

УДК 628.83

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-3-130-141

© К. А. Копылов, аспирант

© К. А. Kopylov, post-graduate student

© Д. М. Денисихина, д-р техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

© D. M. Denisikhina, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: kreak@mail.ru, denisikhina@mail.ru

E-mail: kreak@mail.ru, denisikhina@mail.ru

© К. В. Кочарьянц, канд. техн. наук
(ООО «Арктос»; Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет, Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: nin-kasi@yandex.ru

© K. V. Kocharyantc, PhD in Sci. Tech.
(LLC «Arktos»; Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: nin-kasi@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА АУДИТОРИИ ПРИ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES OF THE AIR DISTRIBUTION MODE OF THE CLASSROOM DURING DISPLACEMENT VENTILATION

Представлены результаты численного и натурного исследования воздушного режима, формируемого в аудитории при подаче воздуха низкоскоростными воздухораспределителями. Работа направлена на разработку и верификацию численных моделей, позволяющих определить факторы, влияющие на температурную и концентрационную стратификацию в помещении при вытесняющей схеме вентиляции. Установленная корреляция данных натурного и численного экспериментов подтверждает правомерность использования численного моделирования. Полученные результаты позволяют обоснованно применять численное моделирование при изучении эффективности систем вытесняющей вентиляции и оптимизации проектных решений.

Ключевые слова: вытесняющая вентиляция, воздухораспределение, численное моделирование, натурный эксперимент.

The paper presents the results of numerical simulation and full-scale experiment of the classroom air distribution mode with diffusers for displacement ventilation. The study is aimed at developing and verifying numerical models that make it possible to determine the factors influencing temperature and concentration stratification in a room with a displacement ventilation scheme. The established correlation of field and numerical experiment data confirms the validity of using numerical simulation model. The results obtained make it possible to reasonably apply numerical simulation when studying the effectiveness of displacement ventilation systems and optimizing HVAC design solutions.

Keywords: displacement ventilation, air distribution, numerical simulation, full-scale experiment.

Введение

Обеспечение оптимальных параметров микроклимата и высокого качества воздушной среды — ключевое требование к современным системам вентиляции и кондиционирования воздуха [1]. Системы вытесняю-

щей вентиляции [2] направлены на решение данной задачи, повышают качество воздуха и равномерность распределения параметров микроклимата [3, 4]. Как показывают исследования [5, 6], повышенные значения концентрации углекислого газа негативно влия-

ют на умственную и физическую активность людей, увеличивают количество случаев заболеваний [7, 8].

Ключевой проблемой при проектировании является определение границ применимости систем вытесняющей вентиляции, а именно точность прогнозирования температурной и концентрационной стратификации в помещении [9, 10] при различных сочетаниях исходных параметров. В настоящее время существуют инженерные методики для расчета вытесняющей вентиляции, однако их применение не учитывает множество влияющих факторов, в результате расчетные данные могут существенно отличаться от фактически формируемых параметров микроклимата в помещении [11].

На эффективность работы вытесняющей вентиляции влияют конфигурация помещения и расположение воздухораспределительных устройств [12]. При этом большинство исследований с применением численного моделирования не учитывали напрямую вклад теплового излучения от людей и от других поверхностей, что является критичным при описании работы систем вытесняющей вентиляции [13]. Помимо этого, для достоверного описания работы систем вытесняющей вентиляции также необходимо корректно моделировать конвективные тепловые потоки от источников теплоты, учитывая их сложную пространственную структуру [14–16]. Даже незначительные факторы, такие как положение человека (сидя или стоя), влияют на конвективный тепловой поток вокруг него и, как следствие, изменяют температурную и концентрационную стратификацию в помещении [2].

Настоящая работа направлена на разработку и валидацию математической модели для расчета параметров микроклимата в помещении общественного здания при вытесняющей вентиляции. Валидация математической модели выполнена на основе сравне-

ния результатов численного моделирования с данными натурного эксперимента.

Применение CFD-моделирования позволяет учесть совокупность факторов, влияющих на распределение параметров микроклимата и концентрации CO_2 , и в настоящее время является наиболее актуальным инструментом для решения задач воздухораспределения в нестандартных помещениях или условиях [17–19].

Методы исследования

В настоящей работе были выполнены натурный и численный эксперименты.

Натурный эксперимент проводился в учебной аудитории компании «Арктика». Измерения выполнялись по методике, разработанной в соответствии с требованиями п. 6 ГОСТ 30494–2011 «Здание жилые и общественные. Параметры микроклимата» с использованием поверенных в установленном порядке приборов, описание которых приводится далее.

Инструментом численного исследования являлся аэродинамический вычислительный комплекс Simcenter STAR-CCM+, выполняющий численные решения трехмерных дифференциальных уравнений сохранения.

Уравнения (1)–(5), описывающие течение воздуха в объеме аудитории, аналогичны указанным в работе авторов [17].

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}} + \bar{\bar{\tau}}_t) + \rho \vec{g}. \quad (2)$$

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

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

а тензор турбулентных напряжений $\bar{\bar{\tau}}_t$ — в соответствии с обобщенной гипотезой Буссинеска:

$$\bar{\bar{\tau}}_t = \mu_t (\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu_t \nabla \cdot \vec{V} \bar{I} - \frac{2}{3} \rho k \bar{I}, \quad (4)$$

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

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{V}[\rho E + p]) = \nabla \cdot (\bar{V} \cdot [\bar{\tau} + \bar{\tau}_t]) - \nabla \cdot (\bar{q} + \bar{q}_t), \quad (5)$$

где ρ — плотность воздуха; $\bar{V}$ — скорость потока; E — внутренняя энергия; t — время; q , q_t — молекулярная и турбулентная составляющие вектора плотности теплового потока, Вт/м².

Уравнение сохранения массы i -й компоненты (перенос CO₂, компоненты пара):

$$\frac{\partial \rho c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_i \bar{V}) = -\nabla \cdot (\bar{J}_i + \bar{J}_{it}), \quad (6)$$

где $\bar{J}_i$ — диффузный поток i -й компоненты; $\bar{J}_{it}$ — турбулентный поток массы i -й компоненты, определяемый с помощью полуэмпирической модели турбулентности.

Для нахождения характеристик турбулентности необходимо использование той или иной модели турбулентности. В настоящей работе использовалась модель турбулентности k - ϵ [20].

Система уравнений (1)–(5) дополняется уравнениями радиационного теплообмена [17].

Дифференциальные уравнения (1)–(5) являются нелинейными и не имеют общего аналитического решения. Решение данной системы возможно с помощью методов численного моделирования.

Постановка задачи. Натурный эксперимент

Натурный эксперимент проводился в учебной аудитории, которая представляет собой помещение правильной прямоугольной формы размерами 9 × 5,5 × 3 м. На двух смежных стенах помещения размещены окна. В период проведения эксперимента окна были закрыты жалюзиными шторами.

Измерения проводились в холодный период года при температуре наружного воздуха –4 °С. Концентрация углекислого газа в наружном воздухе составляла 530 ppm. Погода была пасмурной.

Помещение оснащено учебными партами и стульями, рассчитанными на 30 человек, а также стеллажами и тумбами.

В учебной аудитории за партами постоянно находились 12 человек, возраст, пол и вес которых представлены в табл. 1, они рассаживались равномерно по помещению и занимались умственным трудом, читали или разговаривали между собой.

Подача приточного воздуха осуществлялась через два полуцилиндрических низкоскоростных воздухораспределителя 1ВНП 250 компании «Арктос» (рис. 1). Приточные устройства установлены на полу непосредственно у стены. Удаление воздуха производилось через пять жалюзийных решеток АМР 400×150 мм, установленных на воздуховоде, расположенном в двухгранном углу, образованном потолком и противоположной стеной.

Перед началом проведения измерений с помощью элементов системы автоматического управления вентиляционной установкой, обслуживающей аудиторию, был выставлен расход приточного воздуха 630 м³/ч, обеспечивающий воздухообмен в количестве ≈53 м³/ч на одного человека. Указанное значение расхода превышает норму наружного воздуха на человека для помещений с временным пребыванием людей (20 м³/ч), однако при вытесняющей вентиляции рекомендуется подача большего расхода приточного воздуха [21]. Расход воздуха определялся по данным измерения динамического давления с помощью пневмометрической трубки ПИТО и микроманометра КИМО МР 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 CO₂ по объему помещения осуществлялся в течение 1,5 ч.



Рис. 1. Расположение элементов воздухораспределения: а — низкоскоростной воздухораспределитель; б — приточный воздуховод; в — декоративный кожух воздухораспределителя

В период проведения натурного эксперимента производились измерения скорости и температуры воздуха, а также концентрации углекислого газа в помещении.

Скорость и температура воздуха измерялись с помощью термоанемометрической системы Sensor AirDistSys 5000, включающей семь сферических датчиков. Концентрация углекислого газа измерялась с помощью переносного анализатора SM-2100.

Датчики термоанемометрической системы и анализатор SM-2100 располагались на вертикальной стойке один над другим с шагом 30 см, начиная с расстояния 10 см от пола (рис. 2).

Вертикальная стойка с приборами перемещалась по помещению и устанавливалась в точки измерений согласно схеме, приведенной на рис. 3. После перемещения стойки выдерживалась пауза в течение 10 мин для

стабилизации параметров микроклимата после возмущения. Измерения в каждой точке производились три раза в течение 5 мин. Для анализа использовались усредненные данные.

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

Постановка задачи. Численный эксперимент

Для проведения численного моделирования была создана 3D-геометрия помещения, повторяющая все значимые особенности помещения учебной аудитории, в том числе воспроизведено положение источников тепло-, газовыделений (людей), приточных и вытяжных устройств, приборов отопления. В модель были добавлены оконные жалюзи, так как их наличие влияет на формирование ниспадающего потока вдоль



Рис. 2. Измерение параметров воздуха в помещении

поверхности окон и его распространение вглубь помещения.

Для проведения моделирования были заданы следующие граничные условия:

- теплопоступления от одного человека — 83 Вт;
- выделение углекислого газа с поверхности лица каждого человека определено согласно метаболизму и физиологии человека, физической нагрузке. Расчеты выделений CO_2 для каждого из присутствующих с учетом их пола, возраста и массы были выполнены согласно [21], результаты приведены в табл. 1;
- на внутренней поверхности стен, окон, перекрытий задавалось граничное условие 3-го рода. Для окон и наружных стен температура наружного воздуха задана равной $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, для перекрытий и внутренних стен температура в соседних помещениях — $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом значение сопротивления теплопередаче для ограждающих конструкций составляло:
 - окна — $0,46\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;
 - наружные стены — $0,89\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;
 - перекрытия — $0,33\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;
- общий тепловой поток отопительных приборов — 1935 Вт. На вертикальных поверхностях отопительных приборов задана температура, измеренная тепловизором в ходе натурного эксперимента ($46\text{ }^{\circ}\text{C}$). До-

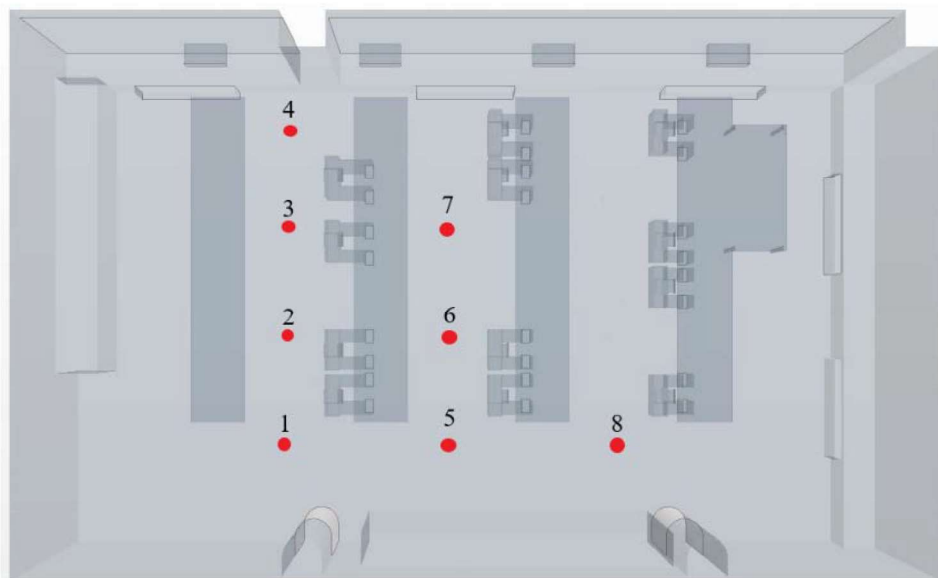


Рис. 3. Схема расположения комплекса с датчиками в помещении

Таблица 1

Параметры людей — участников эксперимента

№	Пол	Вес, кг	Рост, см	Возраст, лет	Выделение CO ₂ , кг/с
1	М	90	185	29	$1,081 \cdot 10^{-5}$
2	Ж	62	162	42	$0,730 \cdot 10^{-5}$
3	М	82	180	82	$0,817 \cdot 10^{-5}$
4	М	55	172	17	$0,861 \cdot 10^{-5}$
5	М	100	174	25	$1,161 \cdot 10^{-5}$
6	М	90	176	62	$0,867 \cdot 10^{-5}$
7	М	65	182	34	$0,855 \cdot 10^{-5}$
8	М	90	184	21	$1,081 \cdot 10^{-5}$
9	М	72	179	22	$0,938 \cdot 10^{-5}$
10	Ж	62	165	26	$0,760 \cdot 10^{-5}$
11	М	95	176	62	$0,898 \cdot 10^{-5}$
12	Ж	78	166	46	$0,800 \cdot 10^{-5}$

полнительный источниковый член в объеме расчетной области, занимаемой радиаторами, был задан равным 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 $80 \text{ м}^3/\text{ч}$. 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 табл. 1;

- температура наружного воздуха равна $-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

- концентрация углекислого газа в наружном воздухе равна 530 ppm;

- расход, температура, концентрация CO₂ для приточного воздуха задавались согласно данным натурного эксперимента.

Для расчета была построена конечнообъемная расчетная сетка размерностью 4 млн ячеек с призматическими слоями у поверхностей окон, пола, отопительных приборов. Сгущение сетки производилось около источников газовыделения (лиц людей), в местах распространения приточных струй и около отопительных приборов. Фрагмент расчетной сетки представлен на рис. 4.

Результаты исследования

Исходными данными для обработки и получения результатов являются измерения температуры и концентрации углекислого газа, полученные в точках измерения в ходе проведения натурного эксперимента и численного моделирования. Пример полученных результатов приведен в табл. 2.

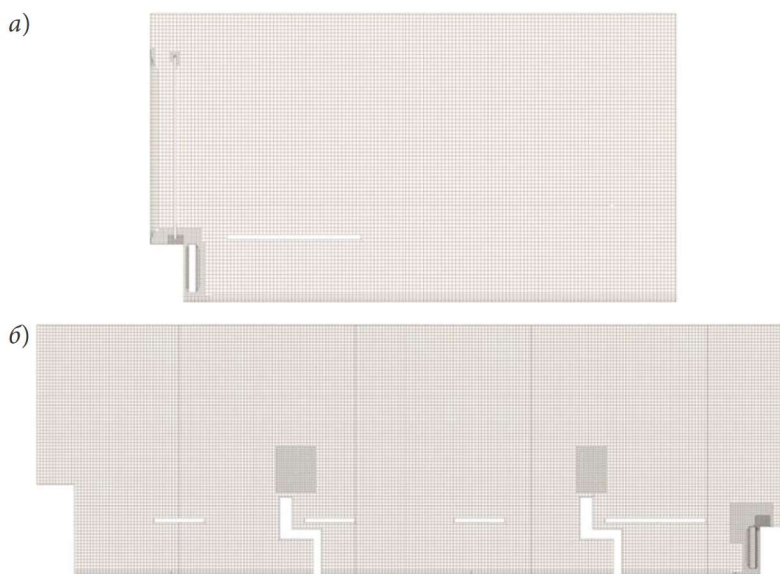


Рис. 4. Расчетная сетка: а — поперечный разрез; б — продольный разрез

Значения скорости воздуха в помещении не приводятся, так как на расстоянии 1 м от воздухораспределителя скорость в приточной струе в натурном эксперименте не превышала нормируемого значения 0,2 м/с, при этом скорость воздуха в обслуживаемой зоне помещения не превышала 0,1 м/с.

На основе полученных значений построены графики распределения температуры и концентрации углекислого газа по высоте помещения (рис. 5).

На рис. 6 приведены поля температуры и концентрации CO_2 в вертикальном сечении, полученные в результате численного моделирования, а на рис. 7 — траектории движения воздуха от низкоскоростных воздухораспределителей и из верхней части помещения вблизи окон.

Обсуждение

Анализ полученных в ходе натурного эксперимента и численного моделирования значений температуры воздуха и концентрации углекислого газа (см. рис. 5) позволяет сделать вывод о схожести в характере распределения указанных параметров в объеме

помещения. При этом в отдельных точках наблюдается различие в данных, превышающее погрешность измерений. Это можно объяснить сложностью объекта исследования и невозможностью учета в численной модели всех влияющих на параметры микроклимата факторов, таких как нестационарность реального процесса в помещении, перетекание воздуха через неплотности дверного проема, различие задаваемых и реальных тепло- и газовыделений от людей и т. п. 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

Таблица 2

Результаты расчетов и натурных измерений температуры по объему аудитории

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

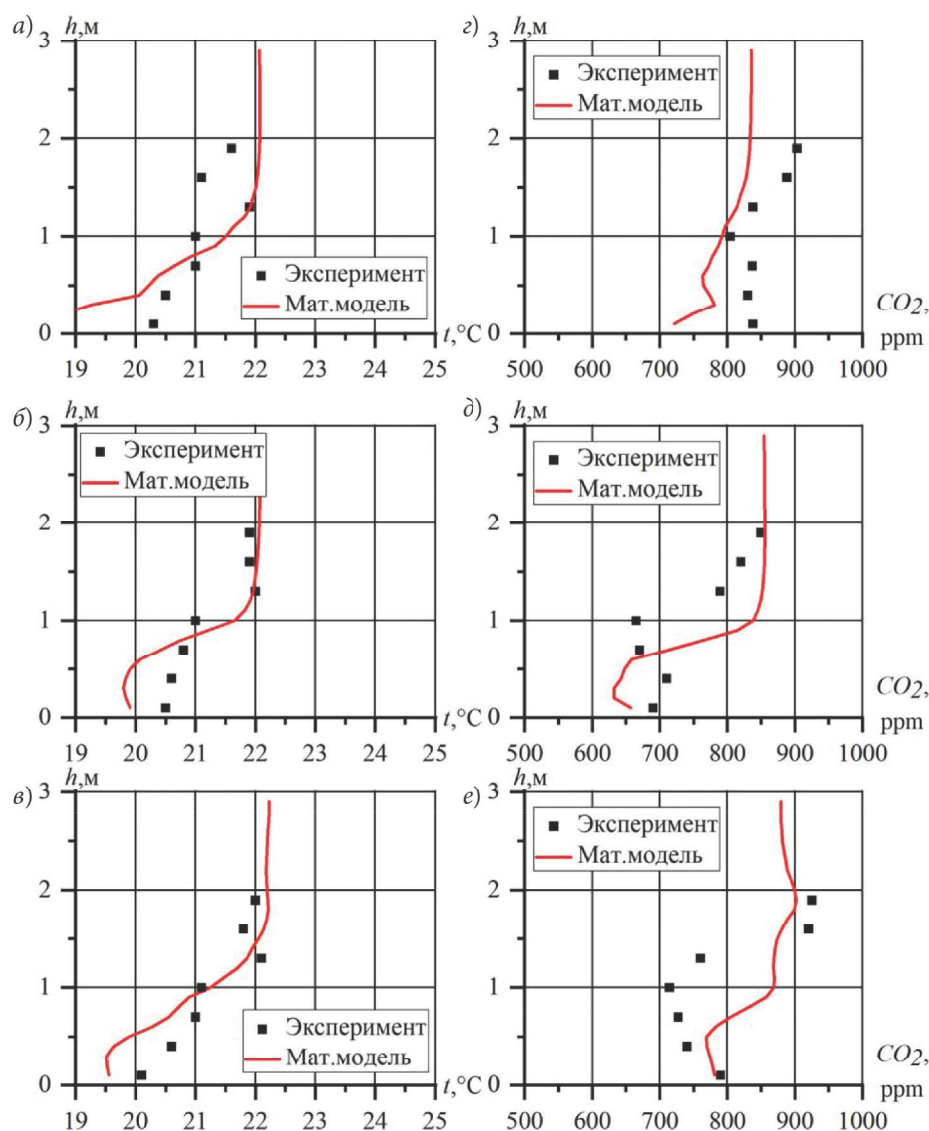


Рис. 5. Графики распределения температуры и концентрации CO₂ по высоте помещения:
а, з — точка замера № 3; б, д — точка замера № 5; в, е — точка замера № 6

проведения натурного эксперимента было отмечено, что в некоторых частях помещения концентрация углекислого газа у пола оказывалась, вопреки классическим представлениям о характере распределения CO₂ по вертикали [21], выше, чем на уровне парт. Анализ полей распределения температуры и концентрации CO₂ по объему помещения, рассчитанных с помощью численного моделирования, позволил объяснить полученный в ходе натурного эксперимента неожиданный результат. На рис. 7 видно, что теплый

воздух с высокой концентрацией CO₂ 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 на рис. 7, 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 на-

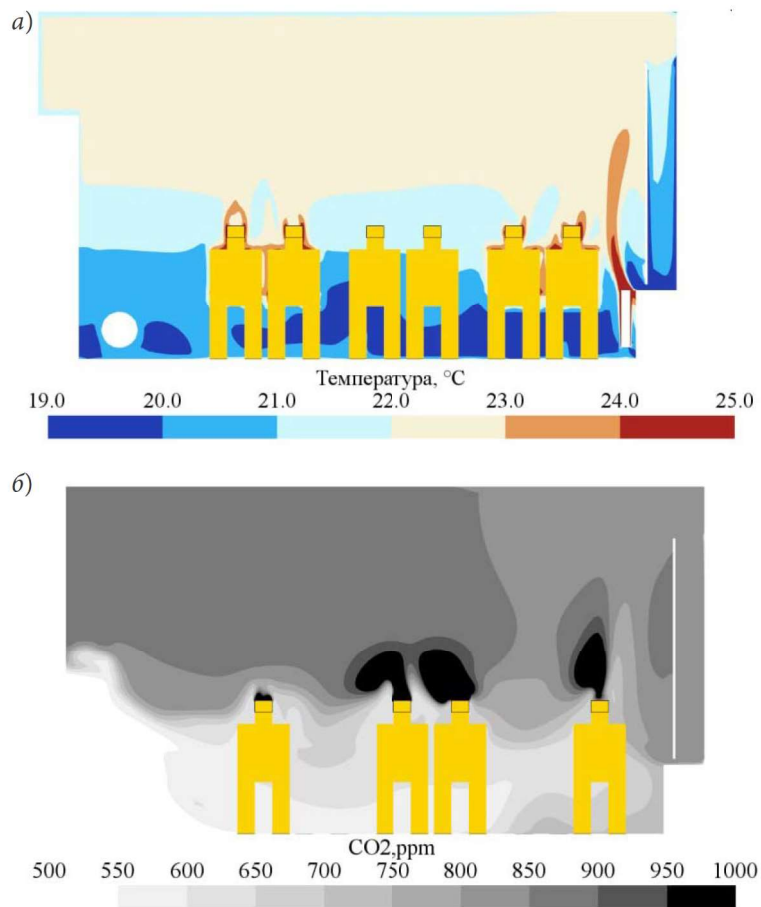


Рис. 6. Поперечное сечение аудитории: а — температурное поле; б — поле концентраций CO_2

правлении 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, результаты и натурного, и численного экспериментов показали, 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.

Выводы

1. Разработанная численная модель аудитории с реализованной в ней вытесняющей вентиляцией качественно согласуется с натурным объектом, что позволяет использовать ее для дальнейших исследований влияния различных факторов на распределение воздушных потоков и формирование микроклимата.

2. Распределение параметров воздушной среды по объему помещения при вытесняющей вентиляции оказывается чувствительным к наличию в помещении вертикальных холодных поверхностей. В рамках проведенного исследования получен эффект, при котором ниспадающий поток, распространяющийся вдоль поверхности наружного

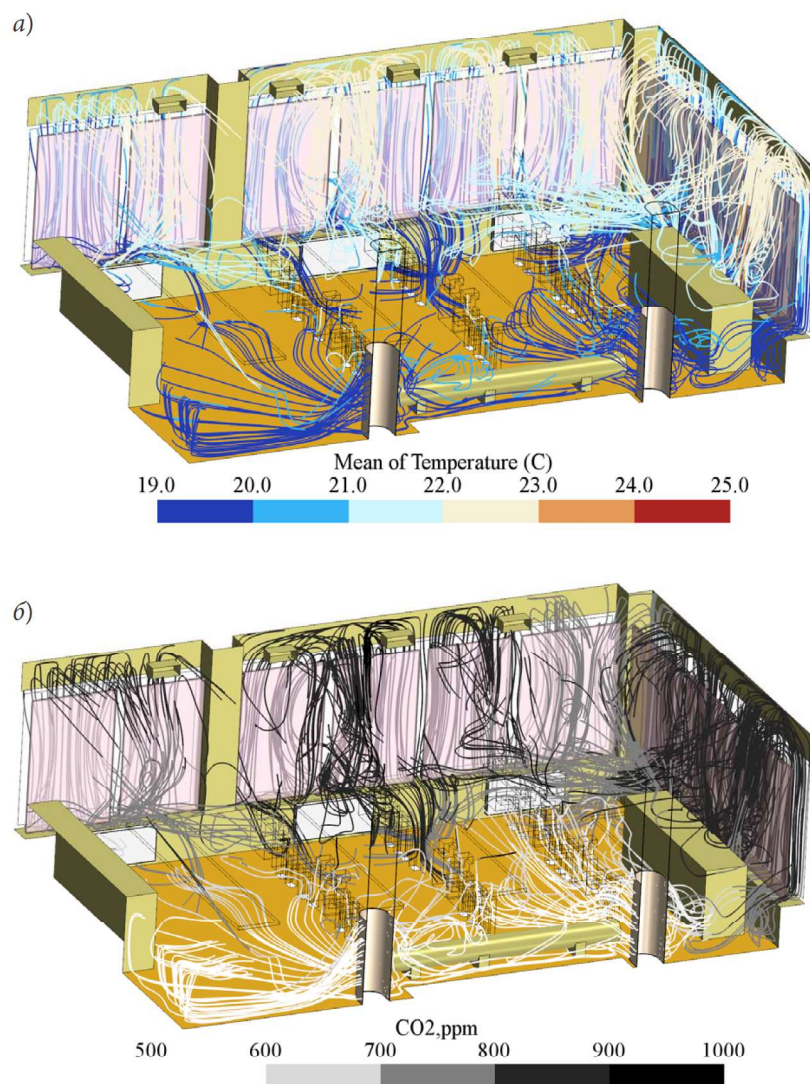


Рис. 7. Траектории движения воздуха от низкоскоростного воздухораспределителя и из верхней части помещения вблизи окон, раскрашенные по температуре воздуха (а) и по концентрации CO_2 (б)

остекления, переносит углекислый газ из верхней зоны в обслуживаемую зону помещения, что ухудшает качество воздуха в ней.

Библиографический список

1. Lozinsky C. H., Casquero-Modrego N., Walker I. S. The health and indoor environmental quality impacts of residential building envelope retrofits: A literature review // *Building and Environment*. 2025. Vol. 270. 112568.
2. Hatif I. H., Wong K. Y., Jabbar Al-Rikabi I., Tan H., Yee Kek H., Hawas M. N., Zhang M., Zhang J., Cai T. A multi-criteria CFD investigation of mixing, displacement, and stratum ventilation: Trade-offs between energy efficiency, thermal comfort, and airborne infection control // *Building and Environment*. 2026. Vol. 289. 114042.
3. Nielsen P. V. Temperature Distribution in a Displacement Ventilated Room // *ROOMVENT '96. Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms*. Yokohama, Japan, July 17–19, 1996. Vol. 3. Pp. 323–330. ISBN: 4-924557-01-3.
4. Brohus H., Ryberg H. The Kappa Model — a Simple Model for the Approximate Determination of Vertical Temperature Distribution in Rooms / Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University. 1999.

5. Kang M., Yan Y., Guo C., Liu Y., Fan X., Wargocki P., Lan L. Ventilation causing an average CO₂ concentration of 1,000 ppm negatively affects sleep: A field-lab study on healthy young people // *Building and Environment*. 2024. Vol. 249. 111118.
6. Bale R., Murga A., Yamamoto H., Tsubokura M. Impact of Airflow Rate and Supply-Exhaust Configuration on Displacement Ventilation in Airborne Pathogen Removal // *Sustainability*. 2025. Vol. 17 (18). 8193.
7. Jendrossek S. N., Jurk L. A., Remmers K., Cetin Y. E., Wolfgang S., Kriegel M., Gastmeier P. The Influence of Ventilation Measures on the Airborne Risk of Infection in Schools: A Scoping Review // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20 (4). 3746.
8. Shen J., Chen Y., Rajagopal K. H. Enhancing Indoor Environmental Quality and Sustainability in Post-Pandemic Office Settings: A Study on Displacement Ventilation Feasibility // *Buildings*. 2023. Vol. 13 (12). 3110.
9. Шилькрот Е. О. Вытесняющая вентиляция в непроизводственных зданиях // АВОК. 2003. № 1. С. 22–28.
10. Зельдович Я. Б. Предельные законы свободно восходящих конвективных потоков // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1937. Т. 7. Вып. 12. С. 1463–1465.
11. Ren S., Tian S., Meng X. Comparison of Displacement Ventilation, Mixing Ventilation and Underfloor Air Distribution System // *Proceedings of International Conference on Architectural, Civil and Hydraulics Engineering*. Guangzhou City, China, 28–29 November 2015. Atlantis Press, 2015. Pp. 79–82. DOI 10.2991/icache-15.2015.16.
12. Kanaan M., Amine S., Hanna E. Y. G. Computational Simulation and Analysis of Local Thermal Comfort and Indoor Air Quality in Space with Displacement Ventilation // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024. Vol. 14 (5). Pp. 16383–16388.
13. Chow K., Holdo A. E. On the influence of boundary conditions and thermal radiation on predictive accuracy in numerical simulations of indoor ventilation // *Building and Environment*. 2010. Vol. 45 (2). Pp. 437–444.
14. Wirilyasart S., Naphon P. Numerical study on air ventilation in the workshop room with multiple heat sources // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. Vol. 13. 100405.
15. Park H., Yoo S.-J., Kuga K., Sumiyoshi E., Harashima H., Ito K. Impact of human micro-movements on breathing zone and thermal plume formation // *Building and Environment*. 2024. Vol. 264. 111916.
16. Turner J. S. Buoyancy effects in fluids. Cambridge University Press, 1973. 367 p.
17. Денисихина Д. М., Аверьянов В. К., Цыганков А. В. Расчет воздухообмена и воздухораспределения в объеме зрительных залов театров // *Промышленное и гражданское строительство*. 2024. № 3. С. 23–28.
18. Денисихина Д. М. Численное исследование закономерностей распределения CO₂ в общественных зданиях // *Инновации и инвестиции*. 2023. № 5. С. 368–372.
19. Ascione F., Rossi F., Iovane T., Mastellone M. Microclimatic control of a fourteenth-century Church in Italy: The design of systems by experiments and simulations // *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 293 (12). 113199.
20. Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A new $k - \epsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows // *Computers & Fluids*. 1995. Vol. 24 (3). Pp. 227–238.
21. Скиспад Х. (ред.), Мундт Э., Нильсен П., Хагстрем К., Райлио Й. Вытесняющая вентиляция в непроизводственных зданиях: справочное руководство REHVA. 2-е изд., испр. М.: АВОК-пресс, 2006. 104 с.

References

1. Lozinsky C. H., Casquero-Modrego N., Walker I. S. The health and indoor environmental quality impacts of residential building envelope retrofits: A literature review. *Building and Environment*. 2025, vol. 270, 112568.
2. Hatif I. H., Wong K. Y., Jabbar Al-Rikabi I., Tan H., Yee Kek H., Hawas M. N., Zhang M., Zhang J., Cai T. A multi-criteria CFD investigation of mixing, displacement, and stratum ventilation: Trade-offs between energy efficiency, thermal comfort, and airborne infection control. *Building and Environment*, 2026, vol. 289, 114042.
3. Nielsen P. V. Temperature Distribution in a Displacement Ventilated Room. ROOMVENT '96. *Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms*. Yokohama, Japan, July 17–19, 1996, vol. 3, pp. 323–330. ISBN: 4-924557-01-3.
4. Brohus H., Ryberg H. The Kappa Model — a Simple Model for the Approximate Determination of Vertical Temperature Distribution in Rooms / Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1999.
5. Kang M., Yan Y., Guo C., Liu Y., Fan X., Wargocki P., Lan L. Ventilation causing an average CO₂ concentration of 1,000 ppm negatively affects sleep: A field-lab study on healthy young people. *Building and Environment*, 2024, vol. 249, 111118.
6. Bale R., Murga A., Yamamoto H., Tsubokura M. Impact of Airflow Rate and Supply-Exhaust Configuration

on Displacement Ventilation in Airborne Pathogen Removal. *Sustainability*, 2025, vol. 17 (18), 8193.

7. Jendrossek S. N., Jurk L. A., Remmers K., Cetin Y. E., Wolfgang S., Kriegel M., Gastmeier P. The Influence of Ventilation Measures on the Airborne Risk of Infection in Schools: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, vol. 20 (4), 3746.

8. Shen J., Chen Y., Rajagopal K. H. Enhancing Indoor Environmental Quality and Sustainability in Post-Pandemic Office Settings: A Study on Displacement Ventilation Feasibility. *Buildings*, 2023, vol. 13 (12), 3110.

9. Shil'krot E. O. Vytesnyayushchaya ventilyatsiya v neproizvodstvennykh zdaniyakh [Displacing ventilation in non-production buildings]. AVOK Publ., 2003, no. 1, pp. 22–28.

10. Zel'dovich Ya. B. Predel'nye zakony svobodno voskhodyashchikh konvektivnykh potokov [Limit laws of free ascending convective flows]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1937, vol. 7, iss. 12, pp. 1463–1465.

11. Ren S., Tian S., Meng X. Comparison of Displacement Ventilation, Mixing Ventilation and Underfloor Air Distribution System. *Proceedings of International Conference on Architectural, Civil and Hydraulics Engineering*. Guangzhou City, China, 28–29 November 2015. Atlantis Press, 2015, pp. 79–82. DOI 10.2991/icache-15.2015.16.

12. Kanaan M., Amine S., Hanna E. Y. G. Computational Simulation and Analysis of Local Thermal Comfort and Indoor Air Quality in Space with Displacement Ventilation. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2024, vol. 14 (5), pp. 16383–16388.

13. Chow K., Holdo A. E. On the influence of boundary conditions and thermal radiation on predictive accuracy in numerical simulations of indoor ventilation. *Building and Environment*, 2010, vol. 45 (2), pp. 437–444.

14. Wirilyasart S., Naphon P. Numerical study on air ventilation in the workshop room with multiple heat sources. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2019, vol. 13, 100405.

15. Park H., Yoo S.-J., Kuga K., Sumiyoshi E., Harashima H., Ito K. Impact of human micro-movements on breathing zone and thermal plume formation. *Building and Environment*, 2024, vol. 264, 111916.

16. Turner J. S. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge University Press, 1973, 367 p.

17. Denisikhina D. M., Aver'yanov V. K., Tsygankov A. V. Raschet vozdukhooobmena i vozdukhoraspredeleniya v ob'eme zritel'nykh zalov teatrov [Calculation of air exchange and air distribution in the volume of auditoriums of theaters]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 2024, no. 3, pp. 23–28.

18. Denisikhina D. M. Chislennoe issledovanie zakonomernostey raspredeleniya SO₂ v obshchestvennykh zdaniyakh [Numerical study of the patterns of SO₂ distribution in public buildings]. *Innovatsii i investitsii – Innovation and investment*, 2023, no. 5, pp. 368–372.

19. Ascione F., Rossi F., Iovane T., Mastellone M. Microclimatic control of a fourteenth-century Church in Italy: The design of systems by experiments and simulations. *Energy and Buildings*, 2023, vol. 293 (12), 113199.

20. Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A new $k - \epsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 1995, vol. 24 (3), pp. 227–238.

21. Skistad Kh. (red.), Mundt E., Nil'sen P., Khagstrem K., Raylio Y. Vytesnyayushchaya ventilyatsiya v neproizvodstvennykh zdaniyakh. Spravochnoe rukovodstvo REHVA [Displacing ventilation in non-production buildings. REHVA Reference Manual]. 2-nd ed., revised. Moscow, AVOK-press Publ., 2006, 104 p.