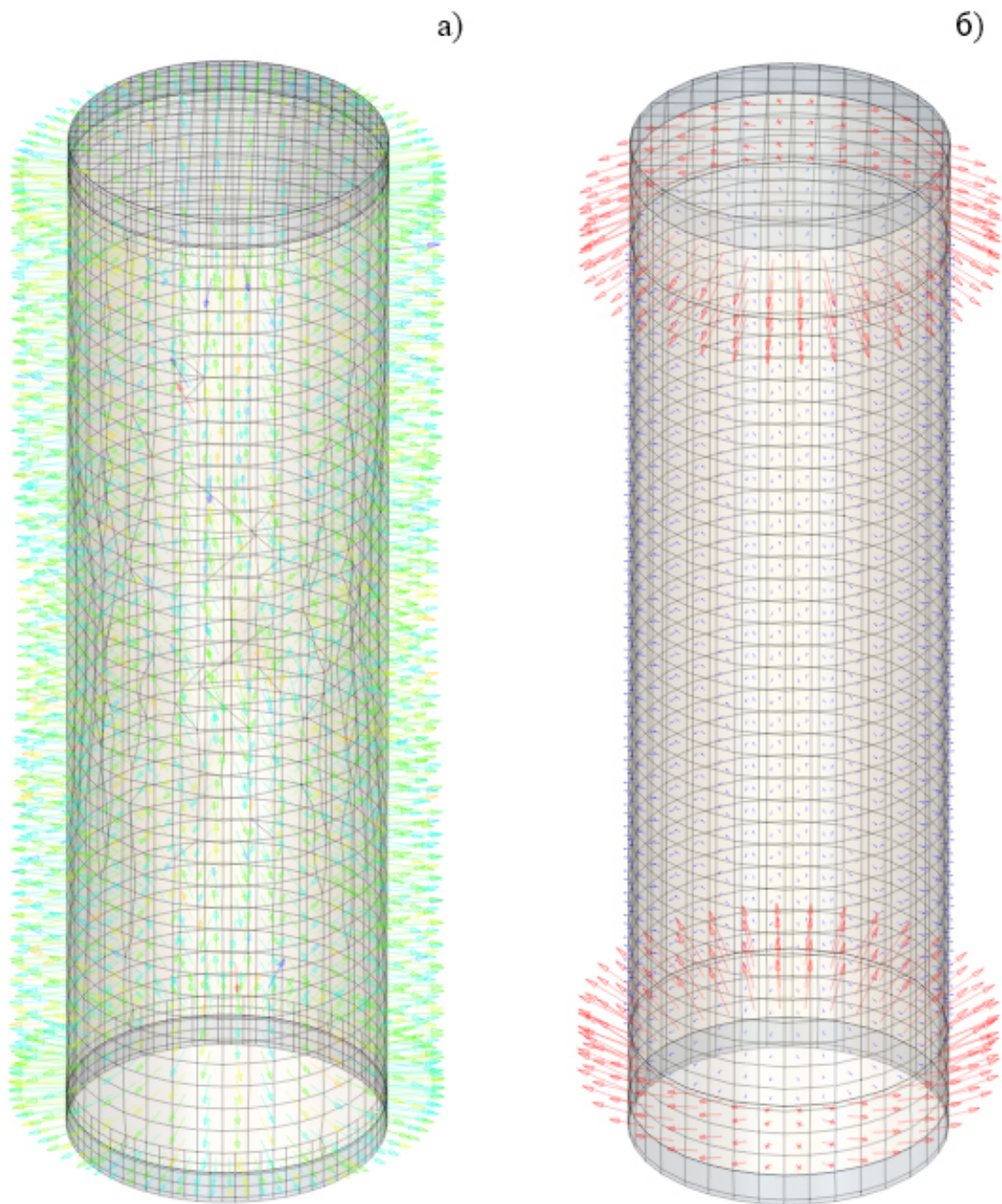


Рисунок 3.8 – Варианты упрощенных моделей. а) равномерный профиль (РП); б) цилиндрический профиль с сектором (ПС)

Анализ полученных результатов, представленных на рисунках 3.9 – 3.11, позволяет сделать следующий вывод: характер течения струи на выходе из упрощенной модели с равномерным профилем скорости существенно отличается от струи, формируемой ВР 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 развитии приточной струи Средние расхождение в значениях скорости составляют не более 8%.

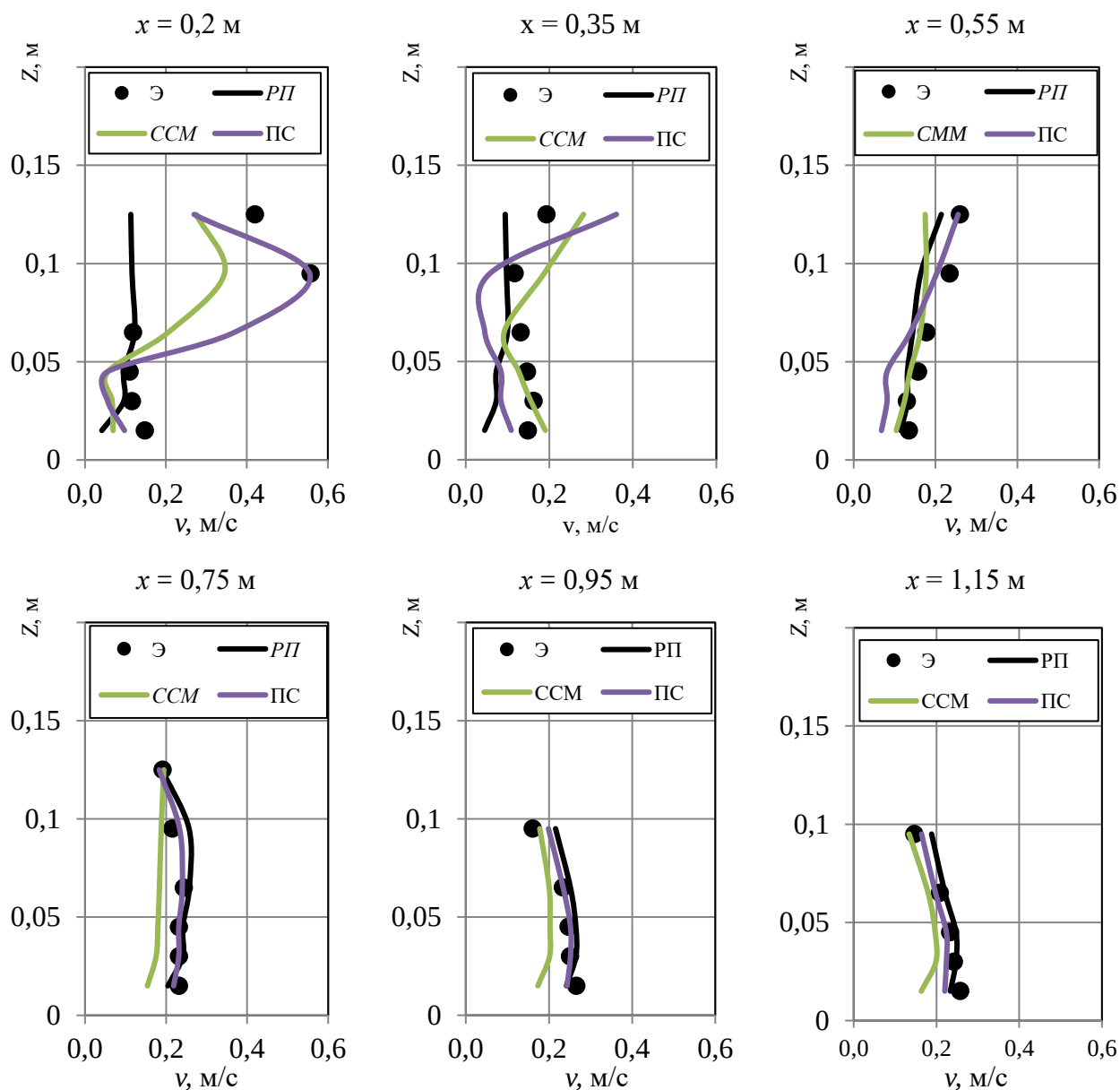


Рисунок 3.9 – Графики сравнения распределения скоростей по вертикале

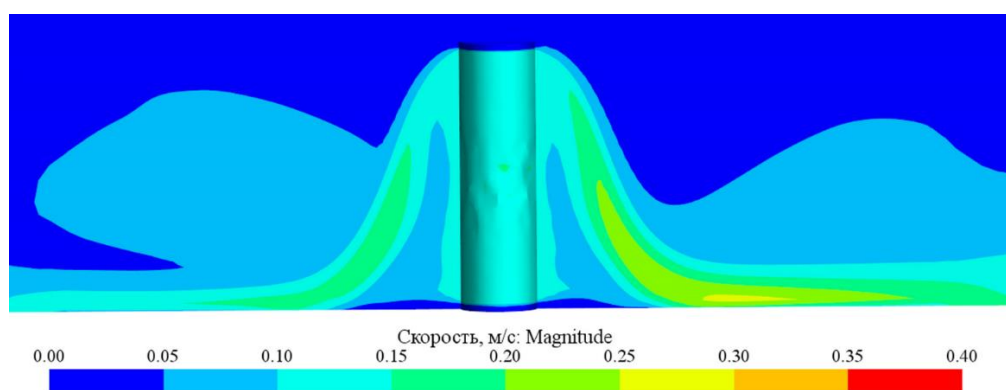


Рисунок 3.10 – Поле модуля скорости упрощенной модели (РП)

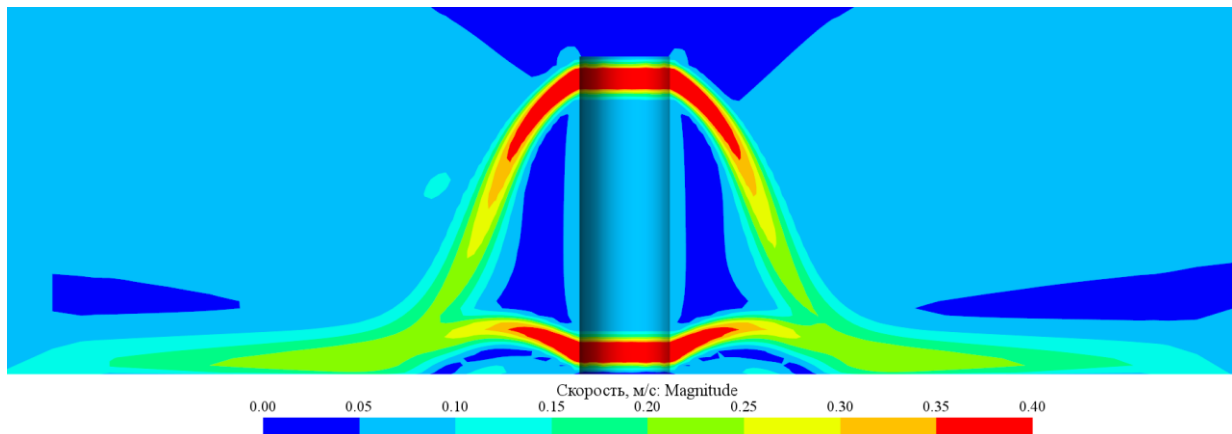


Рисунок 3.11 – Поле модуля скорости упрощенной модели (ПС)

Следовательно, для дальнейших исследований целесообразно использовать упрощенную модель с неравномерным профилем скорости на истечении.

3.3 Обоснование достоверности модели воздушораспределения в аудитории

3.3.1 Проведение натурального эксперимента

Проведение эксперимента в реальных условиях выполнено в общественном помещении – учебной аудитории компании «Арктика». Для построения математической модели приняты фактические геометрические значения, соответствующие помещению учебной аудитории, 9х5,5х3 м. Помещение имеет правильную прямоугольную форму, на двух смежных стенах помещения размещены окна. На период проведения эксперимента окна были закрыты жалюзиными шторами.

Эксперимент проводился в холодный период года, при пасмурной погоде, температура наружного воздуха минус 4 °С.

Помещение оснащено учебными партами, стульями, стеллажами и другой офисной мебелью, полное количество посадочных мест в аудитории – 30 человек.

Для нагнетания и удаления воздуха из помещения использовалась существующая приточно-вытяжная система вентиляции, схема которой приведена на

рисунке 3.14. Приточные устройства – полуцилиндрические низкоскоростные воздухораспределители 1ВНП250 компании «Арктос» в количестве 2 шт. расположенных непосредственно у одной из продольных стен аудитории (рисунок 3.12 – 3.13). Удаление воздуха из помещения осуществлялась через решетки с поворотными жалюзи АМК 400х150 в количестве 5 шт., установленных на воздуховоде. Воздуховод расположен на противоположной стене от приточных устройств, в верхней части помещения в двухгранном углу. Схема вентиляционной системы представлена на рисунке 3.14.

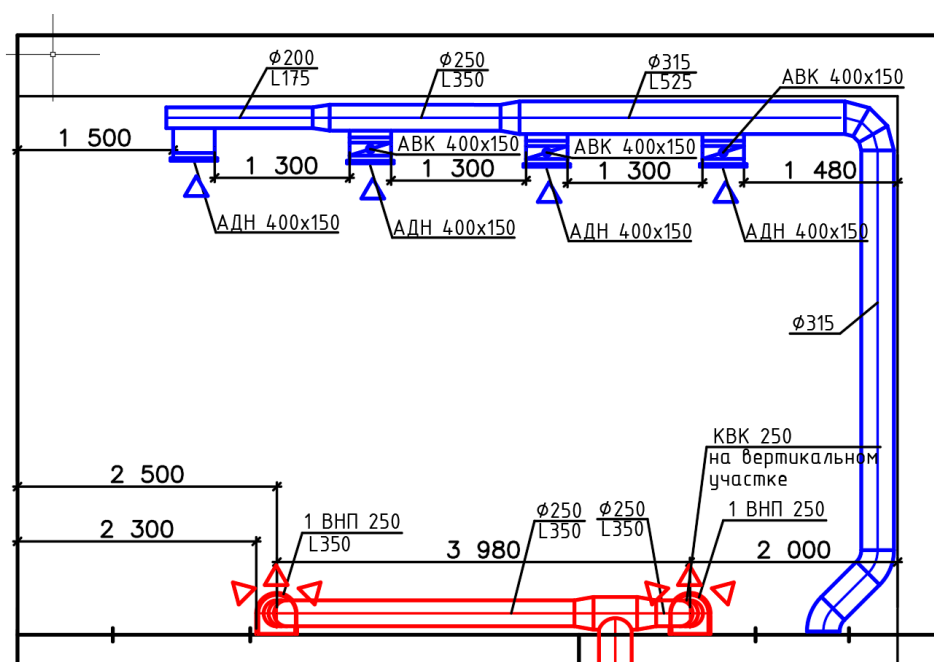


Рисунок 3.12 – План-схема расположения воздухораспределителей

В помещении перед началом эксперимента с помощью элементов автоматического управления вентиляционной установкой выставлен расход приточного воздуха равным $630 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствует удельному воздухообмену $\approx 53 \text{ м}^3/\text{ч}$ на одного человека. Данная величина существенно превышает нормативное значение минимального расхода наружного воздуха для помещений с временным пребыванием людей, согласно действующим нормативным документам, составляет $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ на человека. При вытесняющей вентиляции рекомендуется подача не менее 20 л/с расхода приточного воздуха на 1 человека [84]. Расход воздуха определялся по

данным измерения динамического давления с помощью пневмометрической трубки ПИТО и микроманометра *KIMO MP-200* в подводящих воздуховодах.

При заданном расходе и температуре приточного воздуха, равной 19 С, в помещении поддерживалась температура в диапазоне 20-22 °С.

После выставления указанных параметров выход на режим для стабилизации параметров микроклимата и CO_2 по объему помещения осуществлялся в течение 1,5 часов.

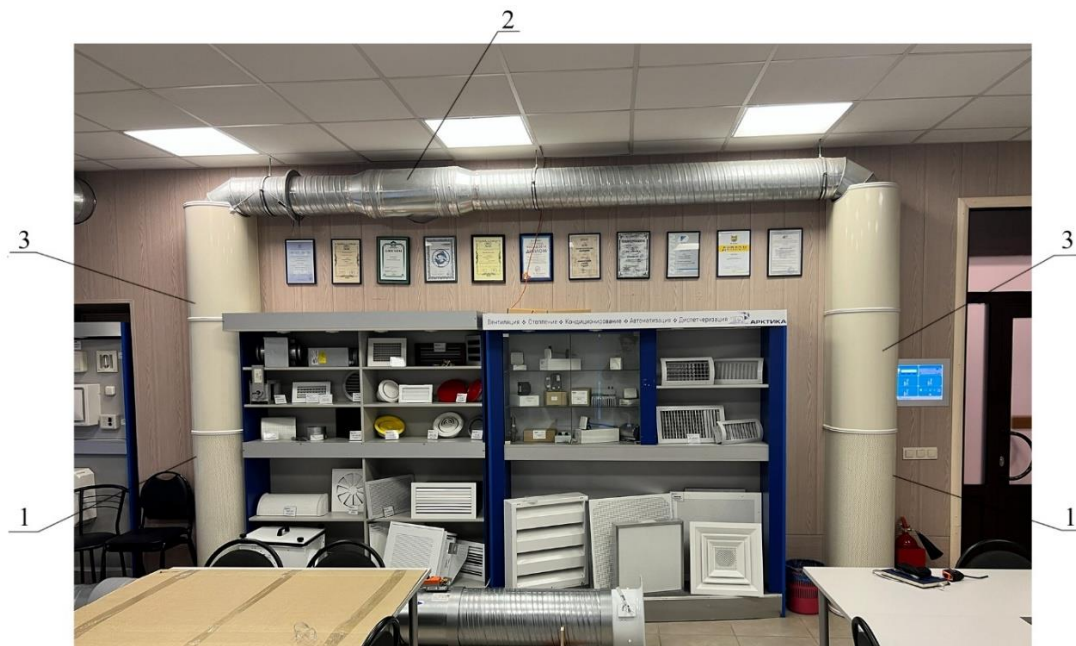


Рисунок 3.13 – Расположения воздухораспределителей: 1- низкоскоростной воздухораспределитель; 2- приточный воздуховод; 3- декоративный кожух воздухораспределителя

Изменения показателей скорости, температуры в помещении выполнялись по методике в соответствии с нормативными требованиями [11]. Все измерения производились с использованием поверенных в установленном порядке приборов, технические характеристики приборов описываются далее. В ходе проведения эксперимента производились измерения скорости и температуры воздуха, а также концентрации углекислого газа в помещении. Для определения данных параметров использовался комплекс термоанемометрической системы *Sensor AirDistSys 5000*, включающий в себя 7 сферических датчиков.

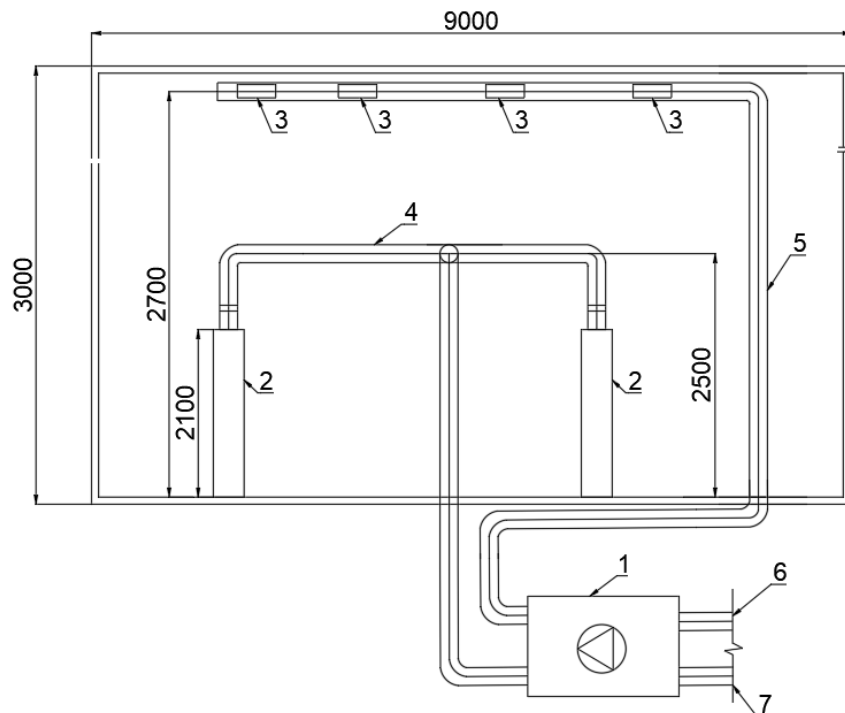


Рисунок 3.14 – Принципиальная схема аэродинамической системы; 1- вентиляционная установка; 2- низкоскоростной воздухоораспределитель; 3- вытяжная решетка; 4- приточный воздуховод; 5- вытяжной воздуховод; 6- забор воздуха; 7- выброс воздуха

Датчики термоанемометрической 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., комплекс и процесс замеров представлен на рисунке 3.16.

Вертикальная стойка с приборами перемещалась по помещению и устанавливалась в точки измерений, согласно схеме, приведенной на рисунке 3.15. Первоначальное место размещение датчика выбрано - в проходе между расположением парт и на расстоянии 1 м от воздухоораспределителя, расстояние до ближайшего источника теплоты (человека) – 60 мм. Данное расположение определено на основании лабораторных исследований воздушной струи от низкоскоростного воздухоораспределителя, проводимых ранее. При таком расположении на полученные значения не влияет зона, с повышенными скоростями образующаяся при формировании воздушной струи на выходе.

После перемещения стойки, выдерживалась пауза в течение 10 мин. для стабилизации параметров микроклимата после возмущения. Измерения в каждой

точке производились 3 раза в течение 5 мин. Для анализа использовались усредненные данные.

На протяжении всего эксперимента проводился мониторинг параметров воздуха на приточных и вытяжных устройствах.

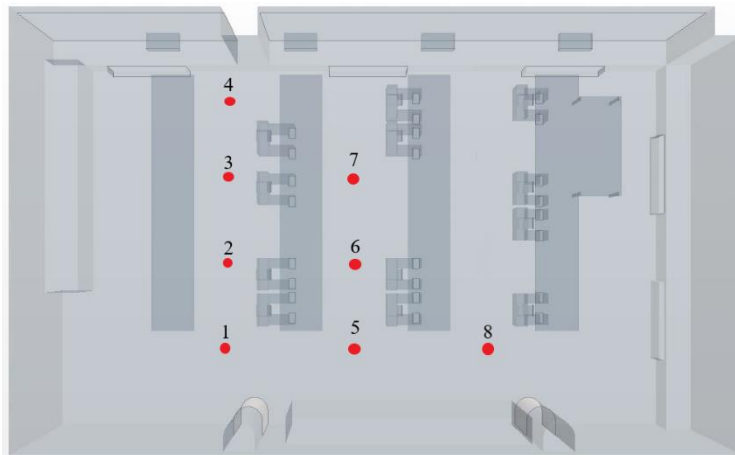


Рисунок 3.15 – Схема расположения комплекса с датчиками в помещении

Одним из измеряемых параметров является концентрация углекислого газа в помещении [25]. Проведено несколько исследований [118,121], описывающих негативное влияние повышенной концентрации углекислого газа на умственную и физическую активность людей, приводящей к увеличению риска распространения вирусов и бактерий в помещении [111,112]. В Германии и большинстве Европейских стран норма содержания углекислого газа ниже 1000 *ppm* классифицируется как безвредная; от 1000-2000 *ppm* – как заметная; выше 2000 *ppm* – как неприемлемая [103]. Для определения концентрации углекислого газа (CO_2) применяется методика определения объемной доли углекислого газа в общем объеме воздушной смеси, количество частиц газа в кубических сантиметрах CO_2 к кубическому метру воздуха – *ppm* (*parts per million*; cm^3/m^3). В нормативной документации Российской Федерации [12,55] определены оптимальные и допустимые нормы концентраций: высокое качество воздуха – 400 *ppm* и менее; среднее – 400-600 *ppm*, допустимое – 600-1000 *ppm*, низкое – 1000 и более *ppm*, допустимое содержание углекислого газа в помещениях принимают сверх содержания в наружном воздухе.



Рисунок 3.16 – Измерение параметров в учебной аудитории

В ходе проведения натурного эксперимента для определения концентраций в учебной аудитории углекислого газа применялся прибор - *SM-2100-IAQ* (рисунке 3.17.). Технические характеристики прибора представлены в таблице 3.5.

В период проведения эксперимента в учебной аудитории за партами постоянно находилось 12 человек, возраст, пол и вес которых представлены в таблице 3.6. Рассадка людей осуществлялась равномерно в пространстве помещения. На протяжении всего исследования люди занимались умственным трудом, читали или разговаривали между собой.

Таблица 3.5 – Технические характеристики прибор *SM-2100-IAQ*

Наименование измерений	Наименование характеристик	Значения
Анализатор содержания углекислого газа « <i>SM-2100-IAQ</i> »	Диапазон измерения частиц и отклонения, ppm	0-2000 ppm, ± 50 ppm + 3% от изм.знач.; 0-5000 ppm, ± 100 ppm + 3% от изм.знач.;
	Время установления показаний, сек.	30 секунд
	Интервал измерений, сек.	1,5 секунды



Рисунок 3.17 – Анализатор содержания углекислого газа «SM-2100-IAQ»

Таблица 3.6 – Параметры людей

№	Пол	Вес, кг	Рост, см	Возраст, лет	Выдел. CO_2 , кг/с	№	Пол	Вес, кг	Рост, см	Возраст, лет	Выдел. CO_2 , кг/с
1	М	90	185	29	$1,081 \cdot 10^{-5}$	7	М	90	176	62	$0,867 \cdot 10^{-5}$
2	Ж	62	162	42	$0,730 \cdot 10^{-5}$	8	М	65	182	34	$0,855 \cdot 10^{-5}$
3	М	82	180	82	$0,817 \cdot 10^{-5}$	9	М	90	184	21	$1,081 \cdot 10^{-5}$
4	М	55	172	17	$0,861 \cdot 10^{-5}$	10	Ж	72	179	22	$0,938 \cdot 10^{-5}$
5	М	100	174	25	$1,161 \cdot 10^{-5}$	11	М	62	165	26	$0,760 \cdot 10^{-5}$
6	М	90	176	62	$0,867 \cdot 10^{-5}$	12	Ж	95	176	62	$0,898 \cdot 10^{-5}$

3.3.2 Разработка модели учебной аудитории

На основе действительных геометрических параметров учебной аудитории была построена идентичная 3D модель, отражающая все значимые особенности помещения. Моделирование выполнено в программном комплексе *Solid Works*. В модель были внесены все элементы помещения (рисунок 3.19), влияющих на формирование воздушного распределения:

- оконные проемы;
- отопительные приборы, создающие конвективные потоки, и излучение на поверхности;

- оконные жалюзи, влияющие на воздухообмен в помещении за счет ниспадающего потока вдоль поверхности окон и его распространение вглубь помещения;

- мебель, как естественные препятствия распространения воздушного потока.

На основе полученной модели в расчетном комплексе *Star CMM* была поставлена математическая задача, для расчета физических значений среды бала построена конечно-объемная сетка, общее количество ячеек составило – 4 миллиона ячеек.

Для корректного определения течений воздуха и описания турбулентного течения около источников теплоты или элементов с маленькими физическими габаритами влияющие на течение воздуха, было выполнено измельчение сетки, для более точного разрешения параметров вблизи пола и оконных проемов построен призматический слой расчетный сетки, на рисунке 3.18 представлены фрагменты построенной сетки для задачи.

Заданные граничные условия для численной модели учебной аудитории:

- теплопоступления от 1 человека – 80 Вт;

- выделение углекислого газа с поверхности лица каждого человека определены согласно метаболизму и физиологии человека, физической нагрузки. Расчеты выделений CO_2 для каждого из присутствующих с учетом их пола, возраста и массы были выполнены согласно [175], результаты приведены в таблице 3.6;

- поверхности стен непроницаемая стенка (*Wall*), на внутренней поверхности стен, окон, перекрытий задавалось граничное условие 3-ого рода. Для окон и наружных стен температура наружного воздуха задана минус 4 °С, для перекрытий и внутренних стен температура в соседних помещениях задана 20 °С. При этом значение сопротивление теплопередаче для ограждающих конструкций составляло:

- окна – 0,46 м² °С/Вт;

- наружные стены – 0,89 м² °С/Вт;

- перекрытия – 0,33 м² °С/Вт;

- общий тепловой поток отопительных приборов – 1935 Вт.

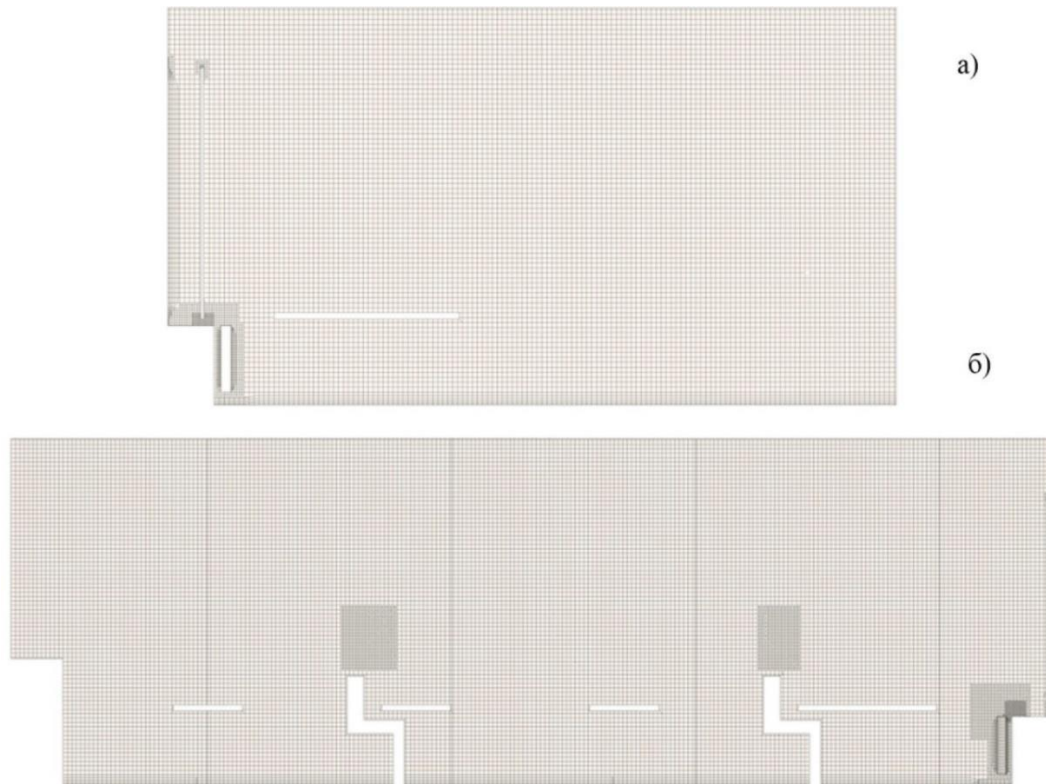


Рисунок 3.18 – Расчетная сетка учебной аудитории. Расчетная сетка. а) поперечный разрез; б) продольный разрез

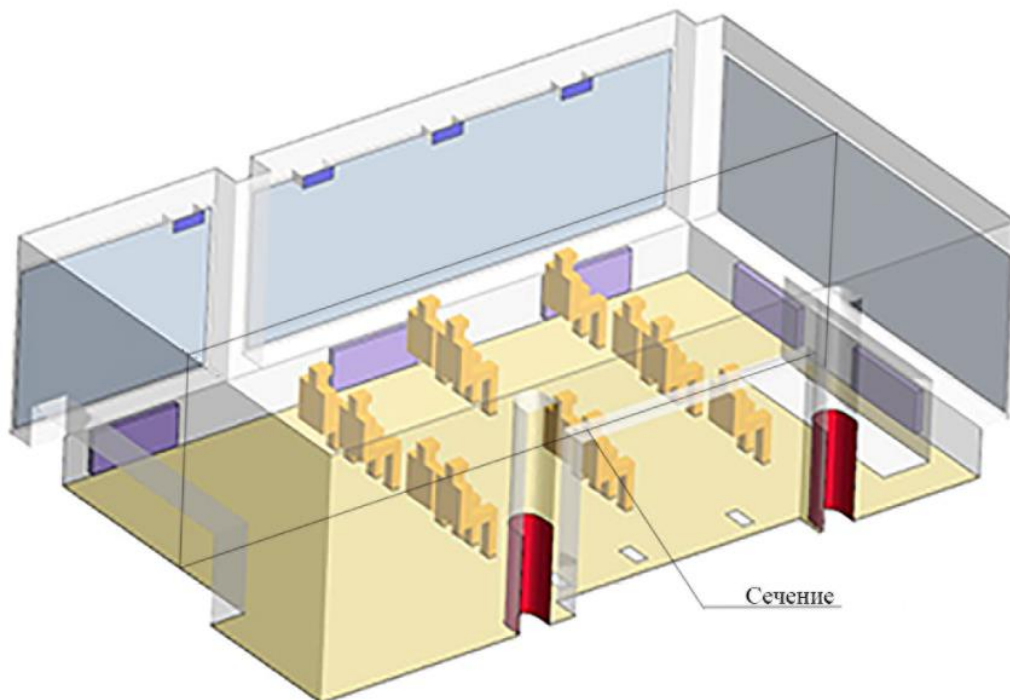


Рисунок 3.19 – 3D модель учебной аудитории

На вертикальных поверхностях отопительных приборов задана температура, измеренная тепловизором в ходе натурного эксперимента (46 °С). Дополнительный источниковый член в объеме расчетной области, занимаемой радиаторами, был задан 800 Вт и обеспечивал суммарный тепловой поток от радиаторов.

Для задания инфильтрации наружного воздуха в модели по контуру окон была сделана граница типа «вход»: суммарный расход задан 80 м³/ч. Расход инфильтрующегося в помещение наружного воздуха определялся исходя из баланса по углекислому газу с учетом фактического расхода приточного воздуха и газовыделений от людей, заданных в модели согласно таблице 3.6:

- температура наружного воздуха – минус 4°С;
- концентрация углекислого газа в наружном воздухе – 530 ppm;
- расход, температура, концентрация CO₂ приточного воздуха задавались согласно данным натурного эксперимента.

3.3.3 Результаты исследования

Результаты измерений температуры и концентраций углекислого газа, полученные в ходе проведения натурного эксперимента, а также аналогичные данные численного моделирования. приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты измерений математической модели и эксперимента

Высота датчика <i>h</i> , м	Температура, °С							
	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	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 3.7

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	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

На основе полученных значений построены графики распределения температуры и концентраций углекислого газа по высоте в каждой точке рисунках 3.20 – 3.23)

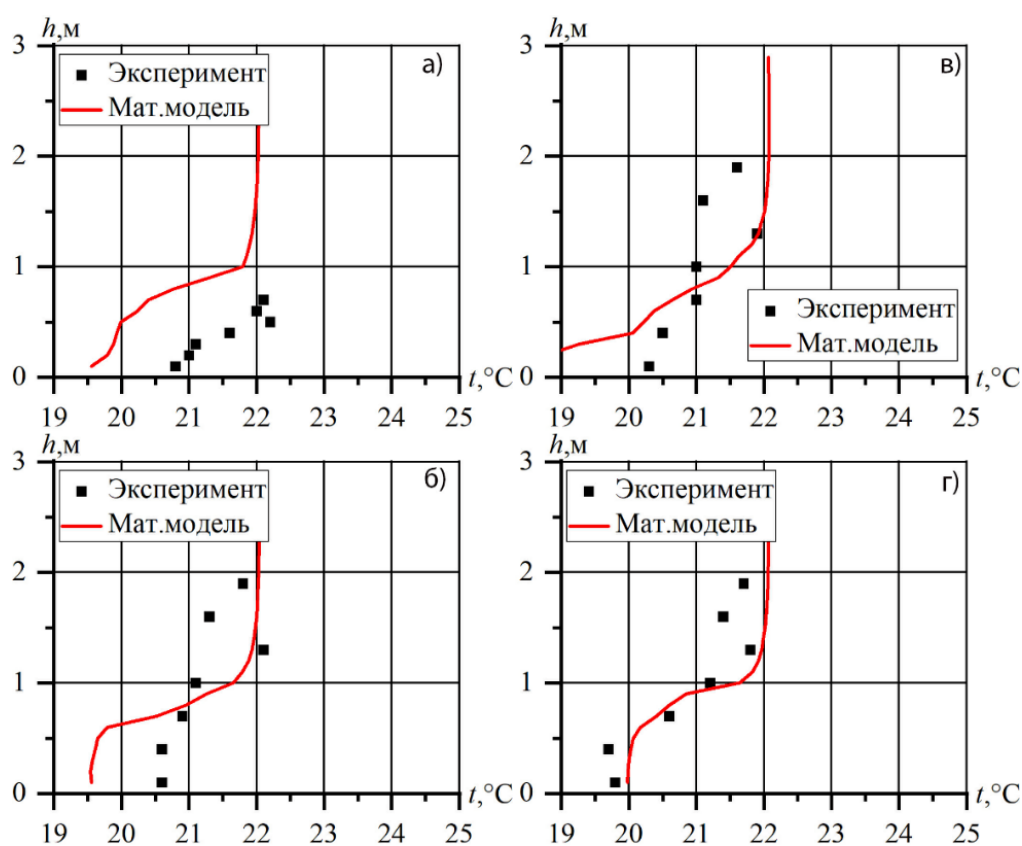


Рисунок 3.20 – Графики распределения температур, t °C: а) – точка замера 1; б) – точка замера 2; в) – точка замера 3; г) – точка замера 4

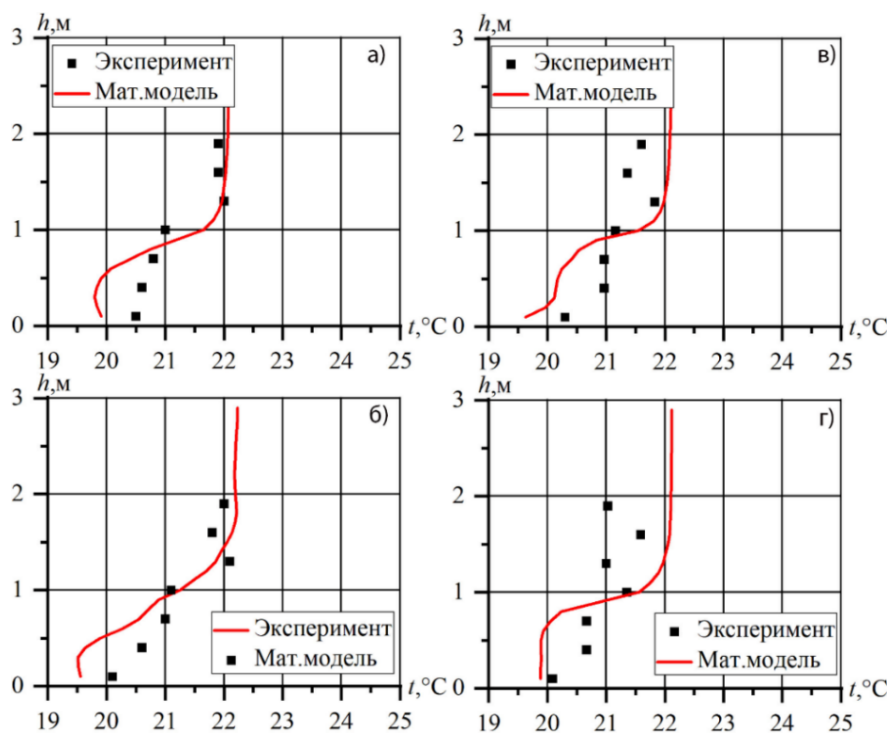


Рисунок 3.21 – Графики распределения температур, t °C: а) – точка замера 5; б) – точка замера 6; в) – точка замера 7; г) – точка замера 8.

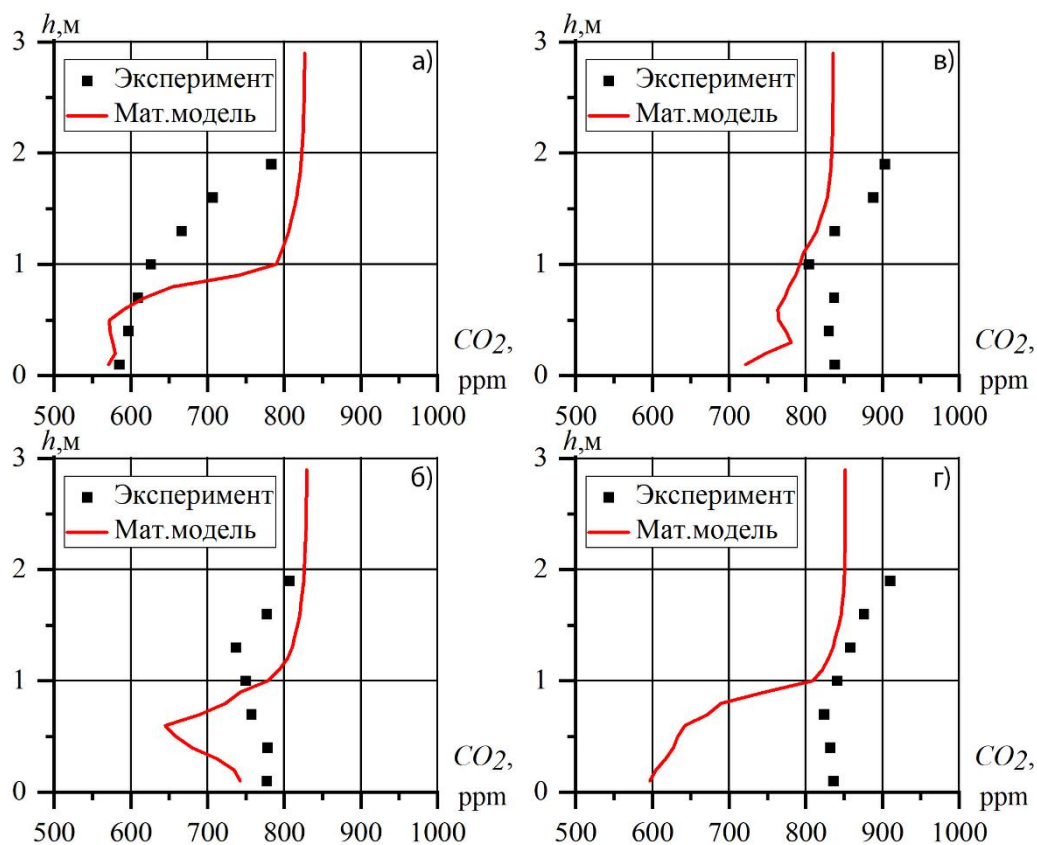


Рисунок 3.22 – Графики распределения концентраций CO_2 : а) – точка замера 1; б) – точка замера 2; в) – точка замера 3 г) – точка замера 4.

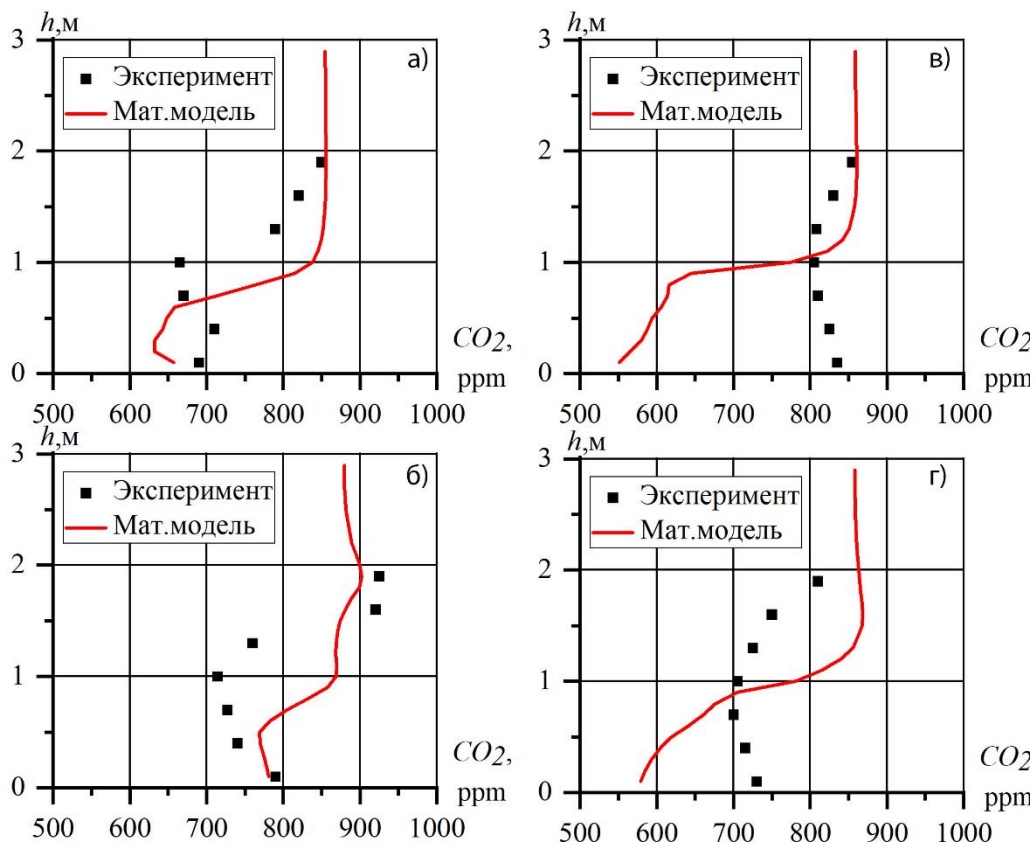


Рисунок 3.23 – Графики распределения концентраций CO_2 : а) – точка замера 5; б) – точка замера 6; в) – точка замера 7; г) – точка замера 8

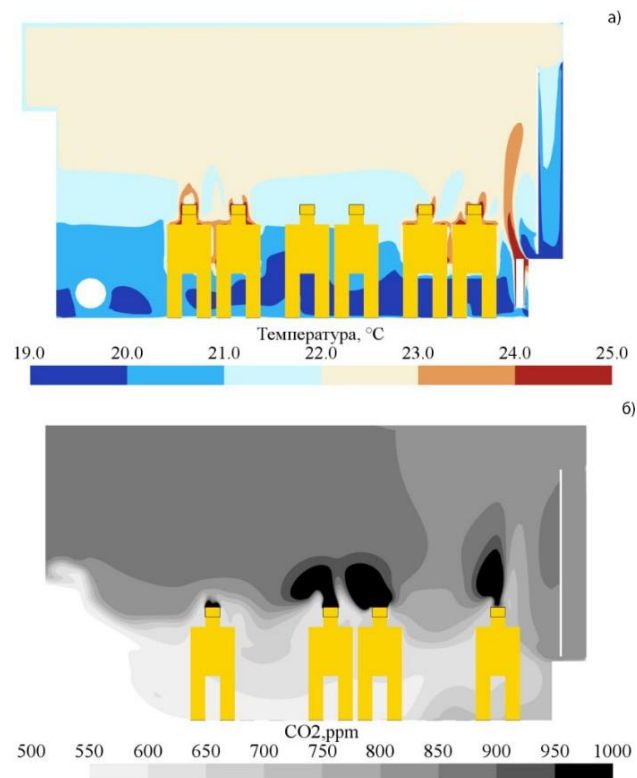


Рисунок 3.24 – Поперечное сечение аудитории а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

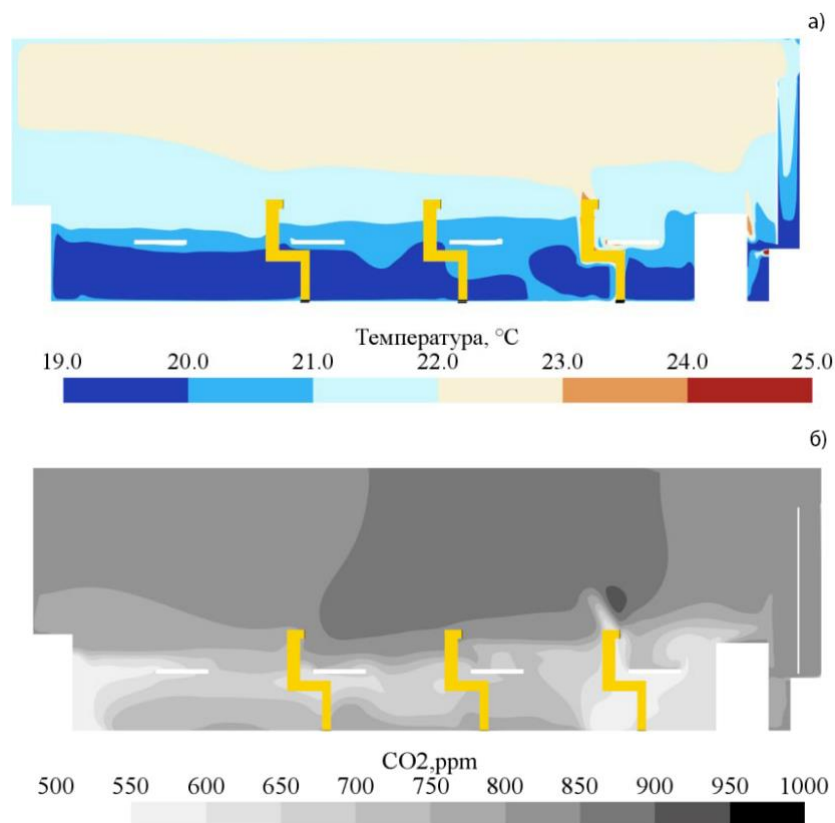


Рисунок 3.25 – Продольное сечение аудитории а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

Анализ полученных в ходе натурного эксперимента и численного моделирования значений температуры воздуха и концентрации углекислого газа (рисунки 3.24 – 3.26) позволяет сделать вывод о схожести в характере распределении указанных параметров в объеме помещения.

При этом в отдельных точках наблюдается расхождение между расчётными и экспериментальными данными. Таким образом, наблюдаемые отклонения находятся в пределах, обусловленных неизбежными упрощениями математической модели и ограничениями исходной информации о граничных условиях. Данное обстоятельство может быть объяснено, во-первых, сложностью объекта исследования и невозможностью учета в численной модели всех влияющих на параметры микроклимата факторов: нестационарность реального процесса в помещении, перетекание воздуха через неплотности дверного проема, различие задаваемых и реальных тепло- и газовыделений от людей и т.п.

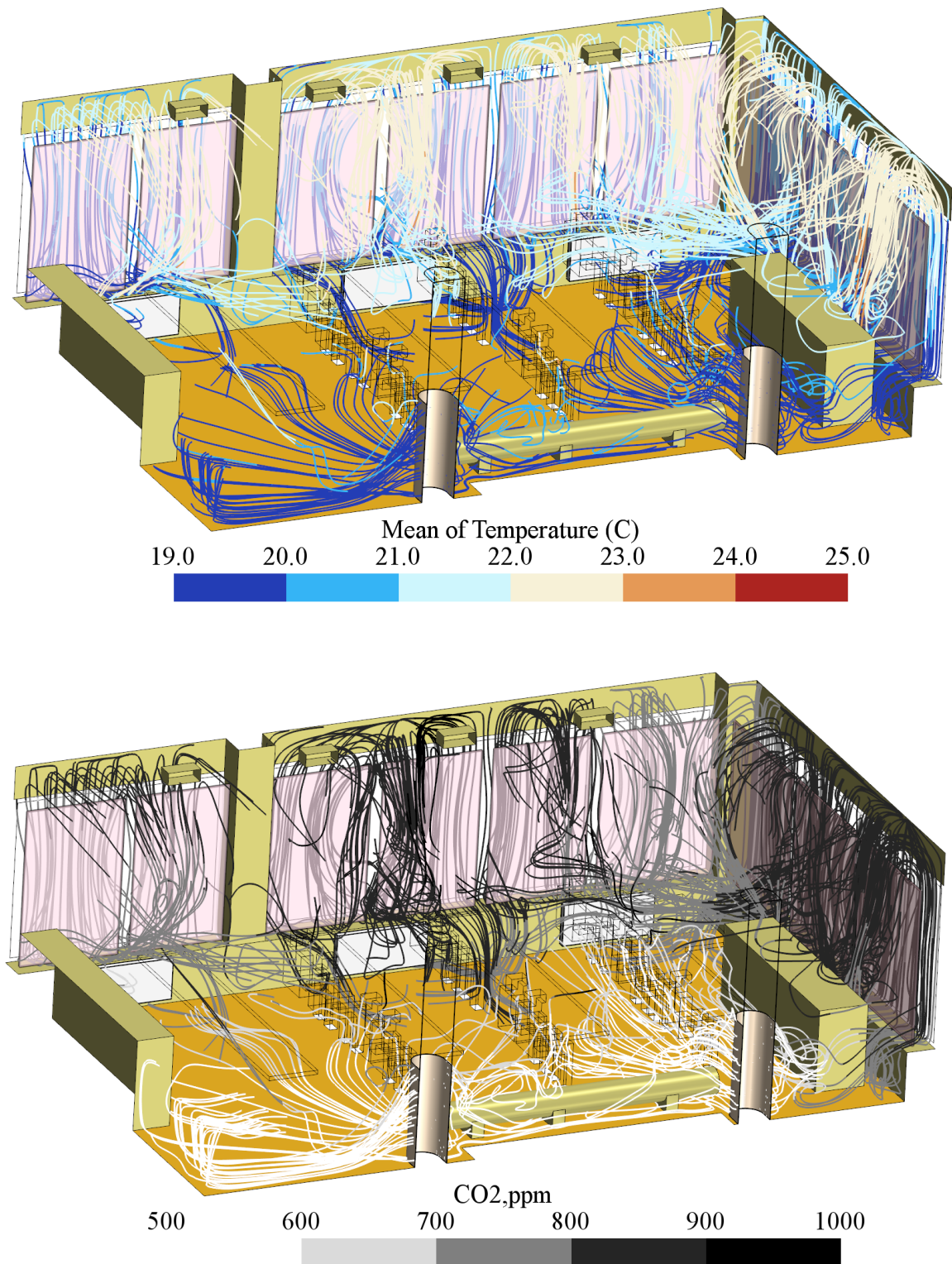


Рисунок 3.26 – Траектории движения воздуха от низкоскоростного воздухораспределителя из верхней части помещения близи окон, раскрашенные по температуре воздуха (сверху) и по концентрации CO_2 (снизу)

Также необходимо учитывать методологическую погрешность измерений: точность выставления датчиков, время восстановления равновесия после их перемещения. В целом, полученный результат можно считать удовлетворительным, что позволяет сделать вывод о корректности разработанной численной модели аудитории и возможности ее применения для дальнейших исследований.

Использование численного моделирования позволяет более глубоко проанализировать характер распределения воздушных потоков в помещении аудитории. Так в ходе проведения натурного эксперимента было отмечено, что в некоторых частях помещения концентрация углекислого газа у пола оказывалась, вопреки классическим представлениям о характере распределения CO_2 по вертикали [42], выше, чем на уровне парт. Анализ полей распределения температуры и концентрации CO_2 по объему помещения, рассчитанных с помощью численного моделирования, позволил объяснить полученный в ходе натурного эксперимента неожиданный результат. На рисунках 3.25 – 3.26 видно, что теплый воздух с высокой концентрацией CO_2 из верхней части помещения распространяется вниз вдоль холодных поверхностей окон в пространстве между остеклением и жалюзи, частично разбавляется инфильтрационным воздухом и затем у подоконника выходит в основной объем помещения. При этом, как видно из рисунка 3.25 – 3.26, в области расположения радиаторов этот поток вовлекается теплыми свободно-конвективными потоками от них и уходит обратно вверх, а в области между радиаторами поток распространяется в направлении пола и движется навстречу приточным струям от низкоскоростных воздухораспределителей, приводя к повышению концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне и, как следствие, к снижению качества воздуха. При этом существенного повышения скоростей воздуха в объеме помещения не наблюдается, стратификация температуры в целом сохраняется.

Таким образом, и в натурном, и в численном эксперименте было получено, что наличие холодных поверхностей в помещении приводит к искажению концентрационной стратификации в нем, ухудшая качество воздуха по сравнению с классической картиной, имеющей место при отсутствии в помещении холодных поверхностей [42].

3.4 Выводы по третьей главе

1. Предложена упрощённая модель низкоскоростного воздухораспределителя с разделением поверхности истечения на три сектора с различными углами подачи воздуха. Установлено, что такая модель воспроизводит поле скорости в приточной струе с погрешностью не более 8 % по сравнению с лабораторным экспериментом, что позволяет использовать её в инженерных расчётах вместо трудоёмкого моделирования.

2. Предложен метод приведения сложных конструкций воздухораспределителей к упрощенной математической модели.

3. Проведён натурный эксперимент в учебной аудитории с вытесняющей вентиляцией, в ходе которого получены распределения температуры и концентрации CO_2 по высоте в характерных точках помещения. Разработана и валидирована численная модель аудитории, учитывающая тепловыделения людей, инфильтрацию и теплообмен через ограждения. Полученное согласование модели и натурального эксперимента позволяет использовать ее для дальнейших исследований влияния различных факторов на распределение воздушных потоков.

4. Выявлен и объяснён эффект искажения концентрационной вертикальной стратификации 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 как в натурном, так и в численном эксперименте и должен учитываться при проектировании вытесняющей вентиляции.

5. Подтверждена пригодность разработанных моделей для дальнейших исследований закономерностей формирования микроклимата при вытесняющей вентиляции; модели могут быть использованы для параметрических расчётов влияния геометрических и режимных параметров.

4 Влияние геометрических и термодинамических параметров на эффективность работы вытесняющей вентиляции

4.1 Влияние расхода приточного воздуха на температурную и концентрационную стратификацию в помещении

В качестве объекта для проведения серии численных экспериментов принят актовый зал, относящийся к помещениям с временным пребыванием людей, в котором люди как источники теплоты и газовыделений находятся в состоянии покоя.

Варьирование мест расположения людей и их количества позволяет охватить большой объем исходных данных для анализа. На основе данного объекта возможны дальнейшие исследования для залов больших размеров, используя метод повторного использования [99]. В качестве базовой модели исследования принято помещение с размерами 8,7х5,5х5 м – модуль №1.

Для подачи воздуха использовался низкоскоростной воздухораспределитель 2ВНВ компании «Арктос». Удаление воздуха из помещения происходит через решетку с поворотными жалюзи АМН 500х500мм.

В рамках исследования были решены 4 задачи с различными значениями температуры и расхода приточного воздуха. При этом расход наружного воздуха во всех расчетах оставался постоянным и равным 530 м³/ч. Для задач 2 – 4 увеличение приточного воздуха осуществлялось за счет применения рециркуляции. Исходные данные для задач представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные параметры приточного воздуха

	Задача 1	Задача 2	Задача 3	Задача 4
Температура притока $t_{пр}$, °С	19	20	21	22
Расход воздуха L , м ³ /ч	530	640	830	1160
Размеры приточного устройства, мм ²	670х1200	670х1200	1000х1200	1500х1200

Источниками тепло-, газовойделений в задачах были люди. Заданы следующие параметры тепловыделений и выделения углекислого газа:

- явные тепловыделения с 1 человека – 80 Вт, в задаче тепловыделения задавались с площади человека равной $1,8 \text{ м}^2$;
- выделение углекислого газа от 1 человека– 26 г/(ч чел).

Граничные условия, задаваемые на поверхностях:

- стены и перекрытия – непроницаемая стенка (*Wall*), температура поверхности $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- поверхность людей – непроницаемая стенка (*Wall*), удельный тепловой поток $q = 45 \text{ Вт/м}^2$;
- приточный и вытяжной воздухораспределитель – массовый расход (*Inlet/Outlet*).

Результаты проводились с использованием стандартной k – ϵ полуэмпирической модели турбулентности. Построена расчетная сетка размерностью 1,1 млн. ячеек (рисунок 4.1). В зоне формирования приточной струи и наиболее высоких градиентов скоростей было произведено измельчение расчетной сетки до размера ячейки – 0,0375м. На рисунке 4.1 представлен фрагмент используемой расчетной сетки.

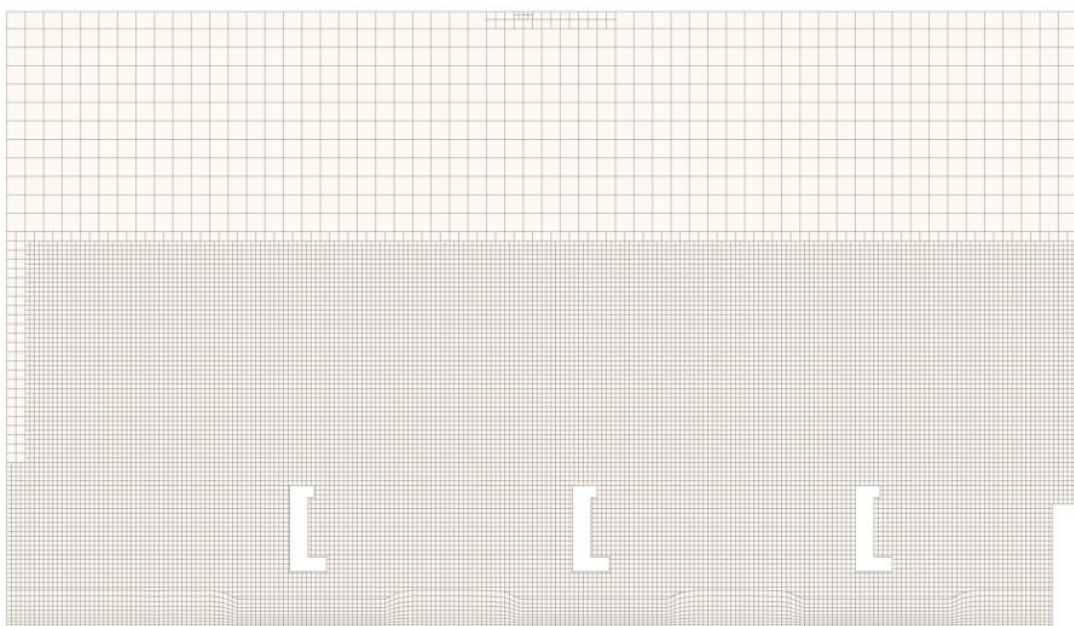


Рисунок 4.1 – Расчетная сетка модели учебной аудитории, модуль №1

Исходя из физиологических особенностей человека и законов теплофизики, теплообмен от человека в окружающую среду осуществляется двумя основными способами: конвективной составляющей и лучистой (радиационной). Соотношение между этими двумя составляющими не является фиксированной величиной, а зависит от совокупности факторов, включающей температуру и подвижность воздуха, среднюю радиационную температуру помещения. Соотношение конвективной и лучистых долей в задачах численного моделирования не задавалось конкретным значением, а рассчитывалось в ходе итераций. Результаты расчетов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчетов

	$t=19\text{ }^{\circ}\text{C}$ $L=530\text{ м}^3/\text{ч}$	$t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $L=640\text{ м}^3/\text{ч}$	$t=21\text{ }^{\circ}\text{C}$ $L=830\text{ м}^3/\text{ч}$	$t=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ $L=1160\text{ м}^3/\text{ч}$
Наименование параметра	Значение	Значение	Значение	Значение
Температура на вытяжке, $^{\circ}\text{C}$	24,1	24,1	24,1	24,1
Средняя по объему помещения температура, $^{\circ}\text{C}$.	23,4	23,4	23,5	23,6
Температура в обслуживаемой зоне, $^{\circ}\text{C}$	22,5	22,5	22,8	23,1
CO_2 на вытяжке, ppm	321,2	321,8	319,0	322,2
Средняя по объему помещения CO_2 , ppm	269,3	266,5	276,2	286,6
CO_2 в обслуживаемой зоне, ppm	132,3	130,8	168,9	209,5

На рисунках 4.2– 4.3 представлены результаты расчета численных моделей. Для построения графиков зависимости распределения температуры и концентрации углекислого газа по высоте помещения, использовались осредненные по горизонтальной плоскости значения, полученные для зоны нахождения тепло-

газовых источников. Шаг измерений параметров – 0,1 м от уровня пола и по всей высоте помещения до потолка, всего 49 плоскостей.

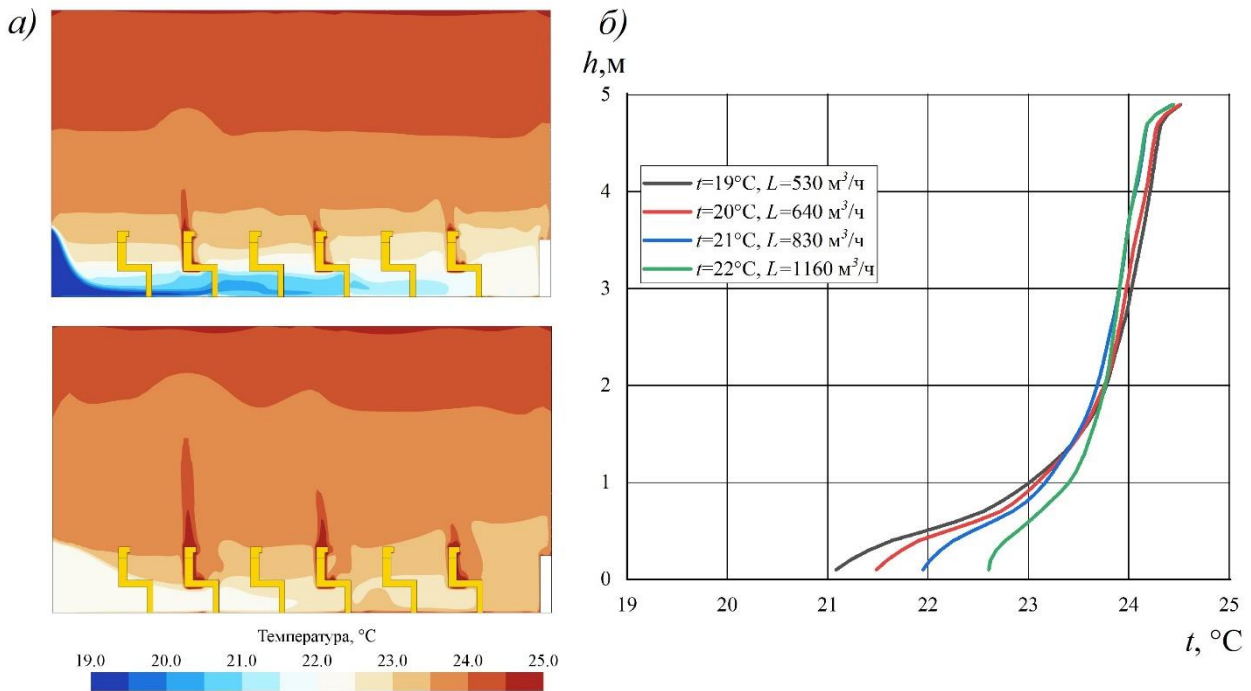


Рисунок 4.2 – Результаты расчета: а) температурные поля для модуля №1; б) график распределения температуры по высоте помещения

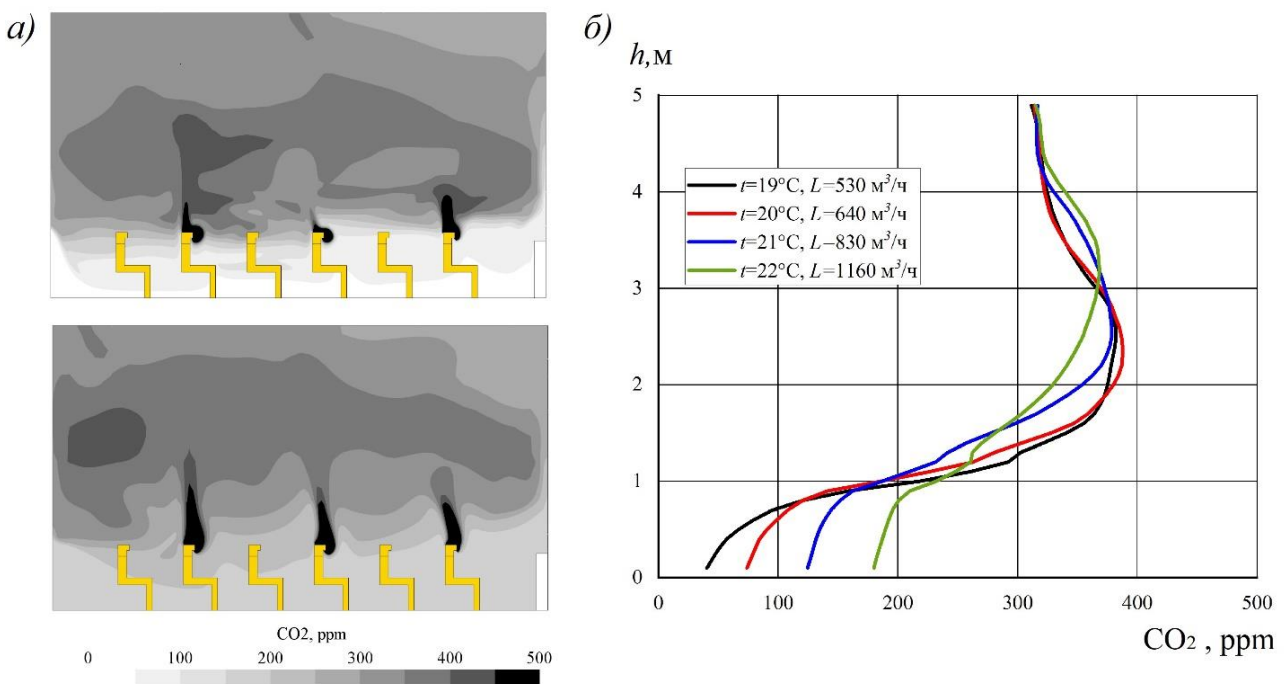


Рисунок 4.3 – Результаты расчета: а) поля концентрации CO_2 модуля №1; б) график распределения концентраций CO_2 по высоте помещения

Полученный характер распределения температуры различается незначительно при подаче приточного воздуха с различными параметрами. Как видно из графиков и полей распределения температуры, основные температурные изменения наблюдаются до высоты 0,5 м от уровня пола и обусловлены начальными параметрами, при этом изменение температуры в обслуживаемой зоне являются незначительными.

Для управления качеством воздуха в помещениях с повышенными требованиями к нормируемым параметрам необходимо знание особенностей распространения по объёму помещения углекислого газа (CO_2), выдыхаемого людьми. Это необходимо для прогнозирования распределения концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне. Кроме того, выявление области максимальной концентрации CO_2 необходимо для обоснованного выбора мест расположения вытяжных устройств.

Несмотря на то, что углекислый газ относится к тяжёлым газам, поскольку его молярная масса (44,01 г/моль) приблизительно в 1,5 раза превышает молярную массу воздуха (28,96 г/моль), однако из-за более высокой температуры выдыхаемой смеси (по сравнению с температурой в помещении), поток CO_2 от человека легче окружающей среды и поднимется в верхнюю часть помещения. В связи с этим понимание механизма распространения CO_2 , выдыхаемого людьми, по объёму помещения является необходимым условием для корректного прогнозирования зон его максимального накопления.

В настоящей работе рассмотрены факторы, влияющие на распространение углекислого газа в помещении:

- свободно-конвективные потоки, формирующиеся вследствие всплывания нагретого воздуха вблизи поверхности тела человека (архимедовы силы, обусловленные температурным расширением воздуха);
- температура выдыхаемого человеком воздуха, содержащего, как правило, около 4% углекислого газа.

На высоте обслуживаемой зоны значения концентрации меняется незначительно и варьируется в диапазоне 250-275 ppm.

4.2 Влияние глубины модуля помещения, обслуживаемого низкоскоростным воздухораспределителем

Для проверки возможности влияния расположения тепловых источников на формирование воздушной струи и параметров микроклимата в помещении в зависимости от удаленности их от воздухораспределителя, были разработаны несколько математических моделей (рисунок 4.4):

- расстояние от воздухораспределителя до первого ряда людей – 1 м (модуль №1);
- расстояние от воздухораспределителя до первого ряда людей – 6,5 м (модуль №2);
- расстояние от воздухораспределителя до первого ряда людей – 12 м (модуль №3).

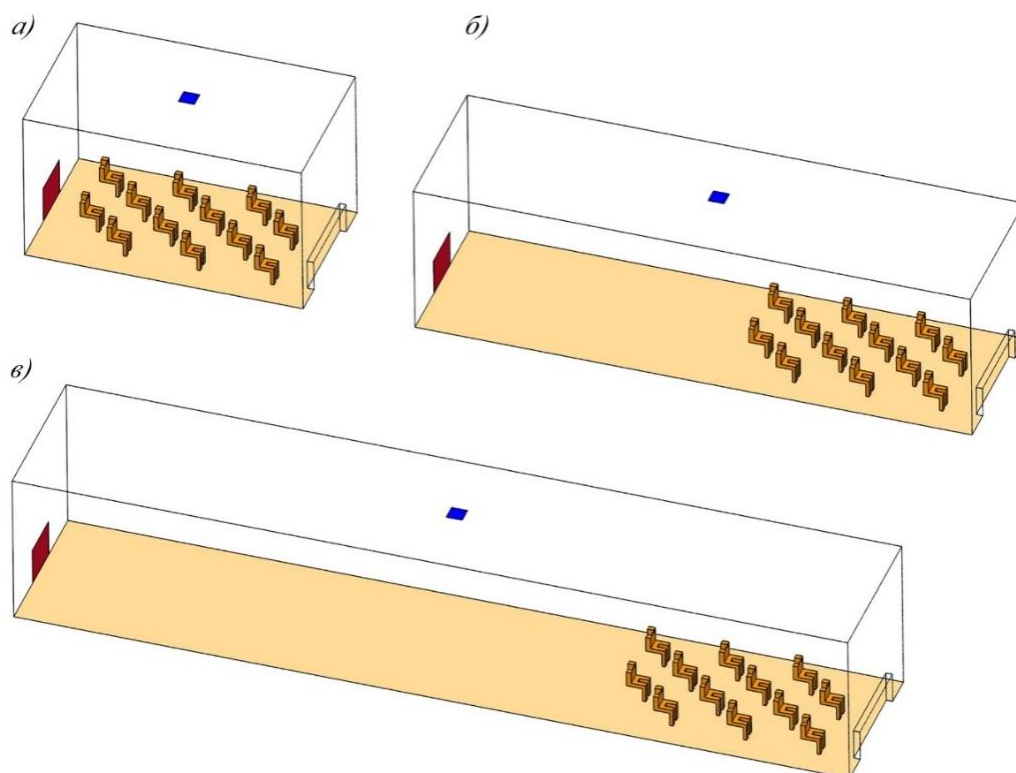


Рисунок 4.4 – 3D модель помещений а) модуль помещения №1; б) модуль помещения №2; в) модуль помещения №3

Для определения влияния расположения источников тепло-, газовыделений относительно удаленности от воздухораспределителя на формирование температурной и концентрационной стратификации, были рассчитаны математические модели с минимальными и максимальными значениями температуры и расхода приточного воздуха (задача 1, задача 4) для модулей помещений №1 – 3, результаты представлены на рисунках 4.5 – 4.6.

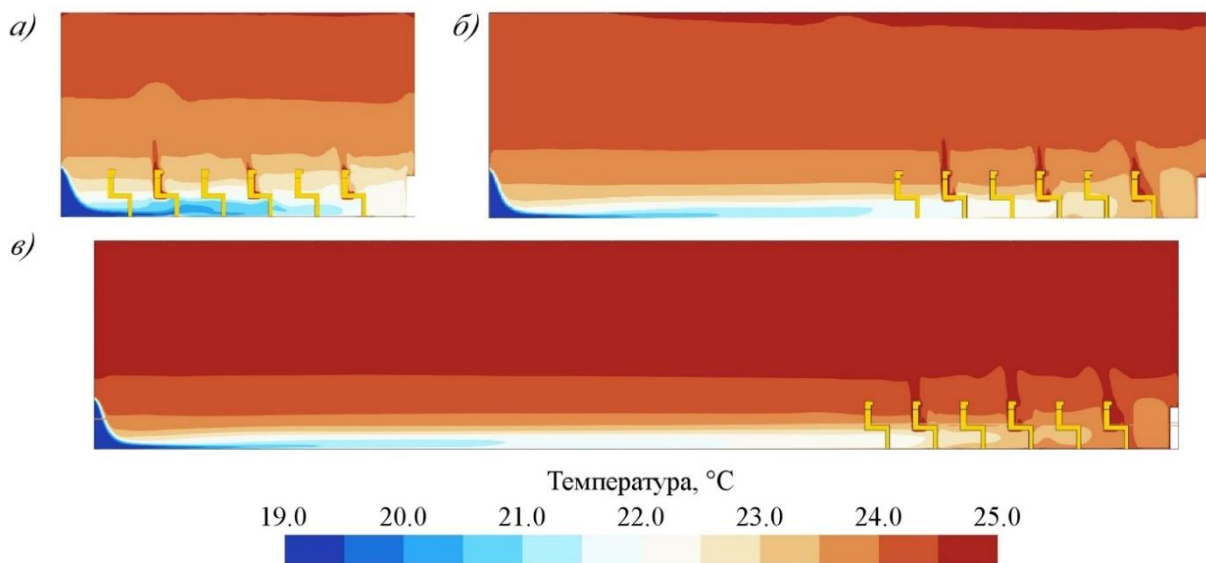


Рисунок 4.5– Результаты расчета: а) температурное поле модуля №1; б) температурное поле модуля №2; в) температурное поле модуля №3

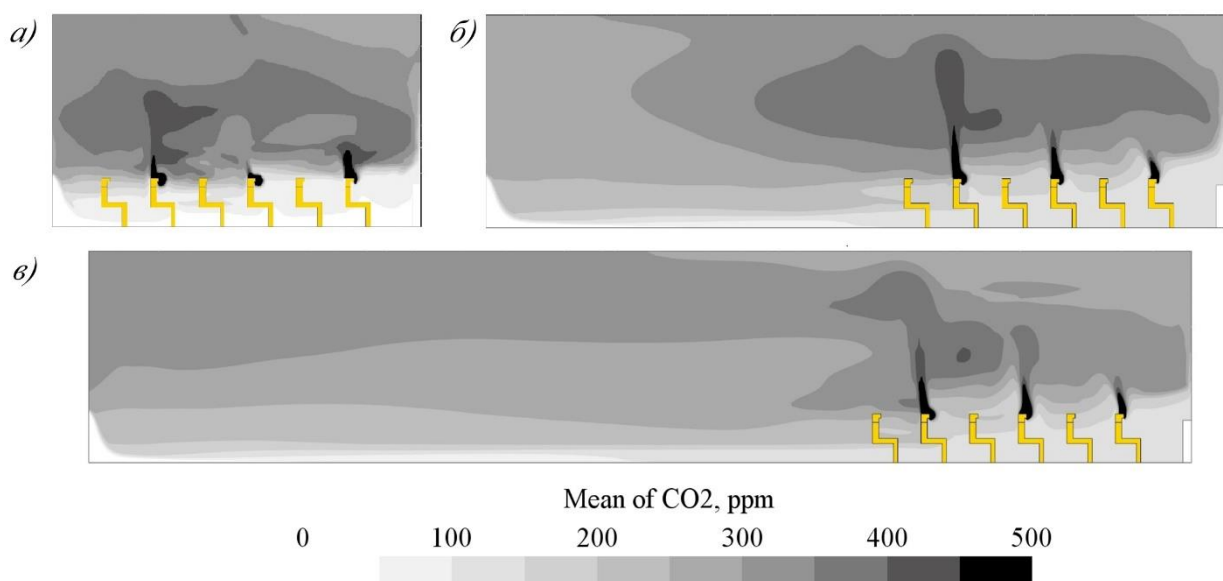


Рисунок 4.6 – Результаты расчета: а) поля концентрации CO₂ модуля №1; б) поля концентрации CO₂ модуля №2; в) поля концентрации CO₂ модуля №3

Графики распределения температуры и углекислого газа по высоте модулей №1 – №3 представлены на рисунке 4.7. Получено, что при увеличении длины помещения в два и три раза выравнивание температуры во всей плоскости по высоте происходит после значения 0,5м от уровня пола. По мере распространения воздушной струи вглубь помещения происходит формирование равномерного распределения температуры по высоте в независимости от исходной температуры приточного воздуха.

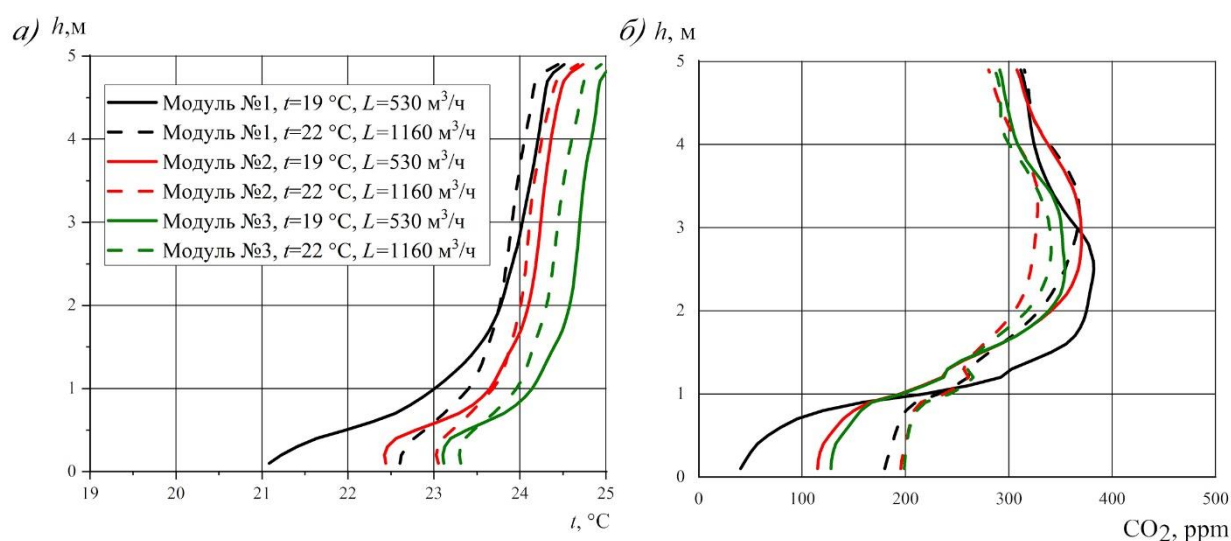


Рисунок 4.7 – Графики распределения параметров: а) график распределения температуры по высоте; б) график распределения концентраций CO2 по высоте

Получено, что температура в зоне нахождения людей растет с увеличением длины помещения при сохранении остальных параметров. Это связано с тем, что при распространении охлажденного потока вдоль поверхности пола происходит передача теплоты от пола к струе. В результате, чем дальше распространяется струя вдоль поверхности пола, тем более теплый поток достигнет первого ряда людей. Отметим, что данный эффект имеет место при невысоком расходе приточного воздуха, когда доля теплоты, отдаваемая струей полу (со знаком «-»), становится ощутима относительно тепловой мощности, необходимой для нагрева приточного воздуха от температуры притока до температуры обслуживаемой зоны.

Анализ полей концентрации CO2 показал, что в центральной части зала формируется зона повышенной концентрации. Причину этого следует искать в

структуре течения: поля скорости показывают, что приточная струя и вторичные циркуляционные потоки переносят CO_2 из зоны дыхания в центр помещения.

Получено, что профиль концентрации CO_2 по высоте слабо зависит от длины зала. То есть вертикальная стратификация формируется одинаково независимо от протяжённости помещения.

Результаты осредненных значений концентрации углекислого газа в объеме помещения представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнение Осредненные значения концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне

Модуль №1			Модуль №2			Модуль №3		
	$t=19\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=22\text{ }^{\circ}\text{C}$	$h, \text{ м}$	$t=19\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=22\text{ }^{\circ}\text{C}$	$h, \text{ м}$	$t=19\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=22\text{ }^{\circ}\text{C}$
$h, \text{ м}$	$\text{CO}_2, \text{ ppm}$	$\text{CO}_2, \text{ ppm}$	$\text{CO}_2, \text{ ppm}$	$\text{CO}_2, \text{ ppm}$	$\text{CO}_2, \text{ ppm}$	$\text{CO}_2, \text{ ppm}$	$\text{CO}_2, \text{ ppm}$	$\text{CO}_2, \text{ ppm}$
1,5	132,3	209,5	1	255,1	265,4	1	243,7	285,3
2	182,2	230,1	1,5	277,6	287,8	1,5	257,9	302,7

4.3 Влияние расположения источников тепло-газовыделений в помещении

Исследовано распространение приточной струи в глубину помещения и изменение полей скорости и температуры при её взаимодействии с конвективными потоками от людей. Люди размещались на различном расстоянии от воздухораспределителя. Для этого в модуле №3 (наиболее протяжённом помещении) были рассмотрены несколько вариантов размещения людей:

- расположение тепловых источников в начале помещения;
- расположение тепловых источников по центру помещения;
- расположение тепловых источников в конце помещения.

При размещении тепловых источников вблизи воздухораспределителя наблюдается снижение концентрации углекислого газа по всему объему помещения, при этом снижение концентрации в обслуживаемой зоне является не значительными. Также при температуре приточного воздуха $t=19^{\circ}\text{C}$ изменение расположения источников тепло-, газовойделений в длинном помещении, по центру и в конце

помещения приводят к незначительным изменениям концентрации CO_2 по всему объему помещения.

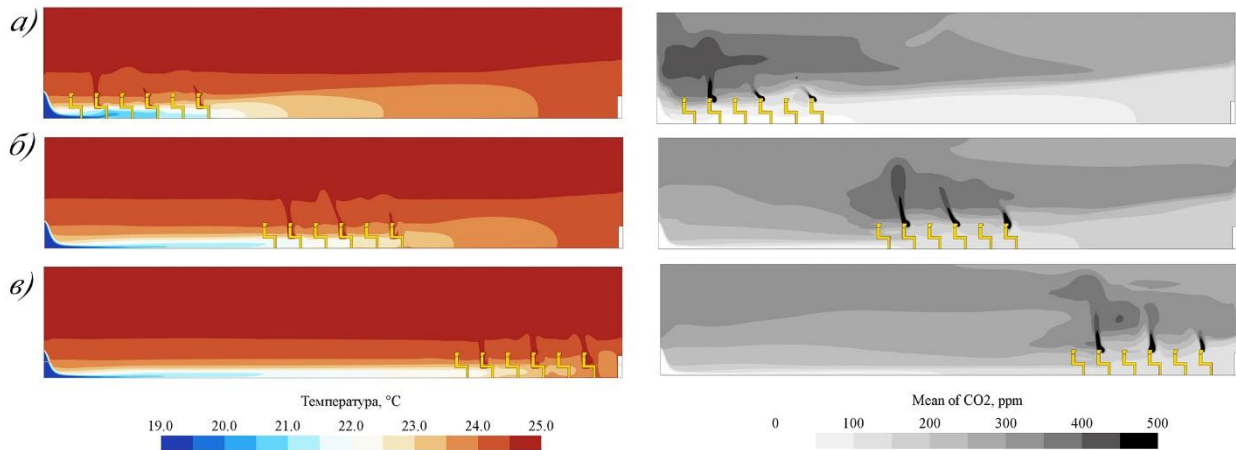


Рисунок 4.8 –Поля распределения параметров: а) источники в начале помещения; б) источники по середине помещения; в) источники в конце помещения

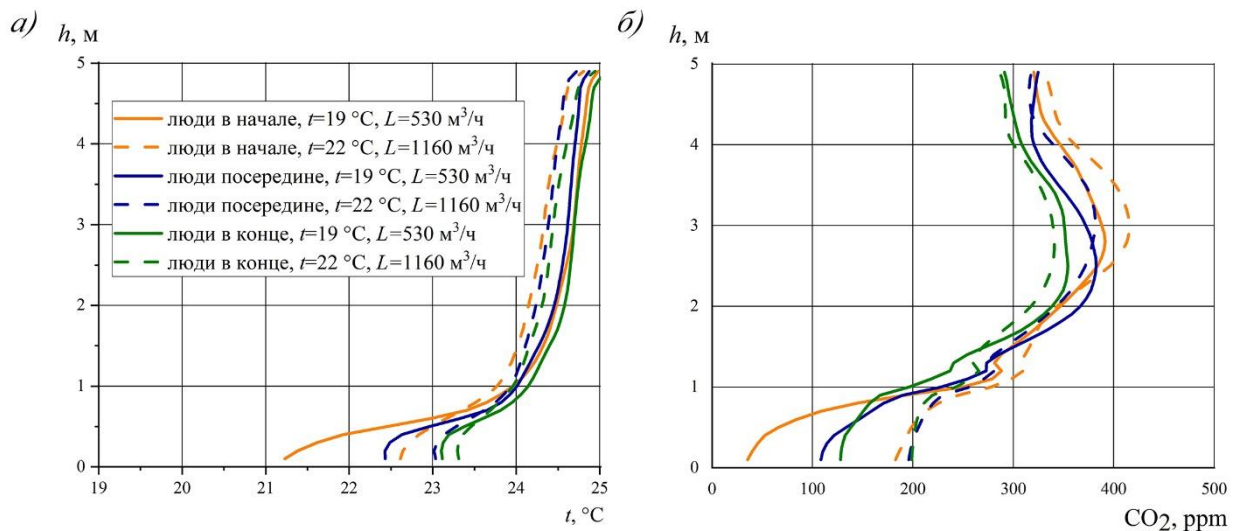


Рисунок 4.9 – Графики распределения параметров а) график распределения температуры по высоте; б) график распределения концентраций CO_2 по высоте

Результаты исследования показали [40], что в случае нахождения людей на значительном удалении от воздухораспределителя скорости потока, распространяющегося вдоль пола, оказываются выше, чем при нахождении людей вблизи воздухораспределителя. Это объясняется тем, что тепловые источники (люди) являются своего рода насосами, которые подсасывают воздух к себе. То есть

дальнобойность приточного потока не является только функцией расхода и воздухораспределителя, но также определяется самими источниками тепловыделений. Этот эффект позволяет обеспечить свежим воздухом людей, далеко удаленных от местоположения притока.

4.4 Влияние типа воздухораспределителя

Для прогнозирования параметров воздушной среды в обслуживаемой зоне при реализации вытесняющей вентиляции важно понимать влияет ли тип, размер, расположение воздухораспределительного устройства на характер распределения температуры и CO_2 в объеме помещения.

Были проведены исследования с различными типами воздухораспределителей. В задачах рассмотрены два варианта расположения источников тепло-, газовыделений: вблизи воздухораспределителя – первый ряд на расстоянии 1,15 м и в конце помещения – первый ряд на расстоянии 18,55 м от воздухораспределителя. Люди располагались в шахматном порядке.

Расчеты проводились для трех вариантов воздухораспределителей (рисунок 4.10):

- стеновой с подачей через один воздухораспределитель, расположенный по центру;
- цилиндрический (полуцилиндрический), расположенный по центру;
- стеновой с подачей через 2 воздухораспределителя, расположенных по границам модуля.

Площадь истечения для всех рассмотренных вариантов была сохранена, для того чтобы соблюсти требования по скорости на истечении из воздухораспределителя.

Постановка задачи:

- площадь воздухораспределителей принята – $1,8 \text{ м}^2$;
- площадь вытяжной решетки – $0,25 \text{ м}^2$;

- геометрические параметры помещения ширина – 5 м; длина – 26 м; высота – 5 м;
- источниками тепло-, газовыделений являются люди в количестве 12 человек;
- температура приточного воздуха – $t_{\text{пр}}=19\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- расход приточного воздуха – $L=530\text{ м}^3/\text{ч}$;
- выделение от CO_2 человека – $\text{CO}_2=26\text{ г}/(\text{ч чел})$;
- явные тепlopоступления от человека – $Q=80\text{ Вт}$;
- расстояние между людьми 1,35 м
- расстояние между рядами 1,7 м.

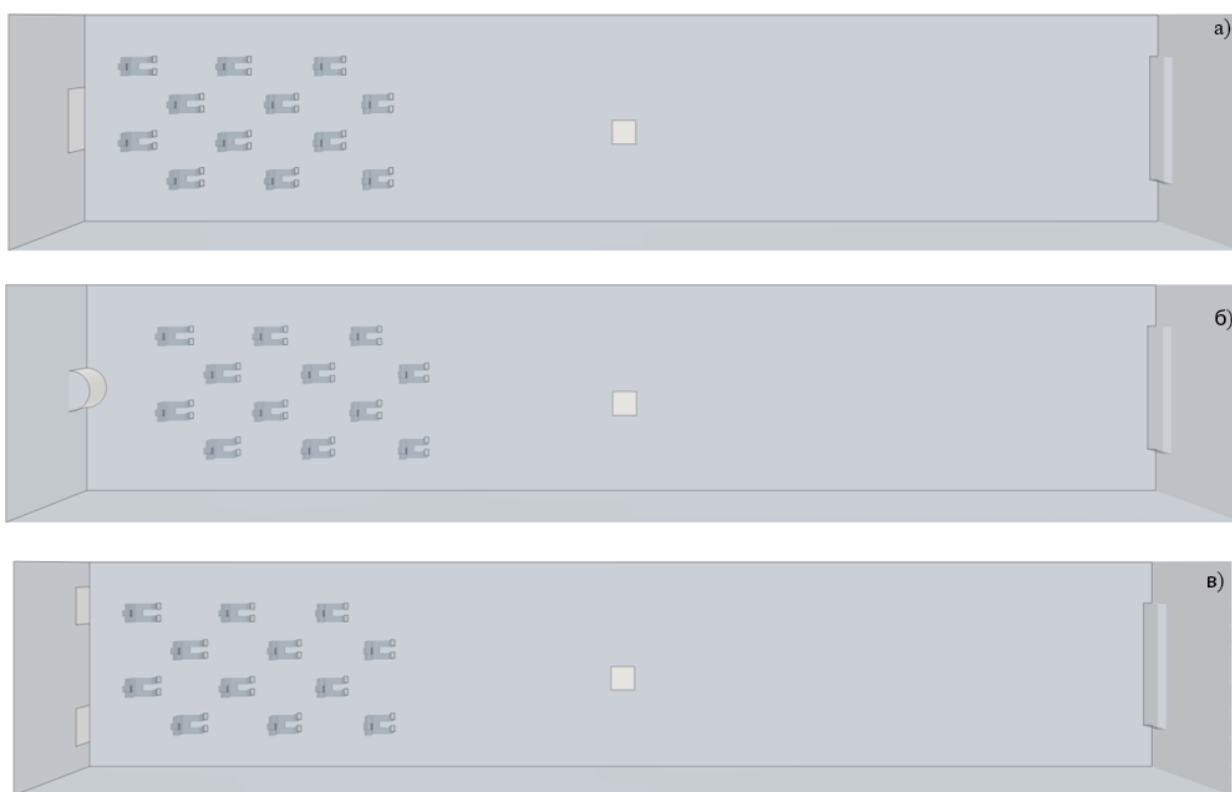


Рисунок 4.10 – Модуль помещения а) стеновой воздухораспределитель; б) полукруглый воздухораспределитель; в) два стеновых воздухораспределителя

Граничные условия на поверхностях:

- стены и перекрытия – непроницаемая стенка (*Wall*), температура поверхности $t=25^{\circ}\text{C}$;
- поверхность людей – непроницаемая стенка (*Wall*),

– приточный и вытяжной воздухораспределитель – массовый расход (*Inlet/Outlet*).

Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась стандартная k – ε модель турбулентности. Построена расчетная сетка общей размерностью 2,0 млн. ячеек, проверенная на сеточную сходимость.

В зоне формирования приточной струи и наиболее высоких скоростей произведено измельчение расчетной сетки до размера ячейки 0,0375м.

Для анализа параметров микроклимата использовались значения температуры и концентрации CO_2 в плоскостях по всей высоте помещения с шагом 0,1м от уровня пола. На основе полученных данных построены графики распределения температуры по высоте помещения. Сравнение полученных результатов приведены на рисунках 4.11 – 4.14.

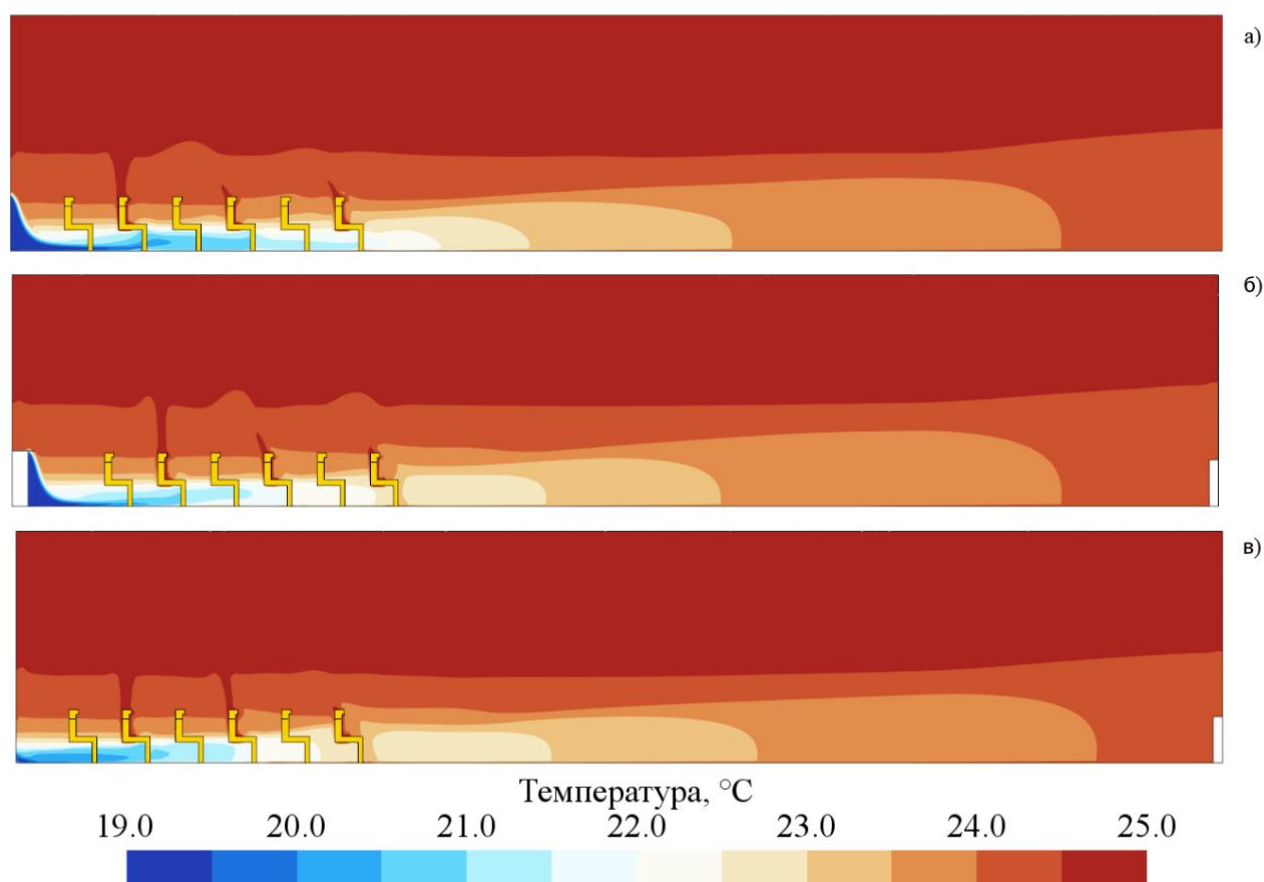


Рисунок 4.11 – Температурные поля: а) стеновой воздухораспределитель; б) полукруглый воздухораспределитель; в) два стеновых воздухораспределителя

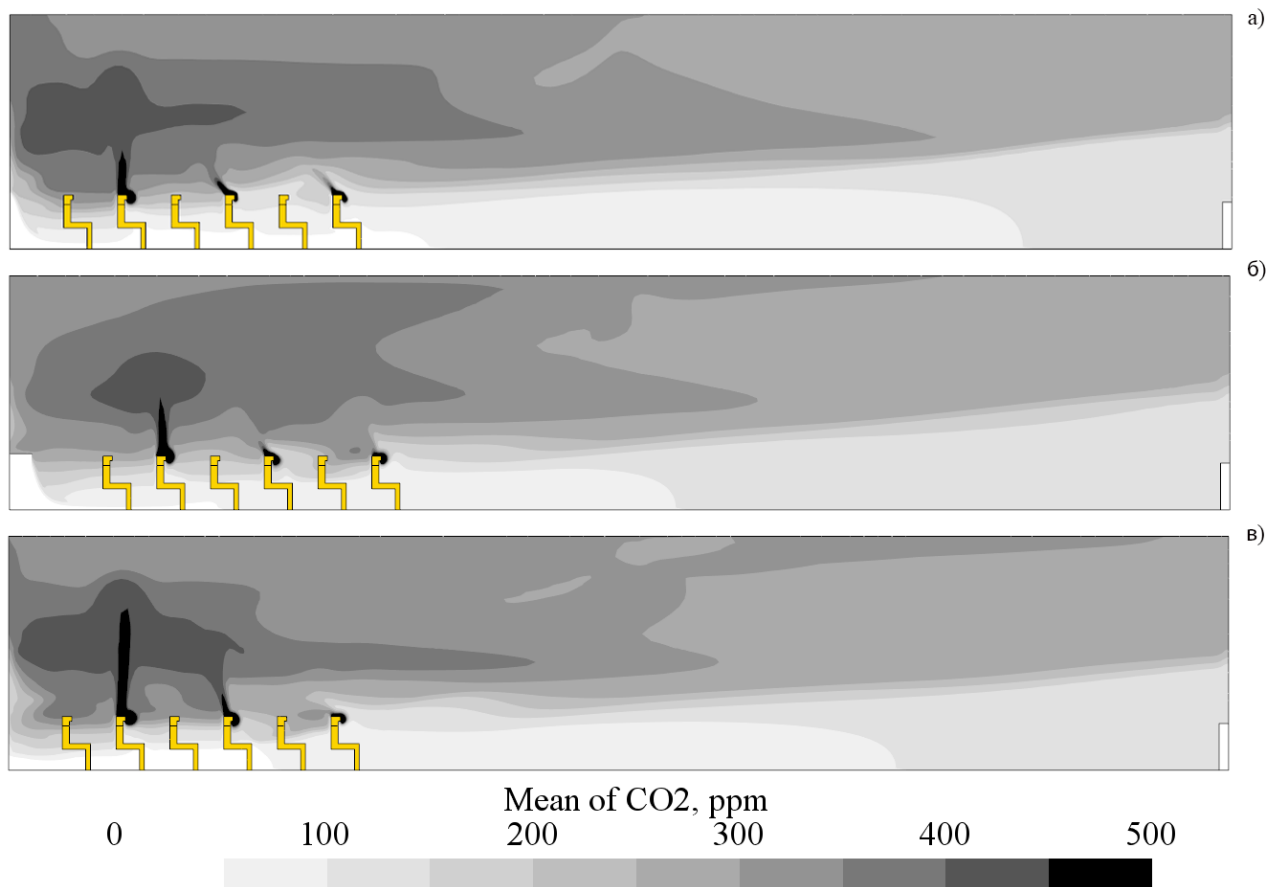


Рисунок 4.12 –Поля концентраций CO_2 : а) стеновой воздухораспределитель; б) полукруглый воздухораспределитель; в) два стеновых воздухораспределителя

Как представлено на полях распределения температуры и углекислого газа, а также графиках их изменения с высотой, использование воздухораспределительных устройств разного типа приводит к незначительным расхождениям в области формирования приточной струи. По мере распространения струи в глубь помещения различия в скоростных, концентрационных и температурных полях практически исчезают. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что тип воздухораспределителя и его размеры не влияют на формируемые в объеме помещения стратификационные поля температуры и CO_2 .

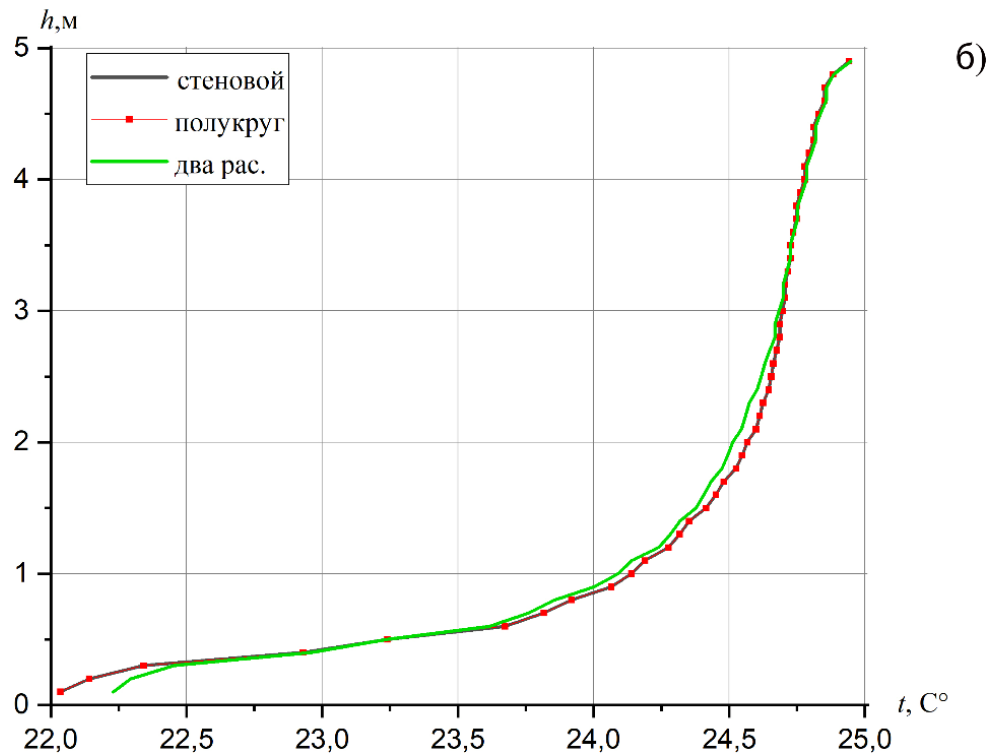
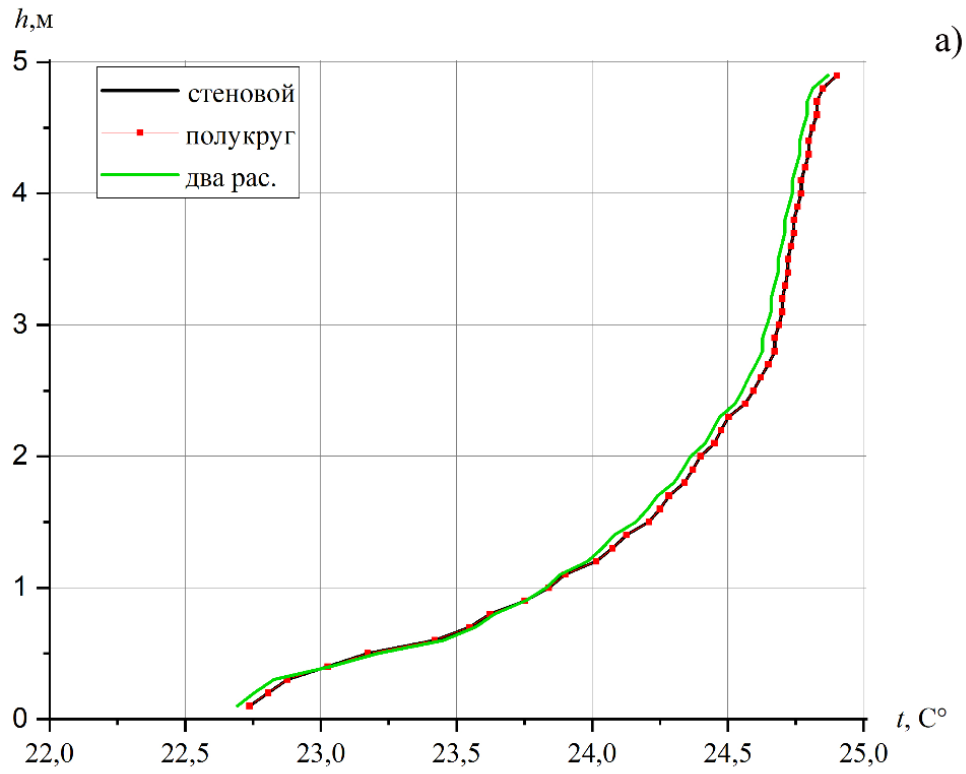


Рисунок 4.13 – Графики распределения температуры, а) тепло-газовые источники в начале;
б) тепло-газовые источники в конце.

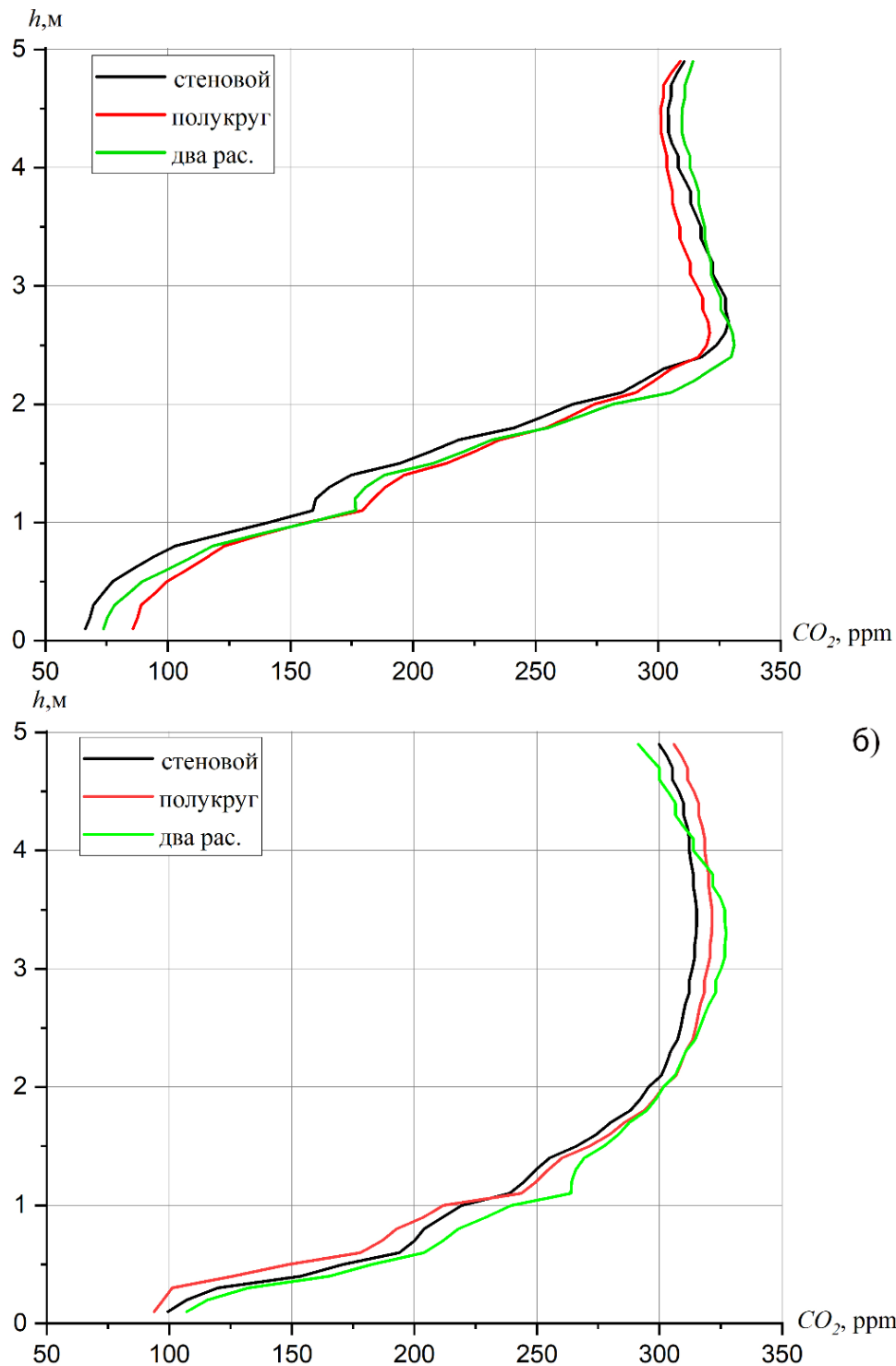


Рисунок 4.14 – Графики распределения концентрации CO_2 , а) тепло-газовые источники в начале; б) тепло-газовые источники в конце.

4.5 Влияние режимного параметра

В разделах 4.1– 4.4 исследования проводились при соотношениях расхода приточного воздуха и геометрических параметров зала, при которых охлажденный

поток приточного воздуха растекается по полу и подхватывается восходящими конвективными потоками от людей с формированием традиционной пассивной термовытесняющей схемы вентиляции.

Однако в практике проектирования соотношение между расходом воздуха и шириной зала выходит за границы сохранения пассивной термовытесняющей схемы вентиляции. Так, при увеличении этого соотношения приточный воздух начинает фронтом распространяться по обслуживаемой зоне, последовательно омывая ряды людей. Структура течения при этом может измениться.

Для оценки влияния указанных выше параметров на характер и структуру течения воздуха в обслуживаемой зоне удобно использовать безразмерную комбинацию, полученную с использованием теории размерностей (пи-теоремы).

Основные величины, характеризующие течение воздуха в обслуживаемой зоне приведены в таблице 4.4

Таблица 4.4 – Величины, характеризующие течение воздуха

Величина	Обозначение	Размерность
Расход воздуха	L	м ³ /с
Ширина зала	b	м
Удельный расход	L/b	м ² /с
Скорость конвективного потока	$u_{\text{конв}}$	м/с

Из таблицы 4 видно, что все величины имеют размерность системы СИ, базовые размерности – длина(м) и время (с). Число возможных независимых безразмерных комбинаций:

$$k=n-r \quad (4.1)$$

где n – число определяющих параметров; $n = 4$;

r – ранг матрицы, размерностей (число независимых базовых размерностей, $r = 2$).

Таким образом, возможны две независимые безразмерные комбинации.

Вариант 1– геометрическое отношение:

$$\pi_1 = b/h_{03}, \text{ т.е. } L/L=1. \quad (4.2)$$

Вариант 2 – отношение расходов (потока):

$$\pi_2 = L / u_{\text{конв}}^\alpha \cdot h_{03}^\beta \cdot b^\gamma. \quad (4.3)$$

Приравнивая размерности получим:

$$L^3 T^{-1} = (L^3 T^{-1})^\alpha \cdot L^\beta \cdot L^\gamma. \quad (4.4)$$

Из сравнения показателей:

$$\begin{aligned} \text{– по времени} \quad TT: -1 &= -\alpha = 1 \\ \text{– по расходу} \quad LL: 3 &= \alpha + \beta + \gamma = 1 + \beta + \gamma \end{aligned} \quad (4.5)$$

Физический смысл имеет безразмерное выражение, которое характеризует связь интенсивности вытесняющего потока и свободно-конвективных потоков:

$$P_L = \frac{L/b}{u_{\text{конв}} \cdot h_{0.3}}, \quad (4.6)$$

где L/b – удельный расход воздуха на единицу ширины зала $\text{м}^2/\text{с}$;

$u_{\text{конв}}$ – характерная скорость конвективного потока от людей, $\text{м}/\text{с}$;

$h_{0.3}$ – высота обслуживаемой зоны, м .

Параметр P_L характеризует отношение интенсивности вытесняющего потока к интенсивности свободно-конвективных потоков в обслуживаемой зоне.

Для дальнейших расчетов принята скорость свободно-конвективного потока над человеком $u_{\text{конв}} = 0,2 \text{ м}/\text{с}$ [78], высота обслуживаемой зоны для сидящих людей $h_{0.3} = 1,5 \text{ м}$ [60].

Для исследования влияния режимного параметра P_L рассмотрены шесть вариантов расчета, отличающихся расходом воздуха, шириной и длиной зала, числом людей и температурой приточного воздуха. Исходные данные для вариантов приведены в таблице 4.5.

На рисунках 4.15 – 4.20 представлены поля температуры и модуля скорости в продольном сечении зала с рядами людей при различных значениях режимного параметра P_L . Анализ полей позволяет выделить три характерных режима.

Таблица 4.5 – Исходные данные для численного моделирования

Параметры	Номера вариантов					
	№R1	№R2	№R3	№R4	№R5	№R6
Температура приточного воздуха, $t_{пр}$, °C	19	21,5	19	19	19	19
Количество людей, $N_{людей}$	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	14,6	26
Расход приточного воздуха, L , $m^3/ч$	883,5	1767	1767	3710	3710	3710
Режимный параметр, P_L	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	1

Пассивный термовытесняющий режим ($P_L=0,1$, вариант №R1).

При $P_L \leq 0,1$ холодный приточный воздух опускается к полу и растекается вдоль него. При этом люди, расположенные на пути распространения воздуха являются не столько сопротивлением для его продвижения вперед, сколько источниками движения: восходящие конвективные потоки от людей эжектируют приточный воздух, вытесняя вредности в верхнюю зону.

Переходный режим ($P_L=0,2$ (варианты №R2, №R3, №R4))

При $0,1 < P_L < 0,5$ действие вынужденной конвекции начинает влиять на распространение свободно-конвективных потоков от людей (рисунки 4.16 – 4.18). Вертикальная стратификация становится менее выраженной в обслуживаемой зоне, чем при пассивном термовытесняющем режиме. Начинает проявляться горизонтальное изменение параметров вдоль обслуживаемой зоны.

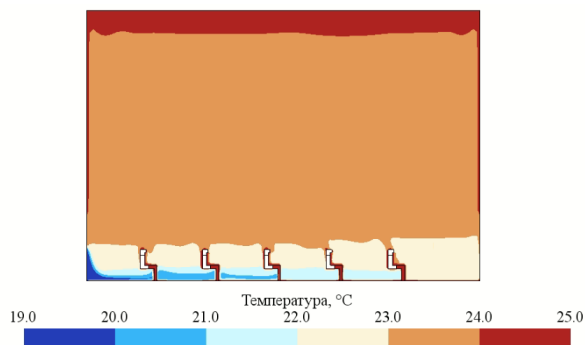
Варианты №R2, №R3 и №R4 отличаются геометрией, числом людей и температурой притока, но при $P_L=0,2$ во всех случаях наблюдается качественно схожая картина: искажение свободно-конвективных струй без формирования устойчивого фронта распространения приточного потока.

Термопоршневой режим ($P_L=1,0$ (варианты №R1), $P_L=0,5$ (№R2))

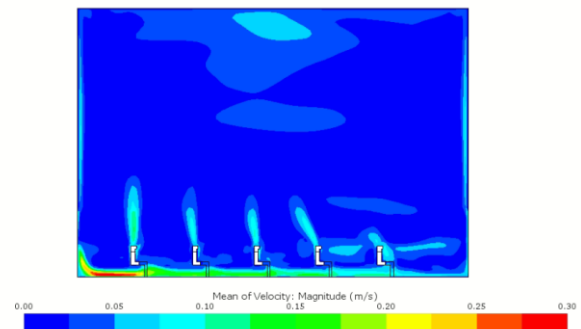
При $P_L \geq 0,5$ приточный воздух образует вытесняющий поток, распространяющийся фронтом по обслуживаемой зоне. По мере продвижения от

истечения воздушный поток постепенно прогревается. При этом уровень вертикальной стратификации остается чётко выраженным.

Формируется термоторшневой 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.

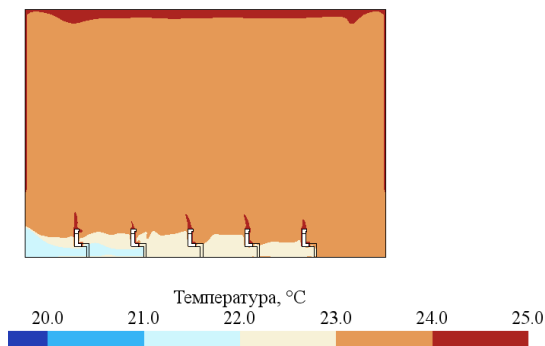


Поле температуры

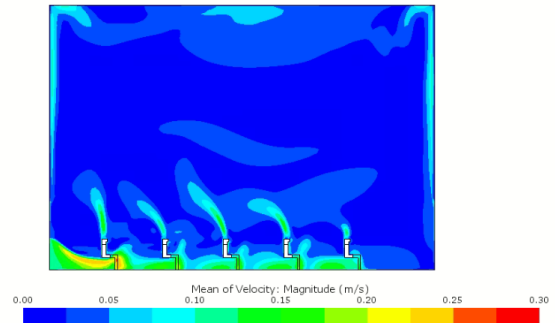


Поле модуля скорости

Рисунок 4.15 – Вариант №R1 режимный параметр, $P_L=0,1$

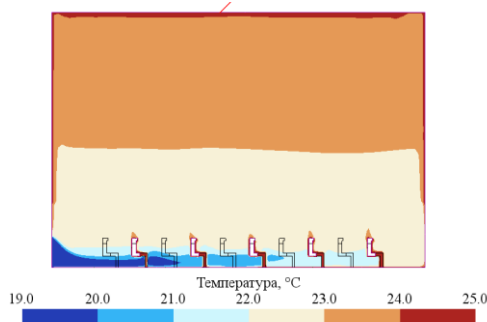


Поле температуры

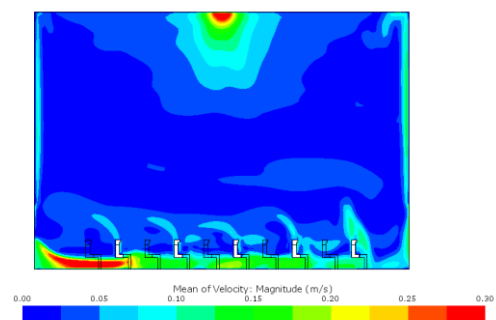


Поле модуля скорости

Рисунок 4.16 – Вариант №R2 режимный параметр, $P_L=0,2$

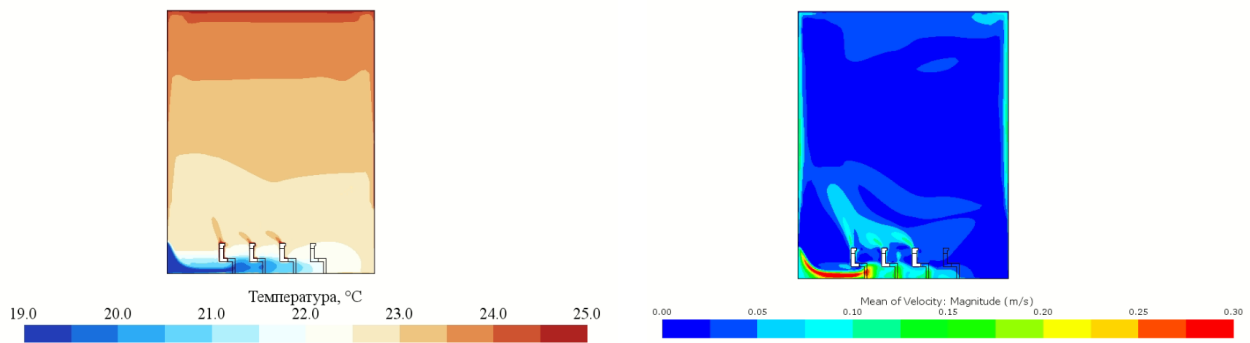


Поле температуры



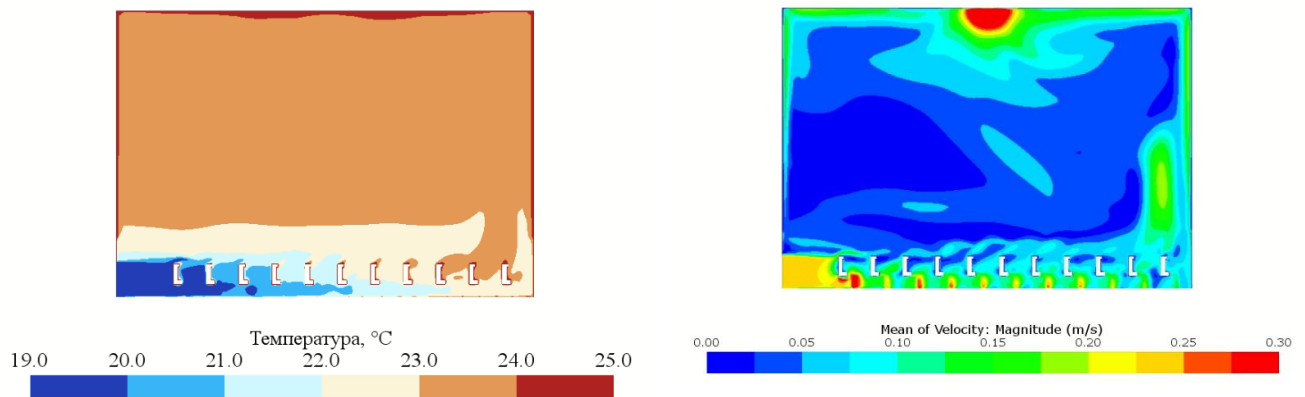
Поле модуля скорости

Рисунок 4.17 – Вариант №R3 режимный параметр, $P_L=0,2$



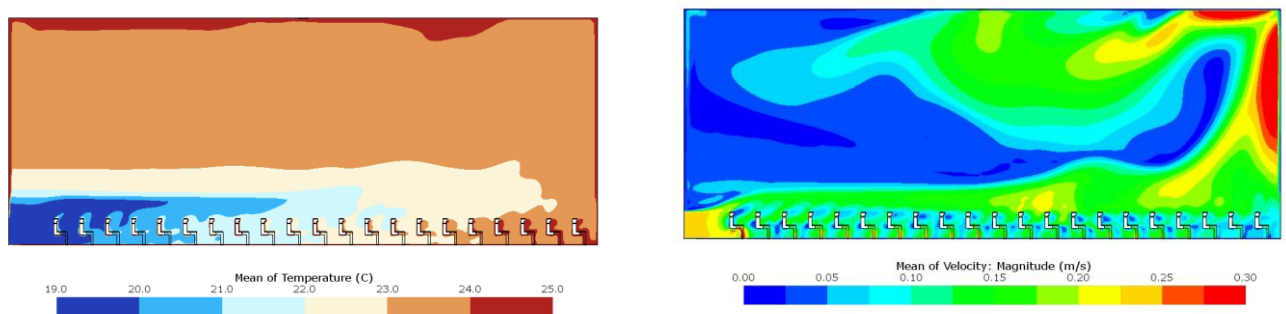
Поле температуры

Поле модуля скорости

Рисунок 4.18 – Вариант №R4 режимный параметр, $P_L=0,2$ 

Поле температуры

Поле модуля скорости

Рисунок 4.19 – Вариант №R5 режимный параметр, $P_L=0,5$ 

Поле температуры

Поле модуля скорости

Рисунок 4.20 – Вариант №R6 режимный параметр, $P_L=1,0$

Из трёх рассмотренных режимов практический интерес для дальнейшего исследования представляет терморпоршневой режим ($P_L \geq 0,5$) для которого существующие методы расчёта пассивной термовытесняющей вентиляции не

обеспечивают требуемой точности так как они основаны на гипотезе горизонтальной однородности параметров, которая при $P_L \geq 0,5$ не справедлива.

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

Таким образом, дальнейшее исследование (раздел 4.5 – 4.7) сосредоточено на термopоршневом режиме как на практически значимом и наименее изученном.

4.6 Влияние плотности размещения людей

В настоящем разделе проведено исследование параметров воздушной среды, формирующихся при термopоршневом режиме вытесняющей вентиляции ($P_L \geq 0,5$).

Рассматривались зависимость формирования воздушной среды от тепло-газовых источников в зависимости от плотности их расположения.

Задача основывается на исследованном ранее помещении модуля №3 – с наибольшей длиной помещения, рассмотрены несколько вариантов расположения тепловых источников в зависимости от количества мест и числа рядов с сохранением общей тепловой нагрузки помещения, за счет сохранения их количества – 84 человека:

- 4 посадочных места в ряду, количество рядов – 21, длина зала – 22,4;
- 5 посадочных места в ряду, количество рядов – 17, длина зала – 26,1м;
- 3 посадочных места в ряду, количество рядов – 28, длина зала – 34,15;
- 2 посадочных места в ряду, количество рядов – 42, длина зала – 50,25м.

Расстояние от воздухораспределителя до первого ряда для всех задач оставалась неизменной – 2 м. При уменьшении посадочных мест в ряду и увеличении количества рядов длина помещения менялась пропорционально.

Габариты источника тепло-, газовыделений и расстояние до ближайших источников:

- длина в проекции сидячего человека – 600 мм;

- ширина в проекции сидячего человека – 450 мм;
- расстояние между источниками в ряду – 550 мм;
- расстояние между рядами – 1150 мм.

Подача воздуха осуществлялась через боковую стену через встраиваемый низкоскоростной воздухораспределитель 2ВНВ – 1200х1500 мм, вытяжка воздуха из помещения осуществляется через решетку с поворотными жалюзи АВК 500х500мм, расположенную на потолке по середине помещения.

Дополнительно были поставлены задачи, в которых расстояния между тепловыми источниками в рядах были изменены, базовое расстояние – 550 мм (Z):

- расстояние между рядами – $\frac{2}{3} \cdot Z = 367$ мм;
- расстояние между рядами – $\frac{3}{4} \cdot Z = 413$ мм;
- расстояние между рядами – $2 \cdot Z = 1100$ мм;

Задачи, где расстояние от воздухораспределителя до первого ряда тепловых источников увеличено:

- расстояние от воздухораспределителя до первого ряда = 6 м;
- расстояние от воздухораспределителя до первого ряда = 10 м.

Для каждой задачи присвоено имя, которые сведены в таблице 4.6 и на рисунках 4.21 – 4.22.

Таблица 4.6 – Наименования поставленных задач

Кол-во рядов, шт	Имя задачи						
	№0	№1	№2	№3	№4	№5	№6
	21	17	28	42	21	21	21
Расстояние между рядами (Z), мм	Z=550мм	Z=550мм	Z=550мм	Z=550мм	Z=367мм	Z=413мм	Z=1100мм
Расстояние от воздухораспределителя до первого ряда, м	2	2	2	2	2	2	2
Расход воздуха на 1 чел. L, м ³ /ч	44	44	44	44	44	44	44

Продолжение таблицы 4.6

	Имя задачи						
	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13
Количество рядов, шт	21	21	17	17	28	28	42
Расстояние между рядами (Z), мм	Z=550мм	Z=550мм	Z=550мм	Z=550мм	Z=550мм	Z=550мм	Z=550мм
Расстояние от воздухораспределителя до первого ряда, м	6	10	6	10	6	10	6
Расход воздуха L, м ³ /ч	44	44	44	44	44	44	44

Продолжение таблицы 4.6

Кол-во рядов, шт	Имя задачи						
	№14	№15	№16	№17	№18	№19	№20
	42	21	21	21	21	21	21
Расстояние между рядами (Z), мм	Z=550мм	Z=367мм	Z=367мм	Z=413мм	Z=413мм	Z=550мм	Z=550мм
Расстояние от воздухораспределителя до первого ряда, м	10	6	10	6	10	2	2
Расход воздуха L, м ³ /ч	44	44	44	44	44	59	66

Продолжение таблицы 4.6

Кол-во рядов, шт	Имя задачи	
	№21	№22
	42	42
Расстояние между рядами (Z), мм	Z=550мм	Z=550мм
Расстояние от воздухораспределителя до первого ряда, м	2	2
Расход воздуха L, м ³ /ч	69	66

Параметры приточного воздуха и граничные условия для всех выполненных задач:

- расход приточного воздуха (L) – 3696 м³/ч для задач №0-18; 4956 м³/ч для задач №19,21; 5544 м³/ч для задач №20,22;
- температура приточного воздуха (t) – 19 °С;
- тепловыделения с 1 человека – 80 Вт, в задаче тепловыделения задавались с площади человека равной 1,8 м²;

- Выделение углекислого газа от 1 человека – 26 г/(ч чел)
- стены и перекрытия – непроницаемая стенка (*Wall*), температура поверхности $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- тело людей – непроницаемая стенка (*Wall*), тепловой поток q от $1\text{ м}^2 = 45\text{ Вт}$;
- приточный и вытяжной воздухораспределитель – массовый расход (*Inlet/ Outlet*).

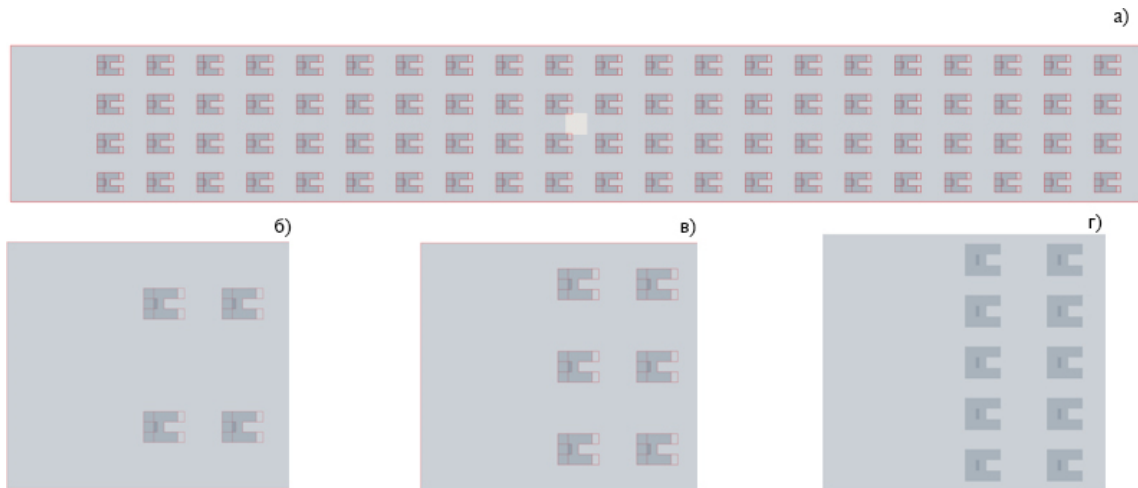


Рисунок 4.21 – Варианты рассадки людей в задачах а) задача №0; б) задача №1; в) задача №2; г) задача №3.



Рисунок 4.22 – Варианты рассадки людей в задачах а) задача №0; б) задача №4; в) задача №5; г) задача №6.

Измеряемые осредненные параметры температуры и выделения углекислого газа производились в персональном объеме для каждого человека, высота объема –

1,4м; ширина – 1,15м; глубина – 0,7м, зона замеров параметров представлена на рисунке 4.23.

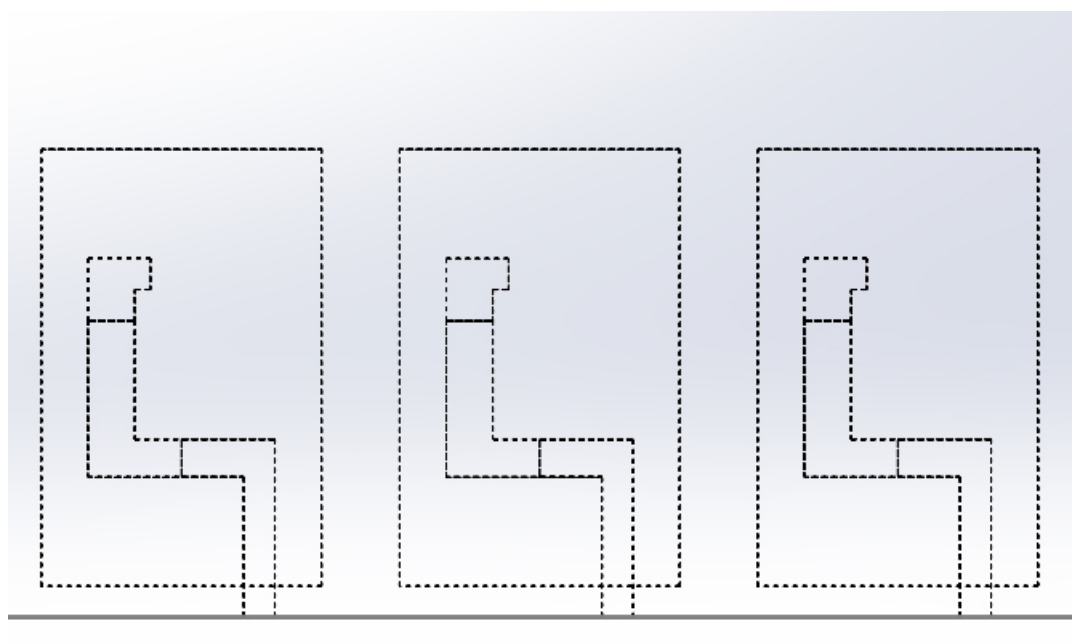


Рисунок 4.23 – Зона измерения параметров

Посчитаны средние параметры температуры и концентраций углекислого газа для каждого ряда, результаты для задачи №0 сведены в таблицу 4.7, результаты других задач представлены в приложении В.

Таблица 4.7 – Средние значения по ряду

Задача №0			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_0 , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2	19,48	0,48	0,48
3,15	19,79	0,79	36,69
4,3	20,00	1,00	60,90
5,45	20,28	1,28	77,10
6,6	20,55	1,55	94,75
7,75	20,82	1,82	111,52
8,9	21,07	2,07	133,19
10,05	21,28	2,28	148,30
11,2	21,49	2,49	163,24

Продолжение таблицы 4.7

12,35	21,66	2,66	180,96
13,5	21,82	2,82	200,18
14,65	21,97	2,97	226,72
15,8	22,17	3,17	251,09
16,95	22,39	3,39	270,14
18,1	22,67	3,67	281,40
19,25	22,92	3,92	315,89
20,4	23,10	4,10	315,94
21,55	23,27	4,27	316,85
22,7	23,45	4,45	324,47
23,85	23,57	4,57	338,39
25	23,76	4,76	357,86

Поля скоростей и концентраций углекислого газа представлены на рисунках 4.24 - 4.30 и в приложении Г.

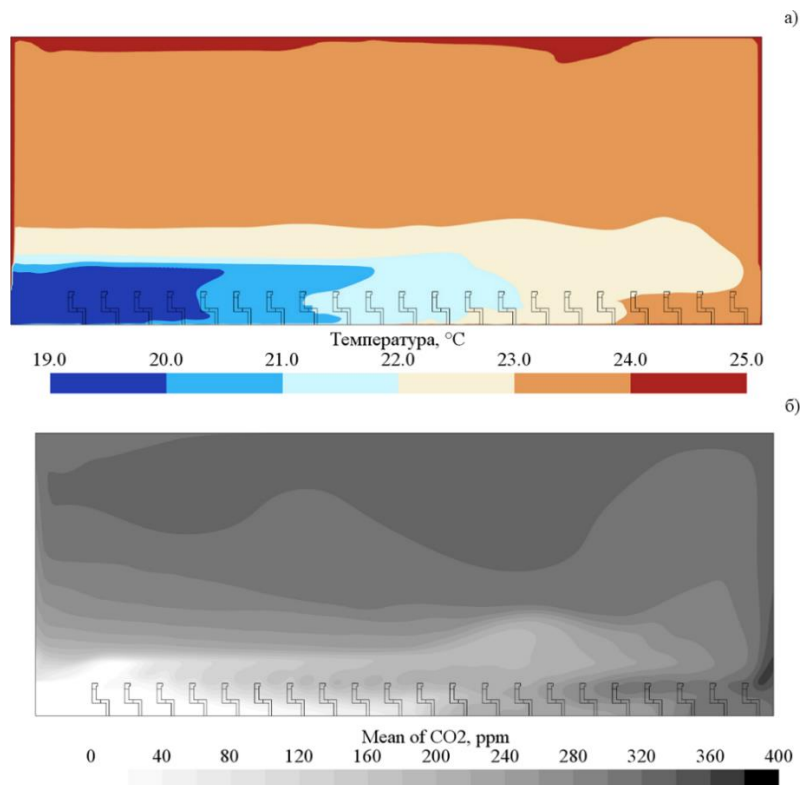


Рисунок 4.24 – Продольное сечение задача №0 а) температурное поле; б) поле концентраций CO₂

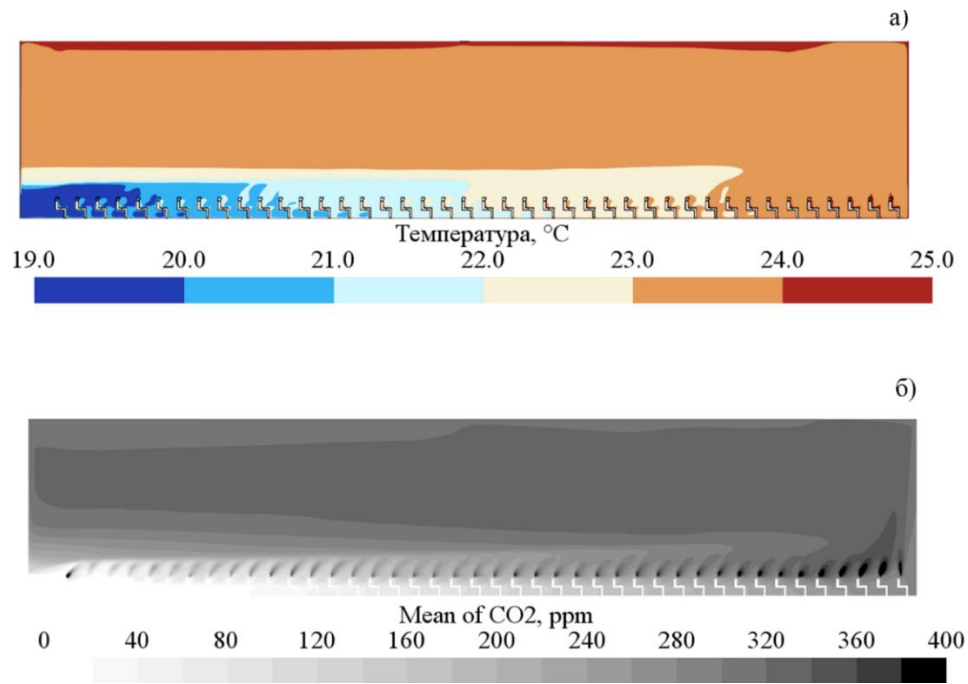


Рисунок 4.25 – Продольное сечение задача №1 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

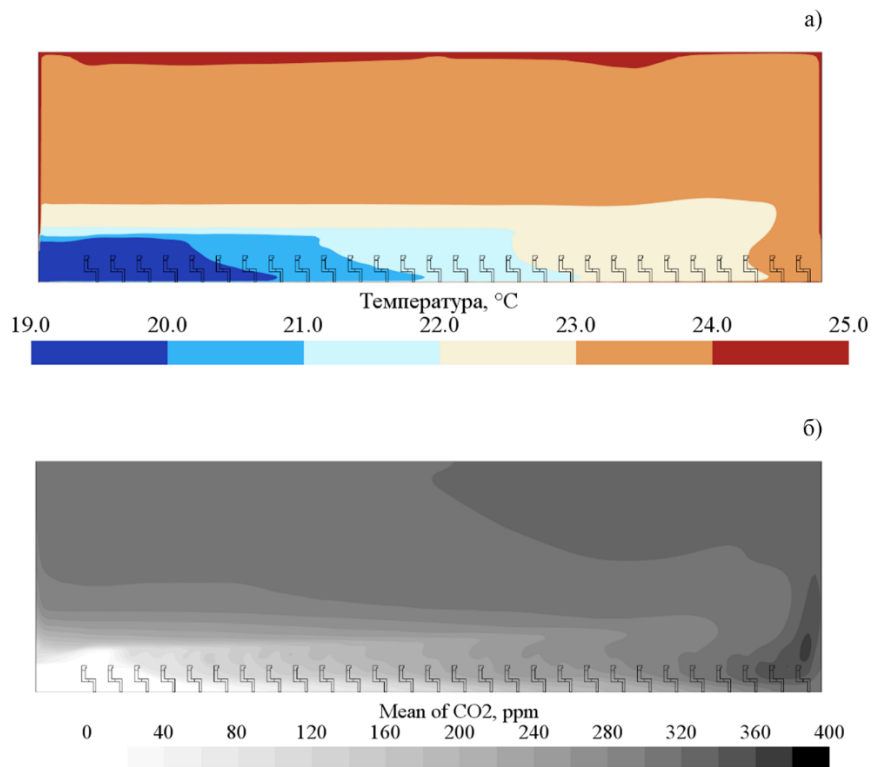


Рисунок 4.26 – Продольное сечение задача №2 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

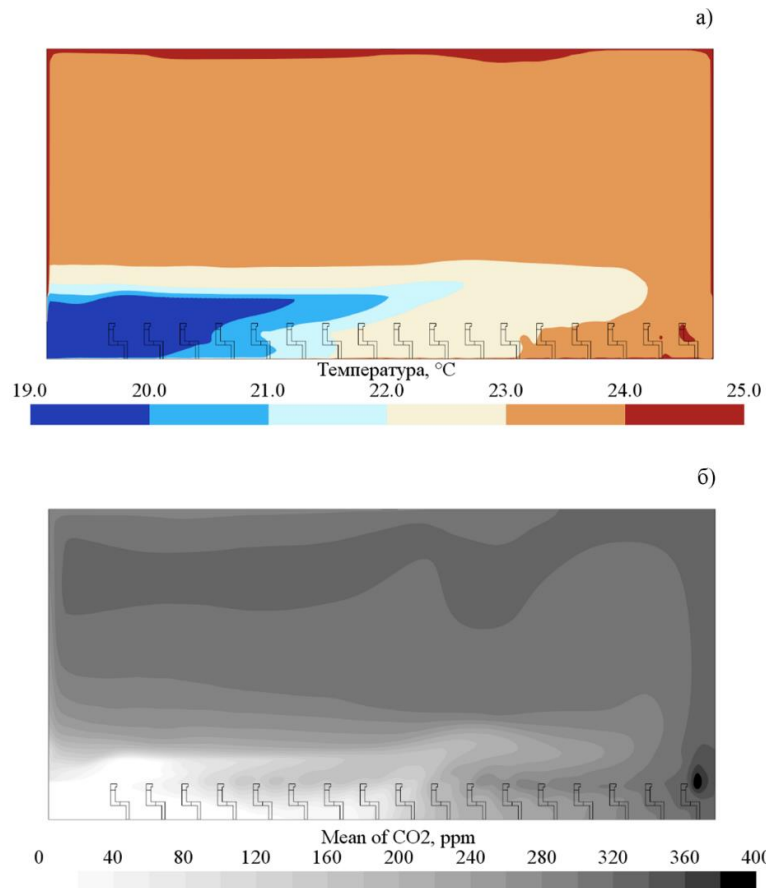


Рисунок 4.27 – Продольное сечение задача №3 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

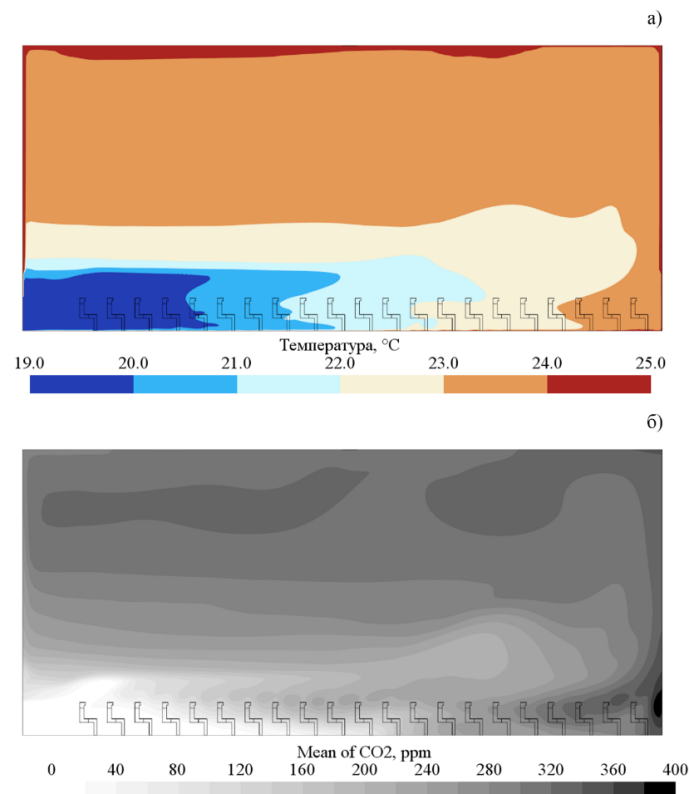


Рисунок 4.28 – Продольное сечение задача №4 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

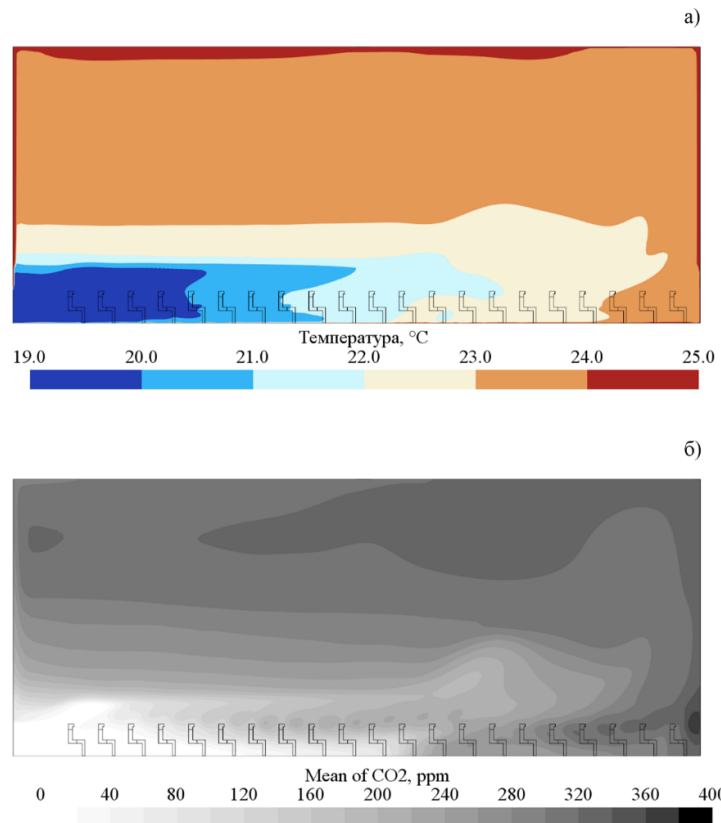


Рисунок 4.29 – Продольное сечение задача №5 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

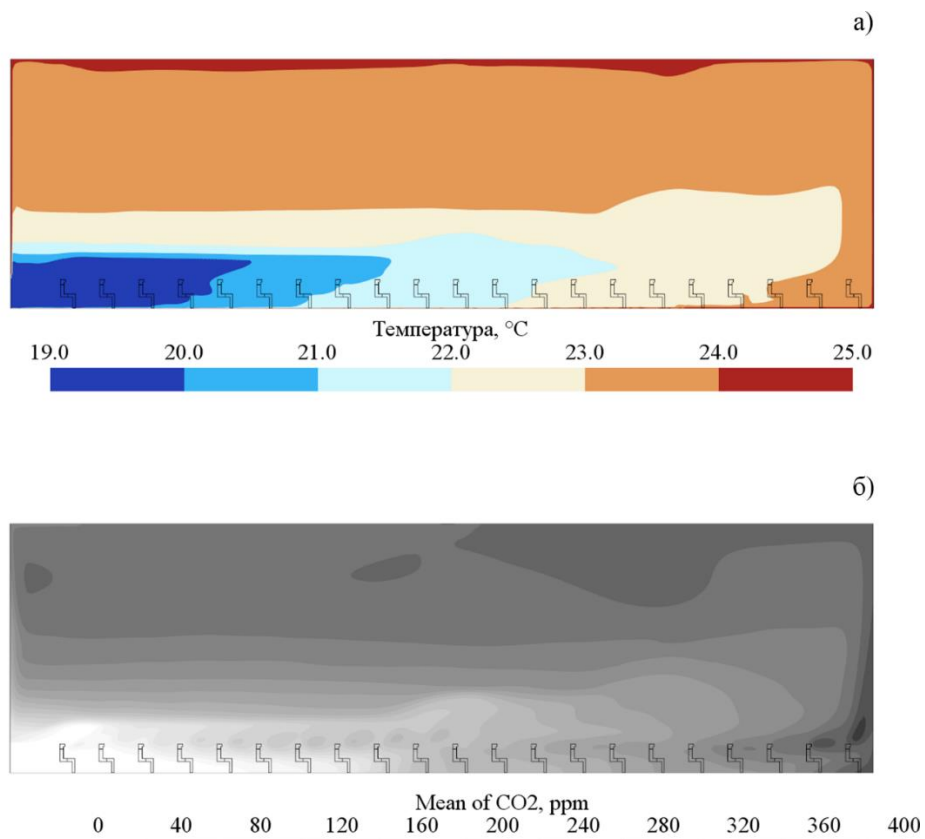


Рисунок 4.30 – Продольное сечение задача №6 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

4.7 Обобщённые зависимости для распределения температуры и концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне

Исследования, проведенные в разделах 4.5, 4.6, показали, что при расположении людей рядами в помещении с вытесняющей вентиляцией при $P_L \geq 0,5$ наблюдается не только вертикальный градиент, но и горизонтальный.

Классические модели вытесняющей вентиляции предполагают, что на фиксированной высоте параметры воздуха (температура, концентрация CO_2) однородны по всей площади помещения. А изменения происходят только по высоте помещения: более холодный и чистый воздух – внизу, более теплый и загрязненный – вверх.

Выполненные исследования с помощью методов численного моделирования выявили дополнительное, ранее не учитываемое распределение – вдоль направления движения воздуха от воздухораспределителей к дальним рядам. Так по мере последовательного омыwania потоком каждого следующего ряда людей температура и концентрация CO_2 монотонно возрастают.

Вертикальный градиент (классический эффект) температуры и CO_2 сохраняется, но на него накладывается горизонтальный градиент.

Повышение температуры воздуха в обслуживаемой зоне относительно температуры притока формируется за счёт нагрева приточного воздуха от последовательно расположенных рядов людей. Данный нагрев действует с первого ряда, когда поток начинает омыывать сидящих людей.

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 (т.е. рост температуры от ряда к ряду) не является случайным, а подчиняется единой закономерности, если ввести обобщённые безразмерные комплексы.

Безразмерные параметры позволяют распространить результаты численного моделирования на другие сходные объекты при равенстве безразмерных комплексов. С этой целью с применением теории размерностей были получены ниже, приведенные комплексы:

$$Ntr = \frac{q_l \cdot x \cdot \rho_l \cdot b}{\rho \cdot C_p \cdot (t_{0.3} - t_0) \cdot L} , \quad (4.7)$$

$$Mtr = \frac{\dot{M}_{CO_2} \cdot x \cdot \rho_l \cdot b}{\rho \cdot (C_{0.3} - C_0) \cdot 1,53 \cdot 10^{-6} \cdot L} \quad (4.8)$$

где ρ_l – плотность людей, чел/м²;

q_l – явные тепловыделения от одного человека, Вт/чел;

t_0 – температура приточного воздуха, °С;

$t_{0.3}$ – нормируемая температура в обслуживаемой зоне, °С;

$\dot{M}_{CO_2}$ – 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;

$C_{0.3}, C_0$ – концентрация углекислого газа в обслуживаемой зоне и на притоке, ppm.

Физический смысл каждого π -комплекса подбирается так, чтобы он отражал соотношение «возможности системы» (воздухообмен) и «нагрузки» (тепло/газ от людей).

Безразмерные комплексы Ntr , Mtr объединяют геометрические параметры зала, плотность рассадки людей, расход приточного воздуха и нормируемые параметры обслуживаемой зоны [12].

В числителе Ntr – величина теплопритока от людей на участке от первого ряда до текущего, Вт;

в знаменателе – тепловой поток, необходимый для нагрева приточного воздуха от t_0 до $t_{0.3}$, Вт.

В числителе M_{tr} – массовый поток CO_2 , выделяемый людьми на участке от первого ряда до координаты x , кг/с;

в знаменателе – массовый поток CO_2 , который необходимо удалить для поддержания нормируемой концентрации в обслуживаемой зоне, кг/с.

Вводя безразмерные температуры и концентрацию углекислого газа:

$$\theta = \frac{t - t_0}{t_{0.3} - t_0} \quad (4.9)$$

$$\chi_{CO_2} = \frac{C - C_0}{C_{0.3} - C_0} \quad (4.10)$$

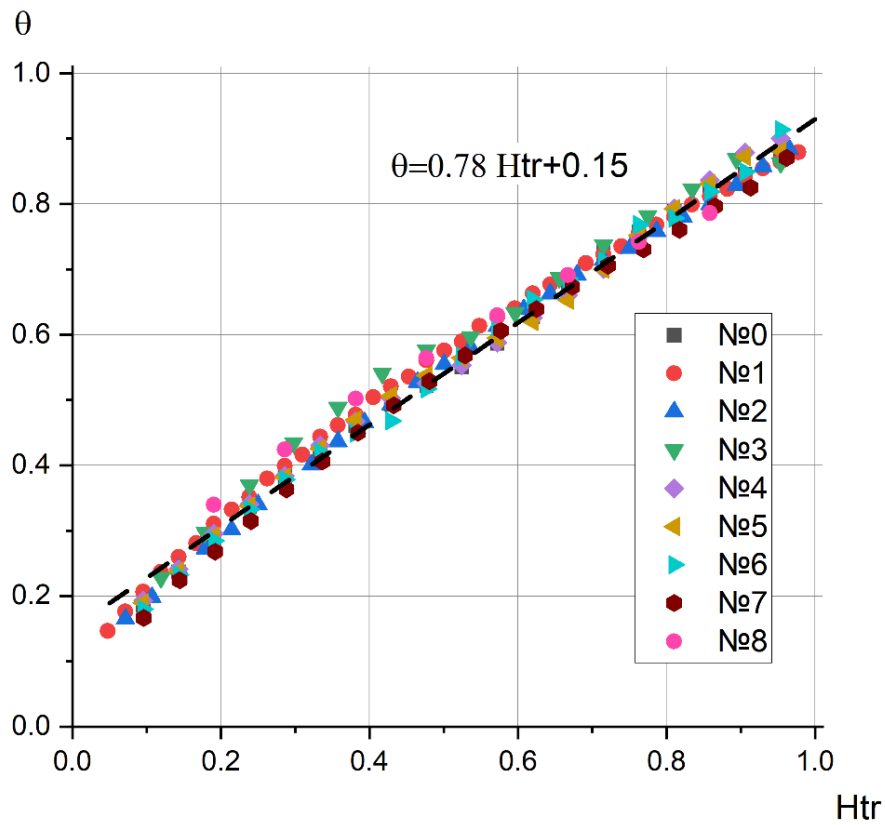
построим графики зависимости данных безразмерных величин от комплексов N_{tr} и M_{tr} .

Безразмерные комплексы N_{tr} , M_{tr} объединяют геометрические параметры зала (x , b), плотность рассадки людей ($\rho_{л}$) и расход системы вентиляции (L). Различные комбинации этих величин, приводящие к одинаковому значению N_{tr} , M_{tr} дают одинаковое распределение θ , χ_{CO_2} , что свидетельствует о подобии процессов.

На рисунках 4.31 – 4.32 приведены результаты нагрева приточного воздуха и роста концентрации углекислого газа вдоль пути распространения приточной струи, полученные в ходе численных исследований и представленные в зависимости от безразмерных комплексов N_{tr} , M_{tr} .

Представленные на графиках режимы отличаются плотностью рассадки людей, расходом и температурой приточного воздуха, длиной и шириной помещения, а также типом низкоскоростного воздухораспределителя. Параметры для представленных на рисунке 4.31 расчетов приведены в таблице 4.8.

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.



Rank 2627 Eqn 1 $y=a+bx$
 $r^2=0.98868951$ DF Adj $r^2=0.98856453$ FitStdErr=0.022215307 Fstat=15909.26
 $a=0.15166225$
 $b=0.78364402$

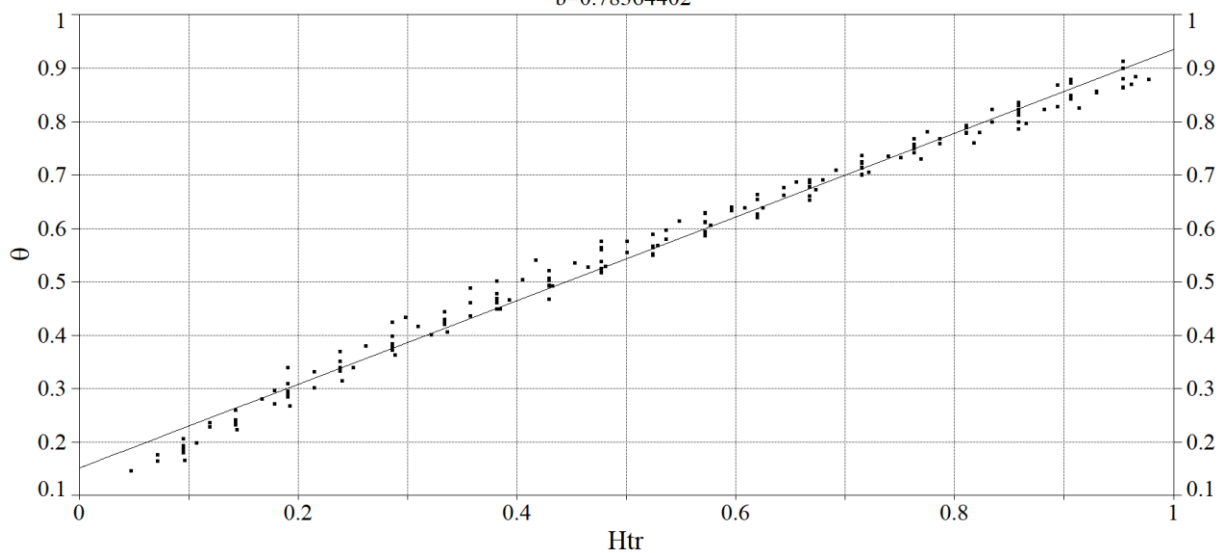


Рисунок 4.31 – Изменение безразмерной температуры от безразмерного комплекса теплопереноса

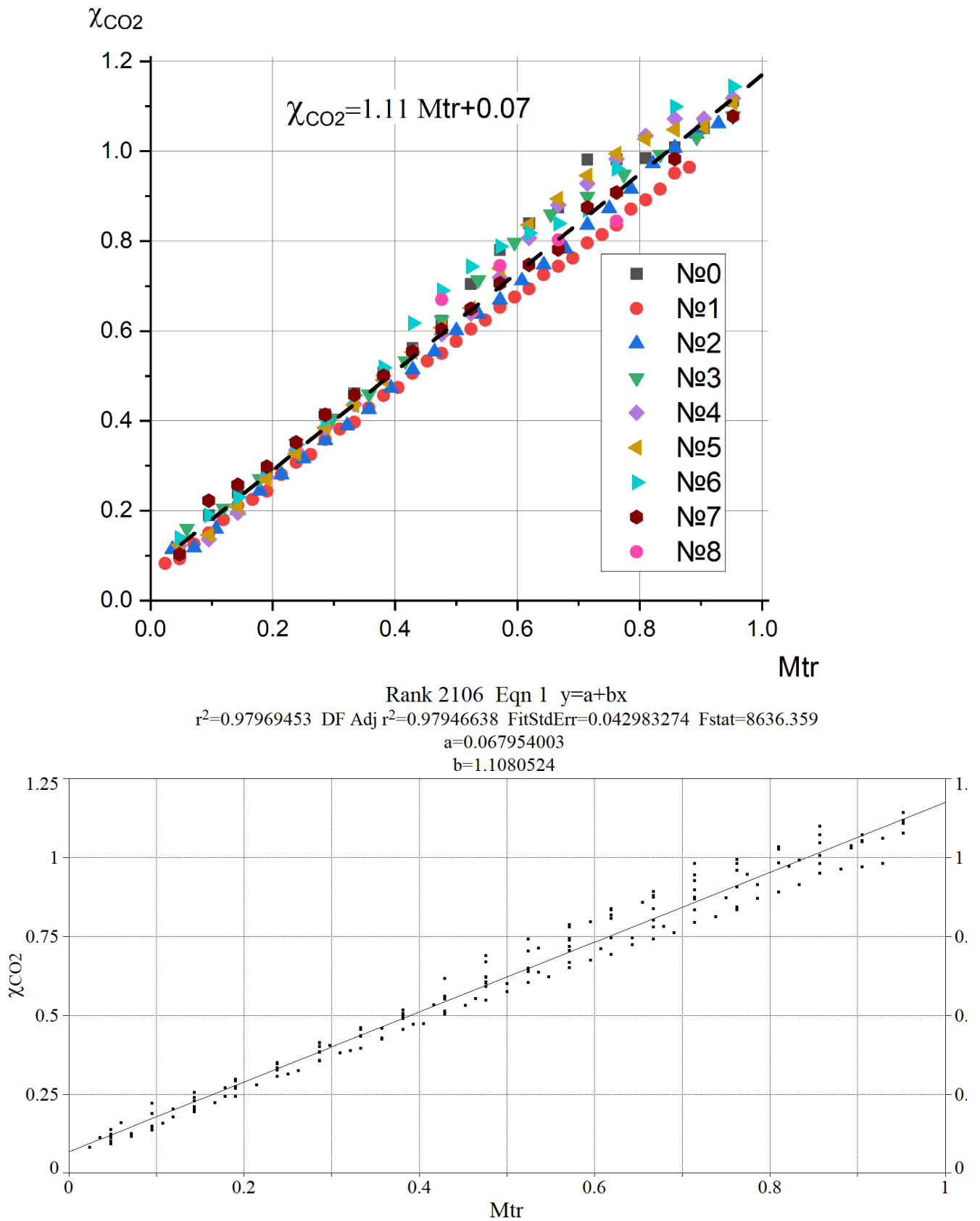


Рисунок 4.32 – Изменение безразмерной концентрации CO₂ от безразмерного комплекса массопереноса

Таблица 4.8 – Исходные данные для численного моделирования

Параметры	Номера вариантов								
	№0	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
Температура приточного воздуха, $t_{пр}$, °C	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	17,3	19
Плотность размещения людей, $\rho_{л}$, 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 , м ³ /ч	3710	3710	3710	3710	3710	3710	3710	2780	3710
Тип водухораспределителей	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

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 CO₂.

Для аппроксимации экспериментальных данных использованы линейные зависимости. Статистические данные обобщающих уравнений $y=a+bx$ представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Статистические данные обобщающих уравнений $y=a+bx$

y	x	a	b	r^2	F_{stat}
θ	Htr	0,152	0,784	0,99	15909
χ_{CO_2}	Mtr	0,068	1,108	0,98	8636

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

$$\theta = 0,78 \cdot Htr + 0.15 \quad (4.11)$$

$$\chi_{CO_2} = 1,1 \cdot Mtr + 0.07 \quad (4.12)$$

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.

4.8. Методика расчета воздухораспределения при термопоршневом режиме вытесняющей вентиляции

Далее приведена 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 ВР. В частном случае модулем может быть все помещение.

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

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

3. Рассчитывается удельный на ширину помещения расход приточного воздуха L/b

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

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

5.1. 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;

$\dot{M}_{CO_2}$ – выделения CO_2 от одного человека, г/ч;

a' – часть длины модуля, занятая людьми, м;

ρ – плотность воздуха кг/м³;

L – суммарный расход воздуха м³/ч

Рассчитывается значение безразмерного комплекса теплопереноса:

$$\text{Htr}(a') = \frac{3,6 \cdot q_{\text{л}} \cdot a' \cdot \rho_{\text{л}} \cdot b}{\rho (t_{0.3.} - t_0) \cdot L} \quad (4.13)$$

5.2. Рассчитывается величина безразмерной температуры в последнем ряду:

$$\theta(a) = 0,78 \cdot \text{Htr}(a') + 0.15 \quad (4.14)$$

5.3. Рассчитывается величина температуры в обслуживаемой зоне последнего ряда:

$$t(a) = \theta(a') \cdot (t_{0.3.} - t_0) + t_0 \quad (4.15)$$

5.4. Рассчитывается значение безразмерного комплекса массопереноса:

$$\text{Mtr}(a') = \frac{\dot{M}_{CO_2} \cdot a' \cdot \rho_{\text{л}} \cdot b}{\rho \cdot (C_{0.3.} - C_0) \cdot 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot L} \quad (4.16)$$

5.5. Рассчитывается величина безразмерной концентрации CO_2 в последнем ряду:

$$\chi_{\text{CO}_2}(a') = 1,1 \cdot \text{Mtr}(a') + 0,07 \quad (4.17)$$

5.6. Рассчитывается величина концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне последнего ряда, ppm:

$$C(a') = \chi_{\text{CO}_2}(a') \cdot (C_{0.3} - C_0) + C_0 \quad (4.18)$$

Полученные значения $t(a')$, $C(a')$ сравниваются с нормативными. В случае, если рассчитанные значения оказываются выше нормируемых, то необходимо переопределить величины исходных данных, уменьшив количество рядов. Для новых значений выполнить пункты 5.1-5.6. Повторять до достижения требований к нормируемым параметрам.

Пример расчета

Рассмотрим применение методики на примере концертного зала с боковой способом подачи через низкоскоростной воздухораспределитель.

Исходные данные:

Габариты помещения: ширина зала – 17,5м; длина зала – 20,5м;

Общее количество людей: 353 человека;

$\rho_{\text{л}}$ – плотность людей – 1,943 чел/м²;

$q_{\text{л}}$ – явные тепловыделения от одного человека – 80 Вт/чел;

t_0 – температура приточного воздуха – 19°C;

$t_{0.3}$ – нормируемая температура в обслуживаемой зоне – 24°C;

$\dot{M}_{\text{CO}_2}$ – выделения CO_2 от одного человека – 26,0064 кг/ч;

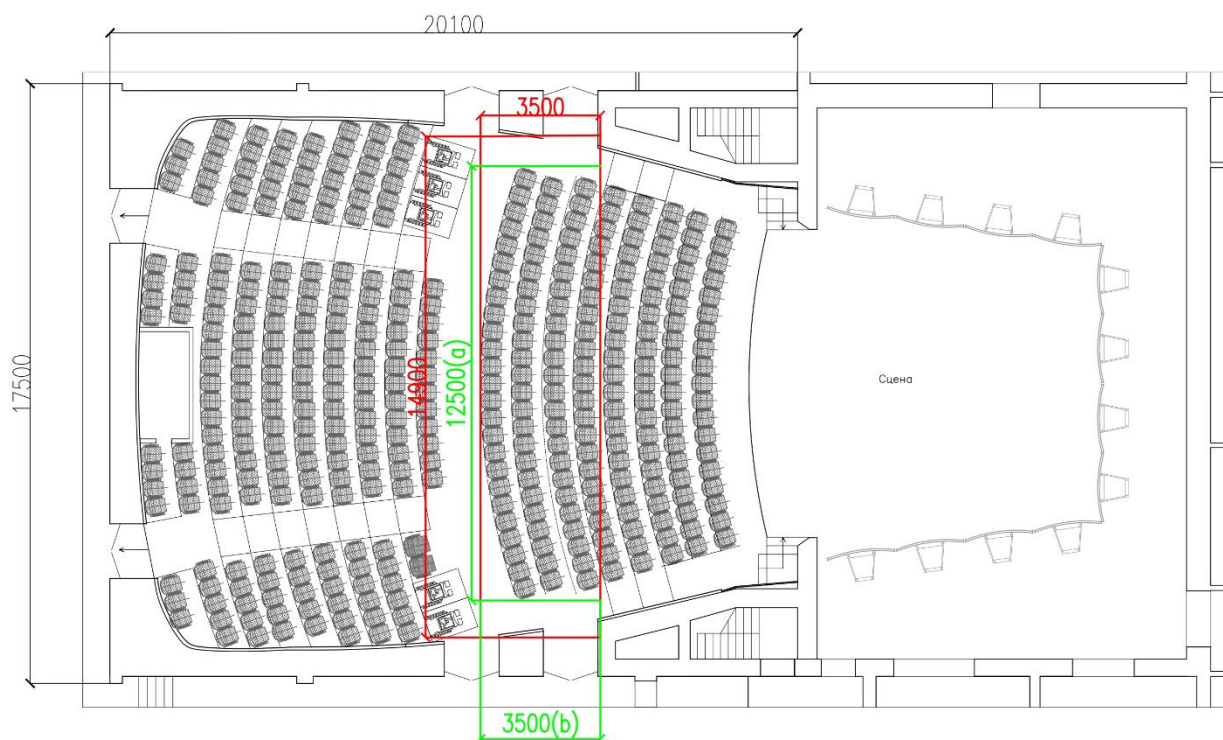


Рисунок 4.33 – План зрительного зала.

1. Проверим возможно обеспечение все длины зала за счет одного воздухораспределителя, для этого определяем расчетный модуль $S_{o.z.}$ с длиной и шириной равной $a = 12,5$ м; $b = 3,5$ м. В данном модуле определяем количество людей – 85 человек.

2. Определяется расход воздуха на один воздухораспределитель L_0 , м³/ч, в данном примере расчет ведется с требуемой подачей воздуха на 1 человека $L_{чел.} = 30$ м³/ч, суммарный расход воздуха составляет $L_0 = 2550$ м³/ч.

3. Подбирается воздухораспределитель так, чтобы при входе в рабочую зону скорость воздух не превышала нормируемые значения.

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

5. Выполняется проверка соотношения расхода воздуха к ширине модуля, $L/b = 728$, что удовлетворяет условиям методики.

По формуле (4.13) рассчитывается значение безразмерного комплекса теплопереноса

$$\text{Htr}(a) = \frac{3,6 \cdot 80 \cdot 12,5 \cdot 1,943 \cdot 3,5}{1,255 \cdot (24 - 19) \cdot 2550} = 1,529$$

По формуле (4.14) рассчитывается величина безразмерной температуры в последнем ряду

$$\theta(a) = 0,78 \cdot 1,529 + 0,15 = 1,343$$

По формуле (4.15) величина температуры в обслуживаемой зоне последнего ряда, °C:

$$t(a) = 1,343 \cdot (23 - 19) + 19 = 25,71 \text{ °C}$$

При данных условиях величина температуры в обслуживаемой зоне превышает нормируемую температуру, следовательно, необходимо увеличить подаваемый расход на одного человека.

Рассмотрим вариант перерасчета с новыми исходными данными, где расход воздуха на 1 человека $L_{\text{чел.}} = 45 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход на один воздухораспределитель составляет $L_0 = 3825 \text{ м}^3/\text{ч}$; удельный расход на ширину помещения $L/b = 1092$;

$$\text{Htr}(a) = \frac{3,6 \cdot 80 \cdot 12,5 \cdot 1,943 \cdot 3,5}{1,255 \cdot (24 - 19) \cdot 3825} = 1,019$$

$$\theta(a) = 0,78 \cdot 1,019 + 0,15 = 0,945$$

$$t(a) = 0,945 \cdot (24 - 19) + 19 = 23,72 \text{ °C}$$

По формуле (4.16) рассчитывается значение безразмерного комплекса массопереноса при $L_{\text{чел.}} = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$.

$$\text{Mtr}(a') = \frac{26,0064 \cdot 12,5 \cdot 1,943 \cdot 3,5}{1,255 \cdot (400 - 0) \cdot 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot 2550} = 1,128$$

По формуле (4.7) рассчитывается величина безразмерной концентрации CO_2 в последнем ряду

$$\chi_{\text{CO}_2}(a') = 1,1 \cdot 1,128 + 0,07 = 1,311$$

По формуле (4.8) рассчитывается величина концентрации CO_2 в обслуживаемой зоне последнего ряда, ppm:

$$C(a') = 1,311 \cdot (400 - 0) + 0 = 524,61$$

Перерасчет, где расход воздуха на 1 человека $L_{\text{чел.}} = 45 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход на один воздухораспределитель составляет $L_0 = 3825 \text{ м}^3/\text{ч}$

$$\text{Mtr}(a') = \frac{26,0064 \cdot 12,5 \cdot 1,943 \cdot 3,5}{1,255 \cdot (400 - 0) \cdot 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot 3825} = 0,752$$

$$\chi_{\text{CO}_2}(a') = 1,1 \cdot 0,752 + 0,07 = 0,897$$

$$C(a') = 0,897 \cdot (400 - 0) + 0 = 359,07$$

4.9. Выводы по четвертой главе

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

2. 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.

3. 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.

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

$$\theta = 0,78 \cdot \text{Htr} + 0,15, \chi_{\text{CO}_2} = 1,1 \cdot \text{Mtr} + 0,07.$$

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

5. Разработана инженерная методика расчёта воздухораспределения при термодвигательном режиме вытесняющей вентиляции, позволяющая на стадии проектирования определять температуру и концентрацию CO_2 для каждого ряда, при необходимости корректировать расход воздуха для обеспечения нормируемых параметров.

Заключение

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности системы воздухораспределения вытесняющей вентиляции в общественных зданиях при рассадке людей рядами. На основе комплекса экспериментальных (лабораторные и натурные испытания) и численных исследований с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) получены следующие основные результаты и 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 термопоршневой ($P_L \geq 0,5$). 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 N_{tr} и M_{tr} :

$$\theta = 0,78 \cdot N_{tr} + 0.15; \chi_{\text{CO}_2} = 1,1 \cdot M_{tr} + 0.07.$$

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 расчета 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 проектирования 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.

Список литературы

1. Абрамович, Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – Москва : Физматгиз, 1960. – 715 с.
2. Батурин, В. В. Основы промышленной вентиляции / В. В. Батурин. – 3-е изд., доп. – Москва : Профиздат, 1965. – 608 с.
3. Батурин, В. В. Циркуляция воздуха в помещении в зависимости от расположения приточных и вытяжных отверстий / В. В. Батурин, В. В. Ханжонков // Отопление и вентиляция. – 1939. – № 4-5. – С. 29–33.
4. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений : учебное пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев ; М-во образования Рос. Федерации, Балтийский гос. техн. ун-т "Военмех". – Санкт-Петербург : Изд-во БГТУ, 2001. – 108 с.
5. Внутренние санитарно-технические устройства : в 3 ч. / Б. В. Баркалов, Н. Н. Павлов, С. С. Амирджанов [и др.] ; под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1992. – Ч. 3, кн. 2 : Вентиляция и кондиционирование воздуха. – 416 с. – (Справочник проектировщика). – ISBN 5-274-01155-1.
6. Воздухораспределение в помещениях: классификация систем / пер. с ит. С. Н. Булекова // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2009. – № 3. – С. 46–61.
7. Воздухораспределители компании "Арктос" : указания по расчёту и практическому применению. – 5-е изд. – [Б. м. : б. и.], 2008. – 215 с. – EDN QNNTHL.
8. Воздухораспределители низкоскоростные круглой формы 1ВНК, 1ВНП, 1ВНУ : Каталог АРКТОС. – Текст : электронный // Arktoscomfort.ru : [сайт]. – URL: <https://arktoscomfort.ru/catalog/arktos-cf-cat-air-vozduhoraspredeliteli/nizkoskorostnye-vozduhoraspredelit/cilindricheskie-1vnk-1vnp-1vnu/> (дата обращения: 27.09.2026).
9. Волков, А. А. Особенности распределения воздуха в системах вентиляции зрительных залов / А. А. Волков, И. С. Марголина, А. А. Бородкин // АВОК:

Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2010. – № 2. – С. 54–60. – EDN NUQAUP.

10. Ганес, И. Л. Математическое планирование экспериментального исследования способов воздухообмена в промышленных зданиях / И. Л. Ганес, О. Н. Груздев, И. Л. Лещинская // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации института – Мирового центра данных. – 1976. – Вып. 42. – С. 20–28.

11. ГОСТ 12.3.018–79. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний = Occupational safety standards system. Ventilation systems. Aerodynamic test methods : Государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 05 сентября 1979 г. № 3341 : дата введения 1981-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 11 с.

12. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях = Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 июля 2012 г. № 191-ст. : взамен ГОСТ 30494–96 : дата введения 2013-01-01 / разработан ОАО «СантехНИИпроект», ОАО «ЦНИИПромзданий» ; внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 «Строительство». – Москва : Стандартиформ, 2013. – 15 с.

13. ГОСТ 32549-2013 (EN 12239:2001). Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Аэродинамические испытания и оценка применения для вытесняющей вентиляции = Ventilation for buildings. Air terminal devices. Aerodynamic testing and rating for displacement flow applications : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 марта 2014 г. № 207-ст. : введен впервые : дата введения 2015-01-01 / подготовлен Техническим комитетом по стандартизации Российской Федерации

ТК 061 "Вентиляция и кондиционирование", ООО "Арктос", Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении" (ВНИИНМАШ). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

14. ГОСТ Р ЕН 12238-2012. Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Аэродинамические испытания и оценка применения для перемешивающей вентиляции = Ventilation for buildings. Air terminal devices. Aerodynamic testing and rating for mixed flow application : национальный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 ноября 2012 г. № 1100-ст. : введен впервые : дата введения 2014-01-01 / подготовлен ООО «Арктос» ; внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 061 «Вентиляция и кондиционирование». – Москва : Стандартинформ, 2013. – 45 с.

15. Гримитлин, М. И. Основы распределения приточного воздуха в вентилируемых помещениях : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : дис. ... д-ра техн. наук / Гримитлин Михаил Иосифович ; Ленингр. высш. воен.-инженерное строительное училище им. генерала армии А. Н. Комаровского. – Ленинград, 1973. – 383 с.

16. Гримитлин, М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – 3-е изд., доп. и испр. – Санкт-Петербург : АВОК Северо-Запад, 2004. – 319 с. – (Инженерные системы зданий). – ISBN 5-902146-06-2.

17. Гримитлин, М. И. Состояние и пути повышения эффективности систем вентиляции зданий / М. И. Гримитлин // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 1999. – № 1. – С. 28–32.

18. Дацюк, Т. А. Моделирование тепловлажностного режима при проектировании зданий / Т. А. Дацюк, А. М. Гримитлин // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 3 (38). – С. 117–121. – EDN RBQWML.

19. Денисихина, Д. М. Методология построения математических моделей для задач вентиляции и кондиционирования воздуха / Д. М. Денисихина // Качество

воздушной среды – потребление, здоровье, экономика : VI Международная конференция "Воздух-2010" (Санкт-Петербург, 9-11 июня 2010 г.) : сб тез. / ред. Н. З. Битколов [и др.]. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 54–56.

20. Денисихина, Д. М. Новое здание аэровокзала в Симферополе. Практика современного проектирования / Д. М. Денисихина, М. В. Самолетов, А. В. Храмов // Здания высоких технологий. – 2017. – Т. 2, № 2. – С. 26–33. – EDN YWSEKZ.

21. Денисихина, Д. М. Особенности численного моделирования поведения воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов / Д. М. Денисихина // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 3 (22). – С. 98. – EDN STRJIN.

22. Денисихина, Д. М. Оценка теплового комфорта в помещениях на основе анализа результатов математического моделирования / Д. М. Денисихина // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3 (50). – С. 183–193. – EDN TVVOSB.

23. 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. – EDN DDGXTN.

24. Денисихина, Д. М. Расчет воздухообмена и воздухораспределения в объеме зрительных залов театров / Д. М. Денисихина, В. К. Аверьянов, А. В. Цыганков // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 3. – С. 23–28. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.03.23-28.

25. Денисихина, Д. М. Численное исследование закономерностей распределения CO₂ в общественных зданиях / Д. М. Денисихина // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 5. – С. 368–372. – EDN TROJAG.

26. Денисихина, Д. М. Численное моделирование автоколебательных вентиляционных течений : специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Денисихина Дарья Михайловна. – Санкт-Петербург, 2005. – 135 с.

27. Денисихина, Д. М. Численное моделирование неизотермических турбулентных течений в помещениях плавательных бассейнов / Д. М. Денисихина // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 3 (44). – С. 189–194. – EDN SJISUV.
28. Дударев, А. А. Микроклиматический комфорт и воздухораспределение: несколько шагов навстречу / А. А. Дударев, А. Г. Сотников // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. – 2013. – № 1. – С. 16–23.
29. Еремкин, А. И. Локальные системы технологического кондиционирования воздуха производственных помещений текстильных предприятий на основе вытесняющей вентиляции : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : дис. ... д-ра техн. наук / Ерёмкин Александр Иванович. – Пенза, 2006. – 537 с.
30. Зайцев, О. Н. Совершенствование системы водяного капиллярного отопления / А. В. Короянов, О. Н. Зайцев, А. П. Бурцев, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 24-36. – DOI 10.21869/2223-1560-2025-29-2-24-36. – EDN HBGNVN.
31. Зайцев, О. Н. Моделирование тепломассообменных процессов вентиляции крытых ледовых катков / О. Н. Зайцев, С. В. Чуйкин, В. В. Волков, А. С. Чесноков // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – № 2(72). – С. 21-34. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/72.2. – EDN AONPKB.
32. Зельдович, Я. Б. Предельные законы свободно восходящих конвективных потоков / Я. Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1937. – Т. 7. – С. 1463–1465.
33. Зиганшин, А. М. Повышение энергоэффективности систем вентиляции посредством профилирования фасонных элементов / А. М. Зиганшин, К. Э. Батрова, Г. А. Гимадиева [и др.] // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 15(67). – С. 111-123. – EDN IFIGJ.
34. Зиганшин, А. М. Тестирование моделей свободной и пристеночной турбулентности при численном решении задачи о конвекции у вертикальной

нагретой стенки / А. М. Зиганшин, В. Н. Посохин, С. В. Романов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 4(640). – С. 71-79. – EDN PASPID.

35. Инженерная система крупных зрелищных объектов: Оперный сезон / пер. с ит. С. Н. Булекова // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2001. – № 2. – С. 28–29.

36. Кокорин, О. Я. Пути реконструкции систем вентиляции и кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин // Техническая промышленность. – 2001. – № 1. – С. 35–37.

37. Кокорин, О. Я. Энергосберегающие технологии функционирования систем вентиляции, кондиционирования воздуха (систем ВОК) / О. Я. Кокорин. – Москва : Проспект, 1999. – 205 с. – ISBN 5-8369-0041-8.

38. Колосницын, А. Н. Использование программы STAR-CCM+ при проектировании систем вентиляции : учебное пособие / А. Н. Колосницын, Д. М. Денисихина ; Санкт-Петербургский гос. архитектурно-строит. ун-т. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГАСУ, 2016. – 100 с.

39. Кондрашов, С. Ю. Общий подход к проектированию систем кондиционирования воздуха исторических зданий на примере корпуса Бенуа Государственного Русского Музея / С. Ю. Кондрашов, Л. А. Фиршт, Д. А. Сотников // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2001. – № 1. – С. 68–72.

40. Копылов, К. А. Влияние расположения источников теплогазовыделений на эффективность вытесняющей вентиляции / К. А. Копылов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2026. – № 6 (810). – С. 74–84. – DOI 10.32683/0536-1052-2026-810-6-74-84.

41. Копылов, К. А. Численное исследование истечения низкоскоростного воздушораспределителя / К. А. Копылов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 1. – С. 176–179. – EDN FBMWET.

42. 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. – DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-3-130-141.

43. Кочарьянц, К. В. Совершенствование методов расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : дис. ... канд. техн. наук / Кочарьянц Кристина Владимировна. – Санкт-Петербург, 2018. – 168 с. – Место защиты: Санкт-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т.

44. Кудрявцев, Е. В. Моделирование вентиляционных систем / Е. В. Кудрявцев. – Москва ; Ленинград : Стройиздат, 1950. – 192 с.

45. Кузнецов, И. С. Моделирование полей концентраций вредных веществ и обоснование воздухообмена в производственных помещениях : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : дис. ... канд. техн. наук / Кузнецов Илья Сергеевич. – Воронеж, 2007. – 125 с. – Место защиты: Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-т.

46. Кузнецов, С. Н. Математическое моделирование вентиляции в помещении с гальваническими ваннами / С. Н. Кузнецов, А. И. Колосов, Г. А. Кузнецова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2017. – № 1. – С. 111–117. – EDN YRUWAV.

47. Ливчак, А. В. Вытесняющая вентиляция в школах / А. В. Ливчак // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2004. – № 8. – С. 14–21.

48. Макаричев, Ю. А. Методы планирования эксперимента и обработки данных : учебное пособие / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников. – Самара : Изд-во Самарского гос. техн. ун-та, 2016. – 131 с.

49. Миллер, Ю. В. Методики определения минимального воздухообмена: традиционные и новые подходы / Ю. В. Миллер // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2019. – № 2. – С. 10–19. – EDN ZAGGDR.

50. Моделирование процессов вентиляции / Т. А. Дацюк, А. В. Сауц, Б. Н. Юрманов, В. Р. Таурит // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 78. – EDN PKWSUJ.
51. О применении моделей турбулентности при численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена / В. Ф. Васильев, В. М. Уляшева, М. А. Канев, Г. А. Рябев // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2016. – № 12 (180). – С. 66–69. – EDN ZEPSKH.
52. Отопление и вентиляция производственных помещений / М. И. Гримитлин, Т. А. Дацюк, Г. Я. Крупкин [и др.]. – Санкт-Петербург : АВОК Северо-Запад, 2007. – 399 с. – (Инженерные системы зданий). – ISBN 5-902146-19-4.
53. Позин, Г. М. Расчет воздухообмена и воздухораспределения на ЭВМ / Г. М. Позин // Межотраслевые вопросы безопасности труда : сб. науч. работ ин-тов охраны труда ВЦСПС / Всесоюзный ЦНИИ охраны труда ; [гл. ред. Е. Д. Чистов]. – Москва : Профиздат, 1984. – С. 13–18.
54. Рекомендации по выбору и расчету систем воздухораспределения : Аз-669 / Гос. проект. ин-т "Сантехпроект". – Москва : Изд-во ГПИ «Сантехпроект», 1979. – 68 с.
55. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 : дата введения 2021-03-01. – Москва, 2021. – 990 с.
56. Системы вытесняющей вентиляции для промышленных зданий. Типы, область применения, принципы проектирования / А. М. Живов, Р. V. Nielsen, G. Riskowski, Е. О. Шилькрот // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2001. – № 5. – С. 36–47.
57. Смирнов, Е. М. Конспект лекций дисциплины «Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений» : Направление подготовки магистров: 010600 "Прикладные математика и физика" / Е. М. Смирнов, А. В. Гарбарук ; Санкт-Петербургский государственный политехнический

университет, Физико-механический факультет, Кафедра гидроаэродинамики. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петерб. гос. политехн. ун-та, 2010. – 127 с.

58. Сорокин, Н. С. Вентиляция, увлажнение и отопление на текстильных фабриках : учебник для текстильных институтов / Н. С. Сорокин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Гизлегпром, 1953. – 356 с.

59. Сотников, А. Г. Теоретико-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции / А. Г. Сотников, А. А. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2 (28). – С. 32–38. – EDN OWKIPZ.

60. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003 : актуализированная редакция : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. № 921/пр : дата введения 2021-07-01 / Минстрой России. — Москва : ФАУ «ФЦС», 2020. — 132 с.

61. Сулин А. Б. Энергоэффективное регулирование расхода наружного воздуха в системах вентиляции / А. Б. Сулин, А. А. Никитин, Т. В. Рябова [и др.] // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 18-24. – DOI 10.25206/2588-0373-2021-5-2-18-24. – EDN HUBSBE.

62. Таурит, В. Р. Обеспечение высокого качества воздуха и комфорта в зоне массового пребывания людей в помещении при нетрадиционной вытесняющей вентиляции / В. Р. Таурит, Н. А. Кораблева // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 3 (50). – С. 211–218. – EDN TZHMRT.

63. Таурит, В. Р. Численное исследование соответствия концентрации CO₂ в зоне пребывания людей природному воздуху при оборудовании помещения вытесняющей вентиляцией нового поколения / В. Р. Таурит, Н. А. Кораблева // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2 (55). – С. 158–162. – EDN WEZJTP.

64. Тимофеева, Е. И. Экологический мониторинг параметров микроклимата / Е. И. Тимофеева, Г. В. Федорович. – Москва : НТМ-Защита, 2005. – 212 с.

65. Уляшева, В. М. Численное моделирование вентиляционных процессов в сварочном цехе / В. М. Уляшева, С. М. Анисимов, А. Н. Шамколович // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 3 (74). – С. 118–124. – DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-3-118-124.
66. Федорович, Г. В. Параметры микроклимата, обеспечивающие комфортные условия труда / Г. В. Федорович // Безопасность и охрана труда. – 2010. – № 1. – С. 75–79.
67. Шепелев, И. А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И. А. Шепелев. – Москва : Стройиздат, 1978. – 145 с.
68. Шилькрот, Е. О. Вытесняющая вентиляция в непроизводственных зданиях / Е. О. Шилькрот // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2003. – № 1. – С. 22–29.
69. Эльтерман, В. М. Вентиляция химических производств / В. М. Эльтерман. – 3-е изд., перераб. – Москва : Химия, 1980. – 284 с.
70. 2011 ASHRAE Handbook: Heating, ventilating, and air-conditioning applications / American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. – Atlanta : ASHRAE, 2011. – 1108 p. – ISBN 1936504081.
71. 2013 ASHRAE Handbook: Fundamentals (SI Edition) / American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. – Atlanta : ASHRAE, 2013. – 1000 p. – ISBN 1936504464.
72. An improved wall-mounted displacement ventilation system in a large-span machining workshop / F. Liu, T. Zhang, L. Yang, Z. Long // Building Simulation. – 2022. – Vol. 15, № 11. – P. 1943–1953. – DOI 10.1007/s12273-022-0906-z.
73. ANSYS CFX-Pre User's Guide. Release 15.0. – Canonsburg, PA, 2013. – 788 p.
74. Batchelor, G. K. Heat convection and buoyancy effects in fluids / G. K. Batchelor // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1954. – Vol. 80. – P. 339–358. – DOI 10.1002/qj.49708034504.

75. Briganti, A. Качество воздуха и вентиляции / A. Briganti ; пер. с ит. С. Н. Булекова // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2000. – № 4. – С. 20–27.
76. Brohus, H. Personal exposure in displacement ventilated rooms / H. Brohus, P. V. Nielsen // Indoor Air. – 2004. – Vol. 6, № 3. – P. 157–167. – DOI 10.1111/j.1600-0668.1996.t01-1-00003.x.
77. Brohus, H. The Kappa Model – a simple model for the approximate determination of vertical temperature distribution in rooms / H. Brohus, H. Ryberg ; Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University. – Aalborg, 1999.
78. Burkett J. Virus Transmission Modes and Mitigation Strategies, Part 1: Defining Viruses and Droplet Release // ASHRAE Journal. — 2021. — Vol. 63, No. 3. — P. 24–33.
79. Calosi, B. За и против распределения воздуха от пола / B. Calosi ; пер. с ит. С. Н. Булекова // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2001. – № 4. – С. 18–24.
80. Carvalho, M. G. Predicting radiative heat transfer in absorbing, emitting, and scattering media using the discrete transfer method / M. G. Carvalho, T. Farias, P. Fontes // ASME HTD. Fundamentals of Radiation Heat Transfer. – 1991. – Vol. 160. – P. 17–26.
81. CFD analysis of the human exhalation flow using different boundary conditions and ventilation strategies / J. M. Villafruela, I. Olmedo, M. R. de Adana [et al.] // Building and Environment. – 2013. – Vol. 62. – P. 191–200. – DOI 10.1016/j.buildenv.2013.01.022.
82. Comparison of traditional mixing and displacement air conditioning and ventilating systems for US commercial buildings / O. A. Seppanen, W. J. Fisk, J. Eto, D. T. Grimsrud // ASHRAE Transactions. – 1998. – Vol. 25, № 2. – P. 473–484.
83. Design guide for displacement ventilation / A. M. Zhivov, G. L. Riskowski, T. W. Ruprecht [et al.]. – Savoy : Nova Science, 1997. – 145 p.
84. Displacement ventilation in non-industrial premises / H. Skistad, E. Mundt, P. V. Nielsen [et al.]. – [S. l.] : REHVA, 2002. – 154 p.

85. Displacement ventilation to avoid COVID-19 transmission through offices / O. Osman, M. Madi, E. L. Ntantis, K. Y. Kabalan // *Computational Particle Mechanics*. – 2022. – Vol. 10, № 3. – P. 355–368. – DOI 10.1007/s40571-022-00492-8.
86. Experimental study of a non-isothermal wall jet issued by a displacement ventilation system / I. Fatemi, B.-C. Wang, M. Koupriyanov, B. Trully // *Building and Environment*. – 2013. – Vol. 66. – P. 131–140. – DOI 10.1016/j.buildenv.2013.04.019.
87. Gezielte belüftung der Arbeitsbereiche in produktionshallen zum Abbau der Schadstoffbelastung : Forschungsbericht HLK-1-92 / H. Bach, K. Becher, B. Biegert [et al.]. – 2 auflage. – Stuttgart : Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung, 1993. – 63 s. – ISSN 0943-013X.
88. Hasan, R. K. Occupants-centred Digital Twin model for enhancing indoor environmental quality / R. K. Hasan, M. Marzouk // *Digital Twin*. – 2026, Article 2712001. – Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/27525783.2026.2712001#abstract> (accessed: 26.09.2026).
89. Holman, J. P. Heat transfer / J. P. Holman. – 8th ed. – New York ; New Delhi : McGraw-Hill, 2001. – 702 p. – ISBN 0070495475.
90. Hoof, J. Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? / J. Hoof // *Indoor Air*. – 2008. – Vol. 18, № 3. – P. 182–201. – DOI 10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x.
91. Ilin, E. A. Clean-room class D air distributor performance evaluation: case study of RTC Polisan / E. A. Ilin, A. M. Grititlin // *Proceedings of ECSF 2021 : Engineering, construction, and infrastructure solutions for innovative medicine facilities* (Saint-Petersburg, May 19-21, 2021) / eds: D. Ivanov, A. Paninr, I. Sukhanova. – Saint-Petersburg : Springer International Publishing, 2021. – P. 111–122. – DOI 10.1007/978-3-030-99877-6_13.
92. Krantz-TKT GmbH. Air distribution systems. Application in displacement ventilation systems // *Ventilation '94 : Proceedings of the 4th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control* (Stockholm, September 5-9, 1994) / ed. A. Jansson. – Stockholm, 1994. – Part 2. – P. 121–128.

93. Kristensson, J. A. Economic aspects of local air supply in displacement ventilation systems / J. A. Kristensson // Ventilation '94 : Proceedings of the 4th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control (Stockholm, September 5-9, 1994) / ed. A. Jansson. – Stockholm, 1994. – Part 2. – P. 477–484.

94. Kvisgaard, B. Low-impulse ceiling air distributors for displacement ventilation systems / B. Kvisgaard, G. S. Madsen // ROOMVENT '92: Proceedings of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms (Aalborg, Denmark, September 2-4, 1992). – Lyngby : DANVAK, 1992. – Vol. 3. – P. 111–118.

95. La Heij, L. Personalized displacement ventilation as an energy-efficient solution for airborne disease transmission control in offices / L. La Heij, S. Gkantonas, E. Mastorakos // Frontiers. – 2023. – Vol. 9, Article 1148276. – DOI 10.3389/fmech.2023.1148276.

96. Launder, B. E. The numerical computation of turbulent flows / B. E. Launder, D. B. Spalding // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – Vol. 3, № 2. – P. 269–289. – DOI 10.1016/0045-7825(74)90029-2.

97. Liescheidt, S. Displacement ventilation systems / S. Liescheidt ; CED Engineering. – 30 p. – Available at: <https://app.mail.ru/disk/attaches/17904480521963139638%3B0%3B2?folder-id=0&cvq=f&source=mail-superapp&theme=light> (accessed: 21.03.2026).

98. Lindab Air Theory. Airborne solutions // Lindab Group. – 2021. – 16 p. – Available at: https://stlpimeuscprod.z1.web.core.windows.net/assets/ZjIwMjIzZWYtOTM1Zi00MTQzLTgyN2ItZTBIMjQxMWZiZTQ0/5249752929700774476/Theory_Air_MASTER.pdf (accessed: 16.06.2025).

99. Lund, T. S. Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations / T. S. Lund, X. Wu, K. D. Squires // Journal of Computational Physics. – 1998. – Vol. 140, № 2. – P. 233–258. – DOI 10.1006/jcph.1998.5882.

100. Magnier, L. Experimental assessment of the velocity and temperature distribution in an indoor displacement ventilation jet / L. Magnier, R. Zmeureanu, D.

Derome // Building and Environment. – 2012. – Vol. 47, № 1. – P. 150–160. – DOI 10.1016/j.buildenv.2011.07.029.

101. Mathey, F. Aerodynamic noise simulation of the flow past an airfoil trailing edge using a hybrid zonal RANS-LES / F. Mathey // Computers & Fluids. – 2008. – Vol. 37, № 7. – P. 836–843. – DOI 10.1016/j.compfluid.2007.04.008.

102. Menter, F. R. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows / F. R. Menter // AIAA Paper. – 1993. – № 2906. – DOI 10.2514/6.1993-2906.

103. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden // Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz. – 2008. – Vol. 51, № 11. – S. 1358–1369. – DOI 10.1007/s00103-008-0707-2.

104. Morton, B. R. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources / B. R. Morton, G. Taylor, J. S. Turner // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1956. – Vol. 234, № 1196. – P. 1–23.

105. Mundt, E. Contamination distribution in displacement ventilation – influence of disturbances / E. Mundt // Building and Environment. – 1994. – Vol. 29, № 3. – P. 311–317. – DOI 10.1016/0360-1323(94)90028-0.

106. Mundt, E. Convection flows in rooms with a temperature gradient. Theory and measurements / E. Mundt // ROOMVENT '92: Proceedings of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms (Aalborg, Denmark, September 2-4, 1992). – Lyngby : DANVAK, 1992. – Vol. 3. – P. 69–86.

107. Mundt, E. The performance of displacement ventilation systems: Experimental and theoretical studies : PhD thesis / E. Mundt // Building Services Engineering. Bulletin. – 1996. – № 38. – 155 p.

108. Nielsen, P. V. Temperature distribution in a displacement ventilated room / P. V. Nielsen // ROOMVENT '96: Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms (Yokohama, Japan, July 17-19, 1996) / ed. S. Murakami. – Yokohama, 1996. – Vol. 3. – P. 323–330.

109. Nielsen, P. V. Velocity distribution in a room with displacement ventilation and low-level diffusers : International report / P. V. Nielsen. – Aalborg : Aalborg University, 1994. – 25 p. – (IEA Annex 20 ; № 19).

110. Nielsen, P. V. Velocity distribution in the flow from a wall-mounted diffuser in rooms with displacement ventilation / P. V. Nielsen // ROOMVENT '92: Proceedings of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms (Aalborg, Denmark, September 2-4, 1992). – Lyngby : DANVAK, 1992. – Vol. 3. – P. 1–20.

111. Ole Fanger, P. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: в поисках совершенства / P. Ole Fanger ; пер. с англ. Б. Рубинштейна // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2000. – № 2. – С. 14–21.

112. Persily, A. Carbon dioxide generation rates from building occupants / A. Persily, L. de Jonge // Indoor Air. – 2017. – Vol. 27, Suppl. 1. – P. 868–879. – DOI 10.1111/ina.12383.

113. Raithby, G. D. A finite-volume method for predicting a radiant heat transfer in enclosures with participating media / G. D. Raithby, E. H. Chui // Journal of Heat Transfer. – 1990. – Vol. 112, № 2. – P. 415–423. – DOI 10.1115/1.2910394.

114. Schmidt, W. Турбулентное распространение потока нагретого воздуха / W. Schmidt // ZAMM. – 1941. – № 21 (5). – С. 265–278.

115. Shilkrot, E. O. Zonal model for displacement ventilation design / E. O. Shilkrot, A. M. Zhivov // ROOMVENT '96: Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms (Yokohama, Japan, July 17-19, 1996) / ed. S. Murakami. – Yokohama, 1996. – Vol. 2. – P. 449–458.

116. Siegel, R. Thermal radiation heat transfer / R. Siegel, J. R. Howell. – 3rd ed. – Washington : Hemisphere Publishing Corporation, 1992. – 1072 p. – ISBN 0-89116-271-2.

117. Skistad, H. Displacement ventilation / H. Skistad // ROOMVENT '90 : International Conference on Engineering Aero- and Thermodynamics of Ventilated Rooms (Oslo, Norway, June 13-15, 1990). – Oslo : Norsk VVS, 1990. – P. 71–85.

118. The influence of ventilation measures on the airborne risk of infection in schools: A scoping review / S. N. Jendrossek, L. A. Jurk, K. Remmers [et al.] // International

Journal of Environmental Research and Public Health. – 2023. – Vol. 20, № 4. – Article 3746. – DOI 10.3390/ijerph20043746.

119. The potential of local exhaust combined with mixing and displacement ventilation systems to mitigate COVID-19 transmission risks / W. Zhao, M. F. Ejaz, S. Kilpeläinen [et al.] // Building and Environment. – 2024. – Vol. 266, Article 112076. – DOI 10.1016/j.buildenv.2024.112076.

120. Turner, J. S. Buoyancy effects in fluids / J. S. Turner. – Cambridge : Cambridge University Press, 1973. – 367 p.

121. Ventilation causing an average CO₂ concentration of 1,000 ppm has negative impacts on sleep: A field-lab study on healthy youth / M. Kang, Y. Yan, C. Y. Guo [et al.] // Building and Environment. – 2024. – Vol. 249, Article 111118. – DOI 10.1016/j.buildenv.2023.111118.

122. Vertical distribution of temperature and contaminant concentration in a room with impinging jet ventilation system / M. Matsuzaki, T. Kobayashi, T. Yamanaka [et al.] // From energy crisis to sustainable indoor climate : 40 years of AIVC : selected papers from the 40th AIVC Conference (Ghent, Belgium, October 15-16, 2019) / Department of Architecture and urban planning ; eds.: A. Janssens, M. Kapsalaki, 2021. – P. 10.

123. Webster, T. Системы вентиляции с воздухораспределением в полу. Температурная стратификация / Т. Webster, F. Bauman, J. Reese ; пер. с англ. О. П. Булычевой // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2002. – № 6. – С. 44–51.

124. Wei-xue Cao. The inverse optimization of exhaust hood by using intelligent algorithms and CFD simulation / Wei-xue Cao, Xue-yi You // Powder Technology. – 2017. – Vol. 315. – P. 282–289. – DOI 10.1016/j.powtec.2017.04.019.

125. Wilcox, D. C. A two-equation turbulence model for wall-bounded and free shear flows / D. C. Wilcox // AIAA Paper. – 1993. – № 2905.

126. Wilcox, D. C. Turbulence Modeling for CFD / D. C. Wilcox. – La Canada, California : DCW Industries, Inc., 1998. – 460 p. – ISBN 0-9636051-5-1.

127. Zhivov, A. M. Comparison of heating and cooling energy consumption by HVAC system with mixing and displacement air distribution for a restaurant dining area in

different climates / A. M. Zhivov, A. A. Rymkevich // ASHRAE Transactions. – 1998. – Vol. 104, № 2. – P. 473–484.

Приложение А – Акты внедрения в проектирование

ООО «АРКТОС»
ИНН 7810190521 ОГРН 1037821000469
Россия, 196240, С-Петербург, 6-й Предпортовый проезд, д.4
тел./факс: (812) 324-70-08, (812) 329-53-68
e-mail: arktos@arktos.ru
Сайт: arktoscomfort.ru



ПРОИЗВОДСТВО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ,
ОТОПЛЕНИЯ И
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «Арктос»

А.С.Звездин

«14» мая 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов

кандидатской диссертационной работы Копылова Кирилла Алексеевича

Мы, ниже подписавшиеся, советник генерального директора Шкарпет В.Э., директор по научной работе - начальник научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики Кочарьянц К.В., начальник отдела компьютерного моделирования Тисленко И.Н. составили настоящий акт о том, что научные положения диссертационной работы Копылова К.А. «Повышение эффективности системы воздухораспределения вытесняющей вентиляции общественных зданий» включены в практические рекомендации по расчету воздухораспределения «Указания по расчету и применению воздухораспределителей завода «Арктос». Разработанные Копыловым К.А. методические рекомендации по расчету вытесняющей вентиляции повысят точность инженерных расчетов при проектировании систем вентиляции и кондиционировании воздуха

Председатель комиссии:

Советник генерального директора, к.т.н

Члены комиссии:

Директор по научной работе

- начальник НИЛАА, к.т.н

Начальник отдела

компьютерного моделирования

В.Э.Шкарпет

К.В.Кочарьянц

И.Н.Тисленко

ООО «ММ-Технологии»
190020, Россия, Санкт-Петербург,
Дровяная ул., д. 6/А, пом.18
8 (812) 981-06-92; info@mm-technologies.ru
www.mm-technologies.ru

М ТЕХНОЛОГИИ
М



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ММ-Технологии»

Колосницын А.Н.

«12» мая 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов

кандидатской диссертационной работы

Копылова Кирилла Алексеевича

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что научные положения, результаты и рекомендации диссертационной работы Копылова К.А. «Повышение эффективности системы воздухораспределения вытесняющей вентиляции общественных зданий», были реализованы в рабочем процессе организации ООО «ММ-Технологии» при разработке численных моделей вентиляции и кондиционирования помещений с использованием вытесняющей схемы вентиляции, в т.ч. при создании моделей низкоскоростных воздухораспределительных устройств, а также при разработке рекомендаций к анализируемым проектным решениям.

Так, были использованы в т.ч. следующие результаты диссертационной работы:

- разработанные математические модели низкоскоростных воздухораспределителей;
- закономерности формирования параметров микроклимата в помещениях системой вытесняющей вентиляции с низкоскоростными воздухораспределителями;

Использование данных диссертационной работы позволило повысить качество получаемых результатов моделирования вентиляционных процессов, связанных с работой вытесняющей системы вентиляции в общественных зданиях.

Исполнительный директор

 / Самолетов М.В.

Инженер-проектировщик

 / Воробьев В.И.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)
 ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

24.06.2026 № 2А-ОД-05

О внедрении научных результатов
 диссертации в образовательный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
 деятельности

С.В. Михайлов

июня 2026 г.

АКТ

о внедрении научных результатов диссертации в образовательный процесс

На основании решения Учебно-методической комиссии факультета инженерной экологии и городского хозяйства (Протокол от 19.06.2026 №9) научные результаты диссертации «Повышение эффективности системы воздухораспределения вытесняющей вентиляции общественных зданий» на соискание ученой степени кандидата технических наук Копылова Кирилла Алексеевича, аспиранта кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, в виде математических моделей низкоскоростных воздухораспределителей для вытесняющей вентиляции; постановки и решения задач нахождения распределения параметров микроклимата при вытесняющей вентиляции - внедрены в образовательный процесс обучающихся по основной профессиональной образовательной программе 08.03.01 Строительство, профиль Теплогазоснабжение и вентиляция; по основной профессиональной образовательной программе 08.04.01 Строительство, профиль Теплогазоснабжение и вентиляция.

Председатель
 учебно-методической комиссии

Секретарь
 учебно-методической комиссии

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

Начальник УНР

Д.В. Ульрих

М.Н. Брюхов

Е.Б. Александрова

М.В. Аверина

Приложение Б – Результаты лабораторных аэродинамических испытаний и математического моделирования

Таблица Б.1 –Параметры скорости лабораторные испытания v , м/с

Z, м	0,2	0,35	0,55	0,65	0,75	0,95	1,15
0,125	0,42	0,19	0,26	0,23	0,19		
0,095	0,56	0,12	0,23	0,22	0,22	0,16	0,15
0,065	0,12	0,13	0,18	0,21	0,24	0,23	0,21
0,045	0,11	0,15	0,16	0,20	0,23	0,25	0,23
0,03	0,12	0,16	0,13	0,19	0,23	0,25	0,24
0,015	0,15	0,15	0,13	0,18	0,23	0,27	0,26

Таблица Б.2 –Параметры скорости полная математическая модель ВР v , м/с

Z, м	0,2	0,35	0,55	0,65	0,75	0,95	1,15
0,125	0,27	0,28	0,17	0,18	0,19		
0,095	0,34	0,19	0,18	0,17	0,19	0,18	0,13
0,065	0,21	0,09	0,16	0,17	0,18	0,20	0,18
0,045	0,06	0,13	0,14	0,16	0,18	0,20	0,20
0,03	0,07	0,16	0,12	0,15	0,18	0,20	0,20
0,015	0,07	0,19	0,10	0,13	0,15	0,17	0,16

Таблица Б.3 –Параметры скорости упрощенная математическая модель ВР (РП) v , м/с

Z, м	0,2	0,35	0,55	0,65	0,75	0,95	1,15
0,125	0,11	0,09	0,21	0,25	0,19	0,14	0,13
0,095	0,12	0,10	0,16	0,23	0,26	0,22	0,19
0,065	0,12	0,10	0,14	0,21	0,26	0,25	0,22
0,045	0,10	0,07	0,13	0,18	0,24	0,26	0,25
0,03	0,10	0,07	0,13	0,18	0,24	0,26	0,25
0,015	0,04	0,05	0,12	0,15	0,20	0,24	0,23

Таблица Б.4 –Параметры скорости упрощенная математическая модель ВР (РП) v , м/с

Z, м	0,2	0,35	0,55	0,65	0,75	0,95	1,15
0,125	0,27	0,36	0,26	0,22	0,18	0,12	0,10
0,095	0,56	0,06	0,20	0,22	0,23	0,20	0,16
0,065	0,37	0,05	0,14	0,20	0,24	0,23	0,20
0,045	0,06	0,08	0,08	0,16	0,23	0,25	0,22
0,03	0,06	0,08	0,08	0,16	0,23	0,25	0,22
0,015	0,10	0,11	0,07	0,13	0,22	0,24	0,22

Приложение В – Результаты математического моделирования

Таблица В.1 – Среднее значения по ряду

Задача №1			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2	19.44	0.44	47.38
3.15	19.66	0.66	26.53
4.3	19.79	0.79	29.79
5.45	19.95	0.95	40.40
6.6	20.12	1.12	48.34
7.75	20.28	1.28	57.70
8.9	20.40	1.40	67.88
10.05	20.52	1.52	72.22
11.2	20.68	1.68	78.35
12.35	20.80	1.80	90.29
13.5	20.90	1.90	98.93
14.65	21.05	2.05	104.56
15.8	21.16	2.16	115.20
16.95	21.25	2.25	122.75
18.1	21.40	2.40	127.54
19.25	21.49	2.49	138.11
20.4	21.58	2.58	146.83
21.55	21.73	2.73	152.64
22.7	21.82	2.82	162.68
23.85	21.90	2.90	171.49
25	22.03	3.03	176.89
26.15	22.11	3.11	185.61
27.3	22.19	3.19	194.41
28.45	22.32	3.32	200.81
29.6	22.39	3.39	210.03
30.75	22.46	3.46	217.39
31.9	22.59	3.59	223.28
33.05	22.66	3.66	233.42
17.4	22.72	3.72	239.30
17.95	22.84	3.84	245.34
18.5	22.91	3.91	256.06
19.05	22.97	3.97	262.08
19.6	23.08	4.08	268.83
20.15	23.16	4.16	280.32
20.7	23.22	4.22	287.06
21.25	23.32	4.32	294.68
21.8	23.39	4.39	306.06
22.35	23.45	4.45	310.27
22.9	23.55	4.55	312.86
23.45	23.62	4.62	315.97
24	23.68	4.68	308.85
24.55	23.76	4.76	300.54

Таблица Б.2 – Среднее значения по ряду

Задача №2			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2	19.45	0.45	64.05
3.15	19.77	0.77	36.64
4.3	19.89	0.89	37.86
5.45	20.07	1.07	51.33
6.6	20.31	1.31	64.58
7.75	20.47	1.47	78.57
8.9	20.63	1.63	90.14
10.05	20.84	1.84	101.49
11.2	21.01	2.01	114.73
12.35	21.17	2.17	125.35
13.5	21.36	2.36	137.11
14.65	21.52	2.52	152.27
15.8	21.67	2.67	165.47
16.95	21.85	2.85	178.16
18.1	22.00	3.00	193.52
19.25	22.14	3.14	205.39
20.4	22.31	3.31	215.38
21.55	22.45	3.45	229.16
22.7	22.58	3.58	240.48
23.85	22.74	3.74	251.95
25	22.86	3.86	269.10
26.15	22.96	3.96	280.82
27.3	23.10	4.10	294.74
28.45	23.22	4.22	313.04
29.6	23.32	4.32	324.22
30.75	23.48	4.48	334.47
31.9	23.64	4.64	341.79
33.05	23.78	4.78	325.23

Таблица Б.3 – Среднее значения по ряду

Задача №3			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2	19.49	0.49	48.79
3.15	19.89	0.89	51.50
4.3	20.23	1.23	65.94
5.45	20.61	1.61	87.10
6.6	21.00	2.00	112.26
7.75	21.35	2.35	130.34
8.9	21.64	2.64	147.84

10.05	21.92	2.92	171.68
11.2	22.12	3.12	200.82
12.35	22.23	3.23	229.60
13.5	22.43	3.43	256.51
14.65	22.71	3.71	276.67
15.8	22.98	3.98	289.39
16.95	23.23	4.23	305.23
18.1	23.45	4.45	319.54
19.25	23.70	4.70	331.80
20.4	23.67	4.67	347.00

Таблица Б.4 – Среднее значения по ряду

Задача №4			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2.00	19.49	0.49	48.29
2.97	19.81	0.81	39.37
3.94	20.04	1.04	43.88
4.90	20.30	1.30	62.77
5.87	20.59	1.59	88.50
6.84	20.84	1.84	107.75
7.81	21.07	2.07	123.49
8.77	21.33	2.33	140.53
9.74	21.53	2.53	160.97
10.71	21.72	2.72	177.86
11.68	21.84	2.84	190.82
12.64	21.99	2.99	205.50
13.61	22.18	3.18	231.41
14.58	22.38	3.38	259.81
15.55	22.57	3.57	283.38
16.52	22.79	3.79	298.71
17.48	23.06	4.06	316.17
18.45	23.29	4.29	333.01
19.42	23.52	4.52	345.12
20.39	23.75	4.75	345.07
21.35	23.87	4.87	359.72

Таблица Б.5 – Среднее значения по ряду

Задача №5			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2.00	19.46	0.46	44.71
3.33	19.81	0.81	39.79
4.67	20.02	1.02	46.88
6.00	20.29	1.29	66.83
7.33	20.58	1.58	86.62
8.67	20.82	1.82	105.34
10.00	21.06	2.06	124.07
11.33	21.30	2.30	139.79
12.67	21.54	2.54	157.91
14.00	21.74	2.74	178.03
15.33	21.91	2.91	195.32
16.67	22.05	3.05	209.48
18.00	22.22	3.22	237.91
19.33	22.35	3.35	269.07
20.67	22.53	3.53	287.78
22.00	22.78	3.78	304.39
23.33	23.07	4.07	320.08
24.67	23.29	4.29	330.72
26.00	23.49	4.49	337.35
27.33	23.72	4.72	339.21
28.67	23.76	4.76	356.78

Таблица Б.6 – Среднее значения по ряду

Задача №6			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2.00	19.48	0.48	52.57
3.70	19.76	0.76	44.60
5.40	19.97	0.97	60.88
7.10	20.26	1.26	73.94
8.80	20.54	1.54	94.27
10.50	20.80	1.80	111.94
12.20	21.04	2.04	129.41
13.90	21.27	2.27	146.89
15.60	21.43	2.43	166.77
17.30	21.53	2.53	198.67
19.00	21.79	2.79	222.10
20.70	22.06	3.06	239.30
22.40	22.31	3.31	253.57
24.10	22.54	3.54	263.36
25.80	22.71	3.71	270.03

27.50	22.85	3.85	279.72
29.20	23.15	4.15	309.35
30.90	23.21	4.21	329.31
32.60	23.43	4.43	353.81
34.30	23.59	4.59	366.87
36.00	23.94	4.94	368.25

Таблица Б.7 – Среднее значения по ряду

Задача №7			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
6	19.57	0.57	43.19
7.15	19.96	0.96	55.04
8.3	20.22	1.22	56.52
9.45	20.43	1.43	69.39
10.6	20.68	1.68	95.50
11.75	20.93	1.93	112.45
12.9	21.18	2.18	125.56
14.05	21.42	2.42	145.18
15.2	21.64	2.64	159.56
16.35	21.86	2.86	173.66
17.5	22.08	3.08	192.12
18.65	22.26	3.26	207.12
19.8	22.44	3.44	221.21
20.95	22.58	3.58	242.99
22.1	22.67	3.67	265.96
23.25	22.77	3.77	284.25
24.4	22.94	3.94	304.34
25.55	23.14	4.14	319.22
26.7	23.37	4.37	330.92
27.85	23.58	4.58	347.62
29	23.81	4.81	363.38

Таблица Б.8 – Среднее значения по ряду

Задача №8			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
12	19.76	0.76	44.69
13.15	20.16	1.16	66.01
14.3	20.46	1.46	78.52
15.45	20.72	1.72	90.69
16.6	20.96	1.96	107.86
17.75	21.19	2.19	120.56

18.9	21.41	2.41	133.62
20.05	21.64	2.64	151.62
21.2	21.85	2.85	166.85
22.35	22.05	3.05	180.78
23.5	22.22	3.22	198.11
24.65	22.34	3.34	216.06
25.8	22.46	3.46	234.48
26.95	22.57	3.57	259.46
28.1	22.69	3.69	279.56
29.25	22.87	3.87	292.55
30.4	23.08	4.08	309.89
31.55	23.28	4.28	322.26
32.7	23.49	4.49	331.22
33.85	23.70	4.70	346.67
35	23.85	4.85	364.59

Таблица Б.9 – Среднее значения по ряду

Задача №9			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд.}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
6	19.54	0.54	43.32
7.15	19.79	0.79	33.27
8.3	19.82	0.82	33.21
9.45	20.01	1.01	42.26
10.6	20.16	1.16	51.15
11.75	20.29	1.29	58.67
12.9	20.45	1.45	66.91
14.05	20.59	1.59	77.42
15.2	20.71	1.71	83.54
16.35	20.88	1.88	92.13
17.5	21.01	2.01	102.53
18.65	21.12	2.12	107.50
19.8	21.27	2.27	115.76
20.95	21.38	2.38	126.47
22.1	21.48	2.48	131.52
23.25	21.62	2.62	137.69
24.4	21.71	2.71	148.93
25.55	21.80	2.80	154.51
26.7	21.93	2.93	161.50
27.85	22.02	3.02	171.70
29	22.09	3.09	179.01
30.15	22.22	3.22	184.60
31.3	22.30	3.30	193.61
32.45	22.37	3.37	200.69
33.6	22.50	3.50	207.75
34.75	22.57	3.57	217.07

35.9	22.63	3.63	223.18
37.05	22.75	3.75	229.63
21.4	22.82	3.82	240.07
21.95	22.88	3.88	246.08
22.5	23.00	4.00	252.50
23.05	23.06	4.06	262.27
23.6	23.12	4.12	266.31
24.15	23.23	4.23	270.66
24.7	23.30	4.30	280.23
25.25	23.36	4.36	285.45
25.8	23.46	4.46	293.92
26.35	23.52	4.52	305.92
26.9	23.57	4.57	310.37
27.45	23.66	4.66	312.92
28	23.70	4.70	312.18
28.55	23.72	4.72	295.21

Таблица В.10 – Среднее значения по ряду

Задача №10			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
12	19.68	0.68	46.36
13.15	19.96	0.96	59.03
14.3	20.10	1.10	51.37
15.45	20.20	1.20	47.49
16.6	20.30	1.30	57.84
17.75	20.43	1.43	64.51
18.9	20.59	1.59	71.25
20.05	20.72	1.72	81.53
21.2	20.84	1.84	87.17
22.35	20.99	1.99	94.65
23.5	21.11	2.11	104.06
24.65	21.23	2.23	110.89
25.8	21.37	2.37	118.70
26.95	21.48	2.48	129.07
28.1	21.58	2.58	134.04
29.25	21.72	2.72	141.37
30.4	21.81	2.81	151.37
31.55	21.90	2.90	158.65
32.7	22.02	3.02	165.62
33.85	22.10	3.10	176.62
35	22.18	3.18	185.16
36.15	22.32	3.32	191.93
37.3	22.40	3.40	200.37
38.45	22.47	3.47	206.82
39.6	22.59	3.59	214.76

40.75	22.66	3.66	225.09
41.9	22.72	3.72	231.69
43.05	22.83	3.83	238.37
27.4	22.90	3.90	248.91
27.95	22.96	3.96	255.22
28.5	23.07	4.07	262.15
29.05	23.14	4.14	272.79
29.6	23.20	4.20	278.53
30.15	23.30	4.30	284.40
30.7	23.37	4.37	294.29
31.25	23.42	4.42	296.71
31.8	23.52	4.52	301.04
32.35	23.59	4.59	309.04
32.9	23.65	4.65	308.35
33.45	23.74	4.74	309.66
34	23.79	4.79	311.24
34.55	23.81	4.81	296.70

Таблица В.11 – Среднее значения по ряду

Задача №11			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
6	19.46	0.46	102.76
7.15	19.79	0.79	88.73
8.3	19.86	0.86	78.61
9.45	20.05	1.05	117.97
10.6	20.32	1.32	123.84
11.75	20.53	1.53	132.65
12.9	20.73	1.73	151.40
14.05	20.91	1.91	161.14
15.2	21.12	2.12	174.65
16.35	21.32	2.32	191.64
17.5	21.47	2.47	201.77
18.65	21.65	2.65	213.98
19.8	21.83	2.83	232.99
20.95	21.96	2.96	246.23
22.1	22.14	3.14	257.60
23.25	22.29	3.29	278.91
24.4	22.39	3.39	293.49
25.55	22.54	3.54	304.58
26.7	22.68	3.68	326.50
27.85	22.76	3.76	338.42
29	22.88	3.88	346.67
30.15	22.98	3.98	362.95
31.3	23.03	4.03	368.13
32.45	23.14	4.14	371.86

33.6	23.27	4.27	386.28
34.75	23.36	4.36	392.02
35.9	23.55	4.55	396.23
37.05	23.79	4.79	386.76

Таблица В.12 – Среднее значения по ряду

Задача №12			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
12	21.39	2.39	201.11
13.15	21.55	2.55	215.37
14.3	21.68	2.68	216.60
15.45	21.76	2.76	219.85
16.6	21.84	2.84	228.52
17.75	21.95	2.95	235.98
18.9	22.06	3.06	246.33
20.05	22.17	3.17	250.46
21.2	22.27	3.27	253.37
22.35	22.37	3.37	261.77
23.5	22.47	3.47	263.90
24.65	22.57	3.57	267.51
25.8	22.65	3.65	272.76
26.95	22.73	3.73	268.50
28.1	21.39	2.39	198.29
29.25	21.56	2.56	209.48
30.4	21.68	2.68	207.42
31.55	21.76	2.76	209.88
32.7	21.85	2.85	219.30
33.85	21.96	2.96	228.83
35	22.06	3.06	238.23
36.15	22.17	3.17	244.51
37.3	22.27	3.27	250.69
38.45	22.37	3.37	257.81
39.6	22.47	3.47	262.35
40.75	22.57	3.57	269.36
41.9	22.65	3.65	273.88
43.05	22.72	3.72	268.19

Таблица В.13 – Среднее значения по ряду

Задача №13			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
6	19.64	0.64	47.07
7.15	20.12	1.12	59.63
8.3	20.51	1.51	78.60
9.45	20.85	1.85	96.41
10.6	21.16	2.16	112.81
11.75	21.47	2.47	133.32
12.9	21.75	2.75	147.48
14.05	21.79	2.79	177.43
15.2	21.77	2.77	212.25
16.35	22.22	3.22	242.04
17.5	22.48	3.48	261.07
18.65	22.81	3.81	277.21
19.8	23.08	4.08	291.25
20.95	23.35	4.35	304.90
22.1	23.63	4.63	327.20
23.25	23.93	4.93	342.29
24.4	23.56	4.56	335.73

Таблица В.13 – Среднее значения по ряду

Задача №13			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
12	19.84	0.84	46.89
13.15	20.32	1.32	67.18
14.3	20.73	1.73	91.01
15.45	21.09	2.09	109.63
16.6	21.40	2.40	124.47
17.75	21.70	2.70	143.27
18.9	21.98	2.98	159.60
20.05	22.19	3.19	172.76
21.2	22.15	3.15	203.86
22.35	22.21	3.21	229.59
23.5	22.47	3.47	251.22
24.65	22.80	3.80	274.26
25.8	23.09	4.09	292.47
26.95	23.36	4.36	305.35
28.1	23.61	4.61	324.26
29.25	23.86	4.86	343.34
30.4	24.02	5.02	357.74

Таблица В.14 – Среднее значения по ряду

Задача №14			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
6.00	19.59	0.59	43.94
6.97	20.00	1.00	56.14
7.94	20.27	1.27	57.51
8.90	20.49	1.49	67.34
9.87	20.74	1.74	86.00
10.84	20.99	1.99	109.48
11.81	21.24	2.24	128.39
12.77	21.45	2.45	141.23
13.74	21.70	2.70	154.79
14.71	21.91	2.91	170.61
15.68	22.11	3.11	191.06
16.64	22.29	3.29	205.79
17.61	22.45	3.45	216.05
18.58	22.60	3.60	233.80
19.55	22.72	3.72	257.28
20.52	22.84	3.84	280.95
21.48	22.98	3.98	301.45
22.45	23.17	4.17	317.07
23.42	23.37	4.37	334.66
24.39	23.60	4.60	351.43
25.35	23.84	4.84	362.12

Таблица В.15 – Среднее значения по ряду

Задача №15			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
12.00	19.78	0.78	46.68
12.97	20.19	1.19	66.89
13.94	20.51	1.51	79.48
14.90	20.77	1.77	89.48
15.87	21.03	2.03	102.53
16.84	21.25	2.25	118.59
17.81	21.47	2.47	135.01
18.77	21.67	2.67	147.64
19.74	21.89	2.89	162.47
20.71	22.07	3.07	179.27
21.68	22.24	3.24	197.99
22.64	22.36	3.36	209.50
23.61	22.47	3.47	222.19
24.58	22.56	3.56	246.69

25.55	22.69	3.69	270.06
26.52	22.90	3.90	291.35
27.48	23.12	4.12	308.36
28.45	23.36	4.36	320.60
29.42	23.56	4.56	335.21
30.39	23.78	4.78	347.07
31.35	23.93	4.93	363.23

Таблица В.16 – Среднее значения по ряду

Задача №16			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
6.00	19.56	0.56	40.63
7.33	19.94	0.94	52.75
8.67	20.17	1.17	53.84
10.00	20.42	1.42	75.42
11.33	20.67	1.67	95.92
12.67	20.93	1.93	108.99
14.00	21.17	2.17	129.26
15.33	21.41	2.41	142.34
16.67	21.66	2.66	161.58
18.00	21.87	2.87	173.92
19.33	22.06	3.06	193.09
20.67	22.17	3.17	211.83
22.00	22.25	3.25	242.70
23.33	22.36	3.36	265.91
24.67	22.61	3.61	280.07
26.00	22.84	3.84	294.79
27.33	23.05	4.05	303.83
28.67	23.25	4.25	318.33
30.00	23.40	4.40	327.45
31.33	23.58	4.58	346.80
32.67	23.86	4.86	359.23

Таблица В.17 – Среднее значения по ряду

Задача №17			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
12.00	19.75	0.75	43.21
13.33	20.14	1.14	65.83
14.67	20.43	1.43	76.28
16.00	20.70	1.70	91.68
17.33	20.94	1.94	107.93

18.67	21.17	2.17	120.65
20.00	21.41	2.41	138.48
21.33	21.64	2.64	151.85
22.67	21.86	2.86	170.42
24.00	22.03	3.03	182.92
25.33	22.14	3.14	203.86
26.67	22.21	3.21	221.61
28.00	22.37	3.37	244.96
29.33	22.54	3.54	264.01
30.67	22.77	3.77	277.23
32.00	22.97	3.97	291.51
33.33	23.15	4.15	299.40
34.67	23.33	4.33	313.04
36.00	23.47	4.47	324.59
37.33	23.63	4.63	345.70
38.67	23.87	4.87	362.50

Таблица В.18 – Среднее значения по ряду			
Задача №18			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2	17.77	0.51	42.45
3.15	18.11	0.85	44.09
4.3	18.46	1.20	95.33
5.45	18.88	1.62	110.52
6.6	19.19	1.93	127.77
7.75	19.53	2.27	151.00
8.9	19.88	2.62	177.29
10.05	20.19	2.93	196.40
11.2	20.50	3.24	214.56
12.35	20.81	3.55	237.63
13.5	21.07	3.81	258.83
14.65	21.36	4.10	278.60
15.8	21.63	4.37	303.02
16.95	21.87	4.61	320.63
18.1	22.11	4.85	335.33
19.25	22.35	5.09	375.37
20.4	22.53	5.27	389.76
21.55	22.74	5.48	403.46
22.7	23.00	5.74	421.82
23.85	23.21	5.95	448.84
25	23.53	6.27	462.53

Таблица В.19 – Среднее значения по ряду

Задача №19			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2	21.19	0.41	53.48
3.15	21.46	0.68	38.01
4.3	21.71	0.93	52.92
5.45	21.92	1.14	62.93
6.6	22.13	1.35	75.59
7.75	22.33	1.55	83.40
8.9	22.51	1.73	96.81
10.05	22.66	1.88	103.89
11.2	22.79	2.01	110.35
12.35	22.91	2.13	121.36
13.5	23.01	2.23	132.86
14.65	22.99	2.21	147.62
15.8	23.03	2.25	160.18
16.95	23.09	2.31	173.25
18.1	23.21	2.43	186.63
19.25	23.35	2.57	215.74
20.4	23.48	2.70	219.94
21.55	23.66	2.88	224.50
22.7	23.88	3.10	237.39
23.85	24.10	3.32	245.91
25	24.25	3.47	263.67

Таблица Б.21 – Среднее значения по ряду

Задача №21			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду t_o , °C	Удельная температура в ряду ($t_{уд}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2	17.79	0.53	46.12
3.15	18.26	1.00	56.98
4.3	18.68	1.42	87.21
5.45	19.13	1.87	115.72
6.6	19.58	2.32	148.98
7.75	19.99	2.73	173.21
8.9	20.36	3.10	196.49
10.05	20.73	3.47	222.63
11.2	21.06	3.80	262.71
12.35	21.38	4.12	299.62
13.5	21.75	4.49	326.41
14.65	22.09	4.83	347.44
15.8	22.40	5.14	364.83
16.95	22.72	5.46	385.72

18.1	23.01	5.75	405.67
19.25	23.30	6.04	424.31
20.4	23.51	6.25	453.77

Таблица Б.22 – Среднее значения по ряду

Задача №22			
Расст. до ряда, м	Сред.температура в ряду $t_o, ^\circ\text{C}$	Удельная температура в ряду ($t_{уд.}$)	Сред. в ряду (CO_2), ppm
2	21.19	0.41	58.74
3.15	21.54	0.76	46.88
4.3	21.92	1.14	59.05
5.45	22.26	1.48	79.10
6.6	22.59	1.81	102.08
7.75	22.91	2.13	111.98
8.9	23.15	2.37	117.97
10.05	23.36	2.58	127.89
11.2	23.57	2.79	137.62
12.35	23.73	2.95	149.42
13.5	23.76	2.98	172.70
14.65	23.58	2.80	190.19
15.8	23.43	2.65	196.13
16.95	23.50	2.72	204.11
18.1	23.70	2.92	219.58
19.25	23.97	3.19	239.49
20.4	24.18	3.40	256.65

Приложение Г – Распределение температуры и концентрации углекислого газа

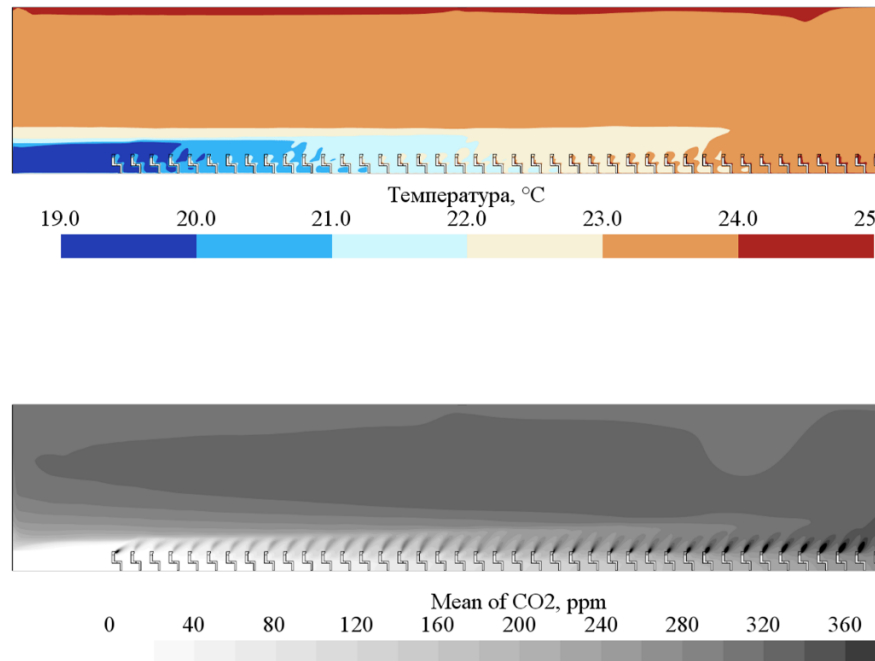


Рисунок В.1 – Продольное сечение задача №7 а) температурное поле;
б) поле концентраций CO_2

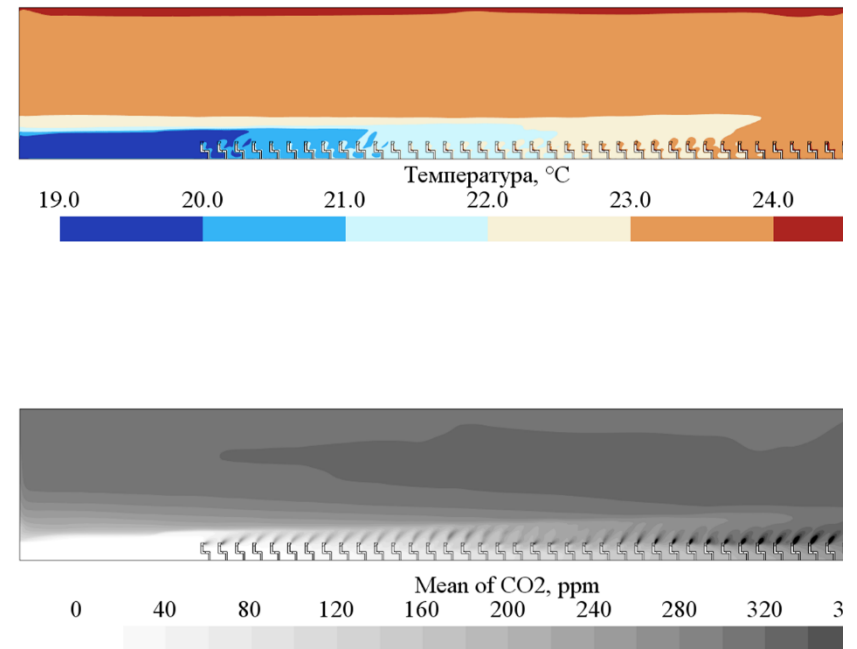


Рисунок В.2 – Продольное сечение задача №8 а) температурное поле;
б) поле концентраций CO_2

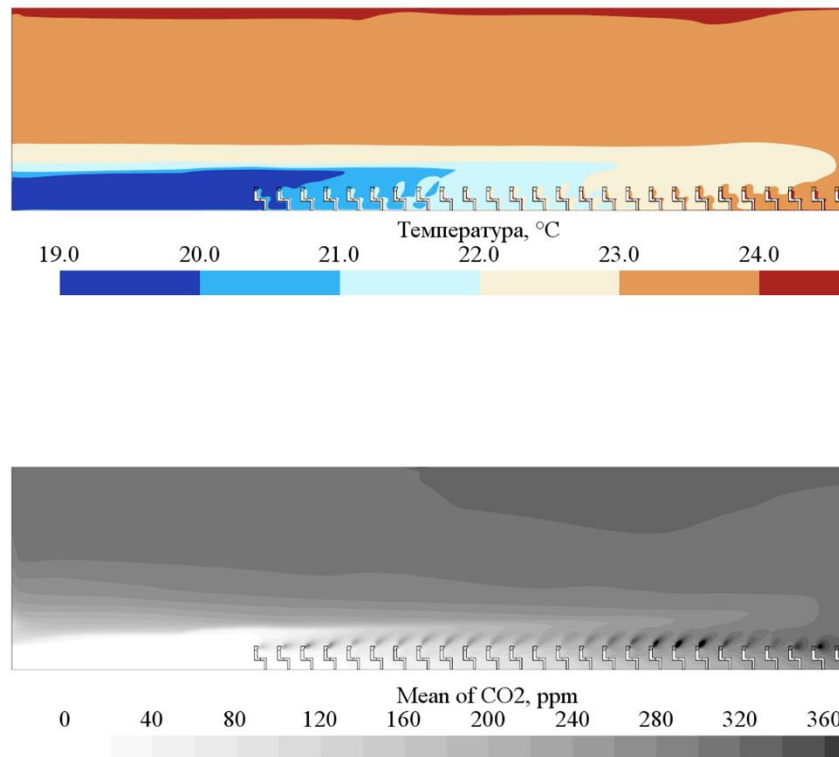


Рисунок В.3 – Продольное сечение задача №9 а) температурное поле;
б) поле концентраций CO_2

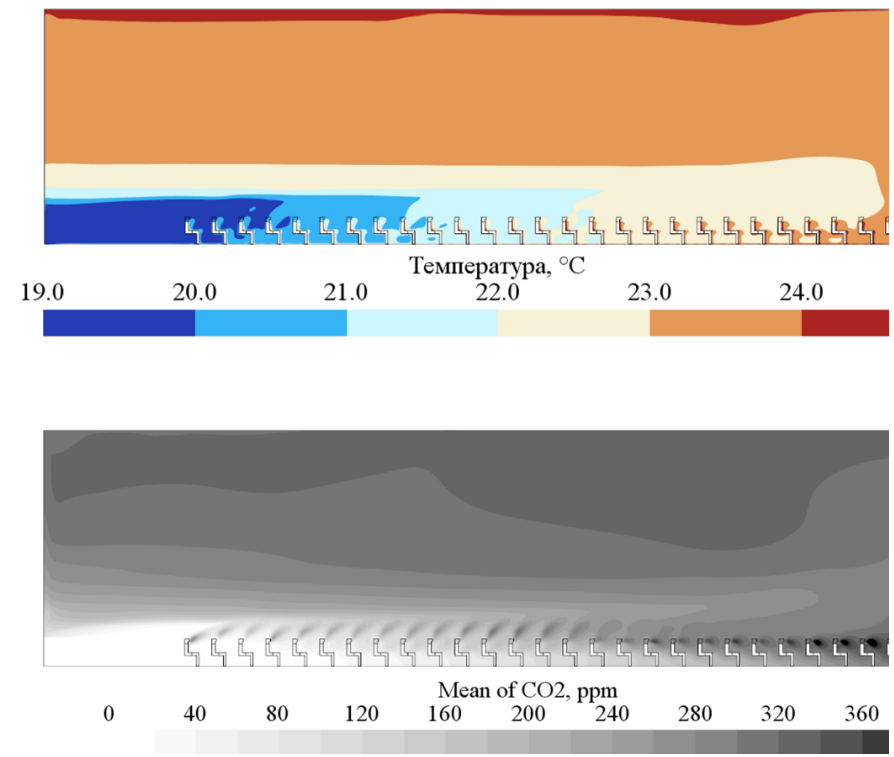


Рисунок В.4 – Продольное сечение задача №10 а) температурное поле;
б) поле концентраций CO_2

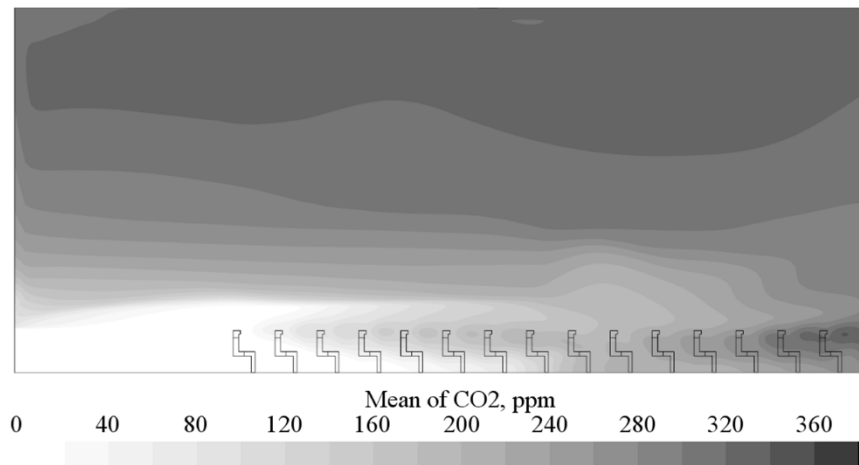
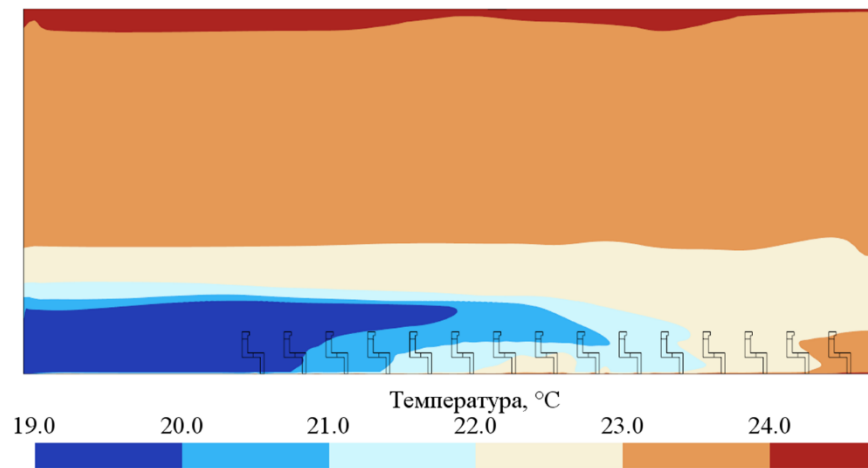


Рисунок В.5 – Продольное сечение задача №11 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

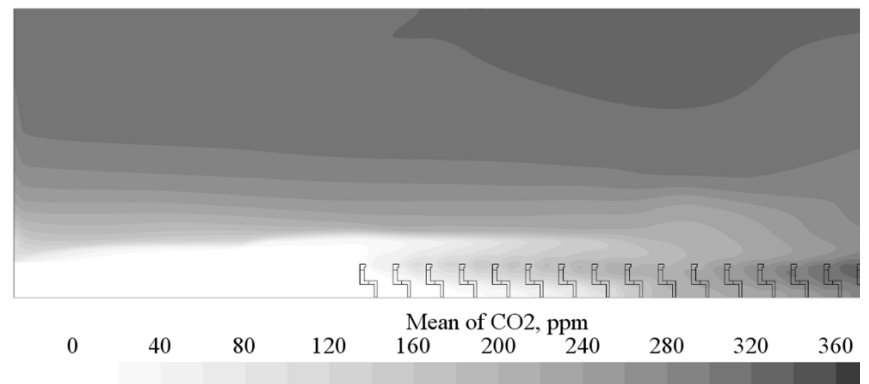
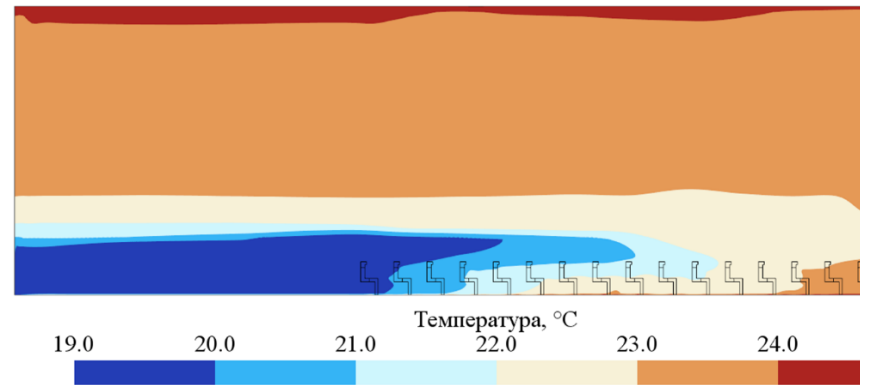


Рисунок В.6 – Продольное сечение задача №12 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

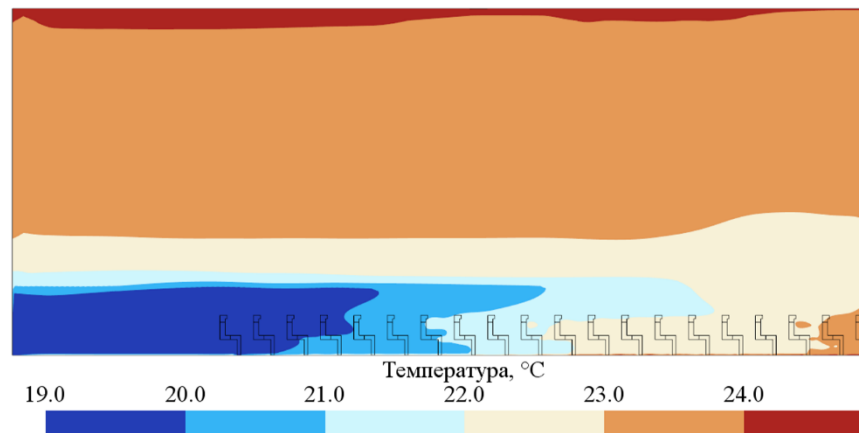


Рисунок В.7 – Продольное сечение задача №13 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2

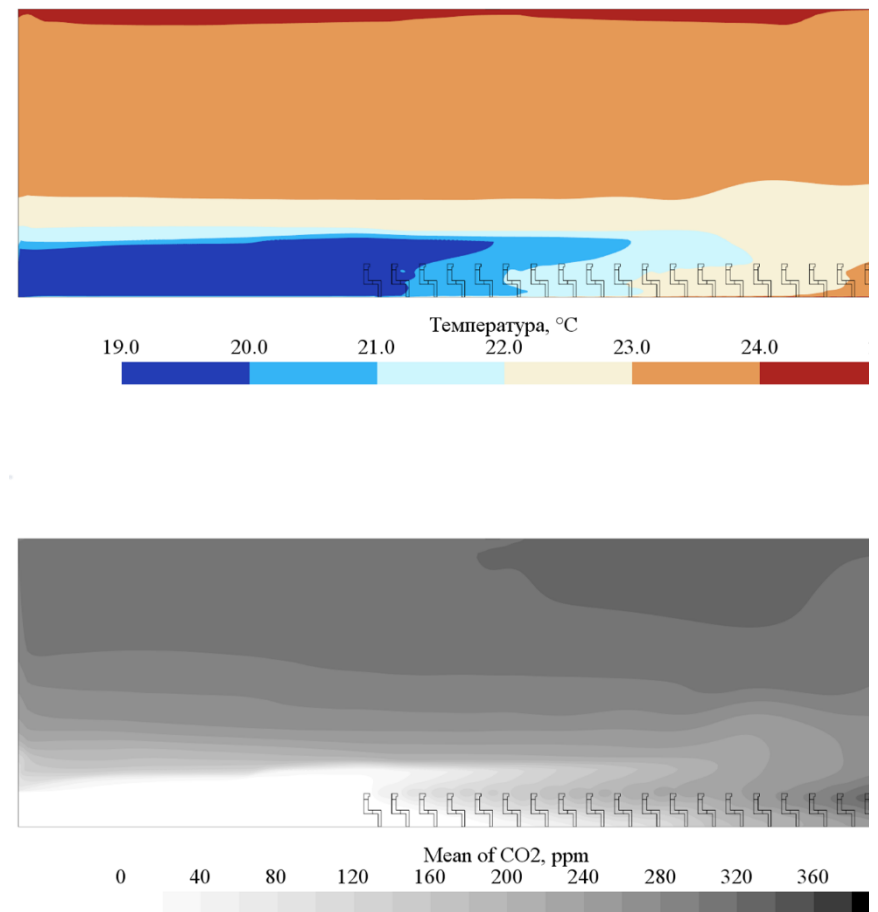


Рисунок В.8 – Продольное сечение задача №14 а) температурное поле; б) поле концентраций CO_2