



УДК 628.87:004.94

С. Г. САИЯН¹, науч. сотр. НОЦ КМ им. А. Б. Золотова; А. М. ЕФИМОВА²,
вед. инженер-исследователь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА СКЛАДА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ШАТРОВОГО ТИПА

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Россия, 129337, г. Москва, ул. Ярославское ш, д. 26.

Эл. почта: berformert@gmail.com

²ООО «Центр Перспективных Технологий ТМХ»

Россия, 121205, г. Москва, тер. Сколково Инновационного центра, ул. Нобеля, д. 7.

Эл. почта: sasha.basket.8@yandex.ru

Ключевые слова: численное моделирование, конвективный теплообмен, микроклимат помещений, внутренняя аэродинамика, воздушное отопление, теплопотери, конструкции шатрового типа, *ANSYS Fluent*.

Методы вычислительной гидрогазодинамики широко применяются при решении задач внутренней аэродинамики, в частности, для расчетов микроклиматических характеристик в помещениях различного типа с целью исследования и оптимизации систем воздушного отопления. Цель настоящей работы заключается в численной оценке требуемой тепловой мощности оборудования для поддержания необходимых параметров микроклимата склада сыпучих материалов шатрового типа в зимних условиях на основе трехмерного CFD-моделирования внутреннего конвективного теплообмена, выполненного в программном комплексе ANSYS Fluent в стационарной RANS-постановке с постоянными теплофизическими свойствами. Получены интегральные характеристики воздушной среды (средняя температура, скорость и избыточное статическое давление), по потокам тепла через границы вычислены удельные вклады и суммарные теплопотери ограждающих конструкций. Данные результаты позволяют оценить требуемую тепловую мощность теплогенераторного оборудования при принятых параметрах системы, а также дают основания к дальнейшей оптимизации и разработке принципиальных схем теплоснабжения и размещения вентиляционных каналов.

Введение

Шатровые склады для сыпучих материалов – это большепролетные сооружения с металлической несущей системой и облегченными ограждающими конструкциями, где эксплуатационная надежность и энергоэффективность напрямую зависят от правильно организованного микроклимата [1, 2]. Для таких помещений ключевыми являются:

- поддержание положительной температуры в рабочей зоне при экстремально низких наружных температурах;
- исключение локальной конденсации и обмерзания ограждений;
- минимизация стратификации температуры и застойных зон;
- обеспечение безопасной эксплуатации теплогенерирующего и транспортного оборудования;



- ограничение избыточного давления, возникающего при воздушном отоплении;
- рационализация теплопотерь через элементы ограждающих конструкций (прежде всего через покрытие).

Рассматриваемый объект – склад сыпучих негорючих материалов, который относится к помещениям с пониженной пожарной опасностью категории Д (негорючие вещества в холодном состоянии) [3, 4], что предопределяет приемлемые схемы теплоснабжения и требования к температурным режимам.

В отношении складских зданий действуют следующие ключевые нормативные положения:

- СП 57.13330 [5] / СП 56.13330 [6] предписывают принятие температуры, относительной влажности и скорости воздуха по требованиям технологии хранения и СП 60.13330 [7]. Проектные параметры микроклимата задаются от технологических карт хранения груза и уточняются нормами ОВК;

- СП 60.13330 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [7]: для производственных и складских помещений категорий Г и Д без выделения пыли и аэрозолей допустимы воздушные системы; также допускаются водяные/паровые с температурой теплоносителя: вода ≤ 115 °С, пар ≤ 130 °С, а для встроенных в ограждения водяных систем ≤ 50 °С; возможны электрические или газовые системы с ГИИ. Кроме того, п. 5.2 разрешает в нерабочее время снижать температуру воздуха в помещениях до значений не ниже +5 °С (для производственных), что важно для режимов ожидания и расчета мощности в пиковых наружных условиях;

- 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [3] и СП 12.13130 [4] закрепляют склады негорючих материалов в холодном состоянии под категорией Д, что влияет на выбор систем отопления и допустимые температуры теплоносителя;

- Климатические исходные данные для района строительства задаются по СП 131.13330 «Строительная климатология» [8], что определяет расчетные внешние воздействия и, как следствие, требуемую тепловую мощность отопительных приборов.

Практика проектирования систем ОВиК применяет многоуровневый набор методов решения задачи расчета микроклимата и теплового баланса в помещениях различного назначения, а также в транспортных средствах. Среди основных можно выделить следующие:

1. Инженерный нормативный теплотехнический анализ (тепловые балансы для ограждений и инфильтрации, расчет требуемой мощности и кратностей воздухообмена), который позволяет получать оценочные решения, однако не учитывает аэродинамическую сложность купольных сооружений [9–11].

2. Натурные исследования (полевые измерения) обеспечивают валидацию результатов, но при этом более затратны и осуществляются после выбора оборудования [12–15].

3. Физические (модельные) испытания имеют ограниченную применимость, связанную с масштабными тепловыми и турбулентными эффектами, а также сложными геометрическими формами сооружений [16, 17].

4. Численное (CFD) моделирование наиболее информативный подход при прогнозировании параметров микроклимата в помещениях нетипового (нестандартного) исполнения [18–22]. Современные постановки решают



трехмерную систему уравнений Навье-Стокса, неразрывности и энергии с учетом конвекции, теплопроводности, диссипации и, при необходимости, теплового источника/стока. На практике, из-за ограничений по вычислительным ресурсам, применяются осредненные по времени постановки (*RANS*-подходы) с моделями турбулентности от двухпараметрических (k - ϵ , k - ω *SST*, k - ω *GEKO*) до *RSM/EARSM* [23–27] для корректного предсказания вторичных течений и рециркуляций; дискретизация – методом конечных объемов.

Перспективность применения методов численного моделирования для купольных складов обусловлена выраженной температурной стратификацией, мощными рециркуляционными потоками под сводом, а также значительными тепловыми потерями через покрытие. Методы вычислительной гидрогазодинамики позволяют:

- локализовать застойные зоны и скорректировать схему подачи воздуха (высота и направление сопел, распределение по периметру), способствуя тепловой дестратификации;
- поэлементно разложить тепловые потери (пол, стены, окна, покрытие) и ранжировать мероприятия по утеплению и герметизации;
- оценить избыточное давление и подобрать вытяжные устройства (в т. ч. кровельные) для устойчивого баланса притока/вытяжки;
- выполнять многовариантные параметрические исследования;
- подготовить цифровой прототип для последующей валидации и моделирования сценариев эксплуатации.

Цель настоящей работы – на основе методов численного моделирования оценить требуемую тепловую мощность и характеристики воздушного отопления для поддержания требуемых параметров микроклимата в шатровом складе сыпучих негорючих материалов при условно неблагоприятных наружных условиях. Предлагается методика численного моделирования внутреннего конвективного теплообмена, основанная на усовершенствованной *RANS*-модели турбулентности *WJ-BSL-EARSM* [27, 28]. Применение данной модели позволяет достоверно учитывать анизотропию турбулентных напряжений, вторичные течения и зоны сложной циркуляции воздуха, что обеспечивает более точное воспроизведение полей скорости и температуры по сравнению с традиционными линейными моделями. Такой подход повышает надежность прогноза теплового режима внутри склада при различных климатических и технологических условиях.

Представленные результаты служат основанием для подбора мощности теплогенераторного оборудования и схемы воздухообмена, соответствующих эксплуатационным и нормативным требованиям, а также энергоэффективности складских помещений.

Методы исследования

В текущей работе Объектом исследования является склад сыпучих материалов, конструкция которого представляет собой несущую систему с радиальными и кольцевыми стальными балками, обшитыми стальными гофро-листами (рис. 1).

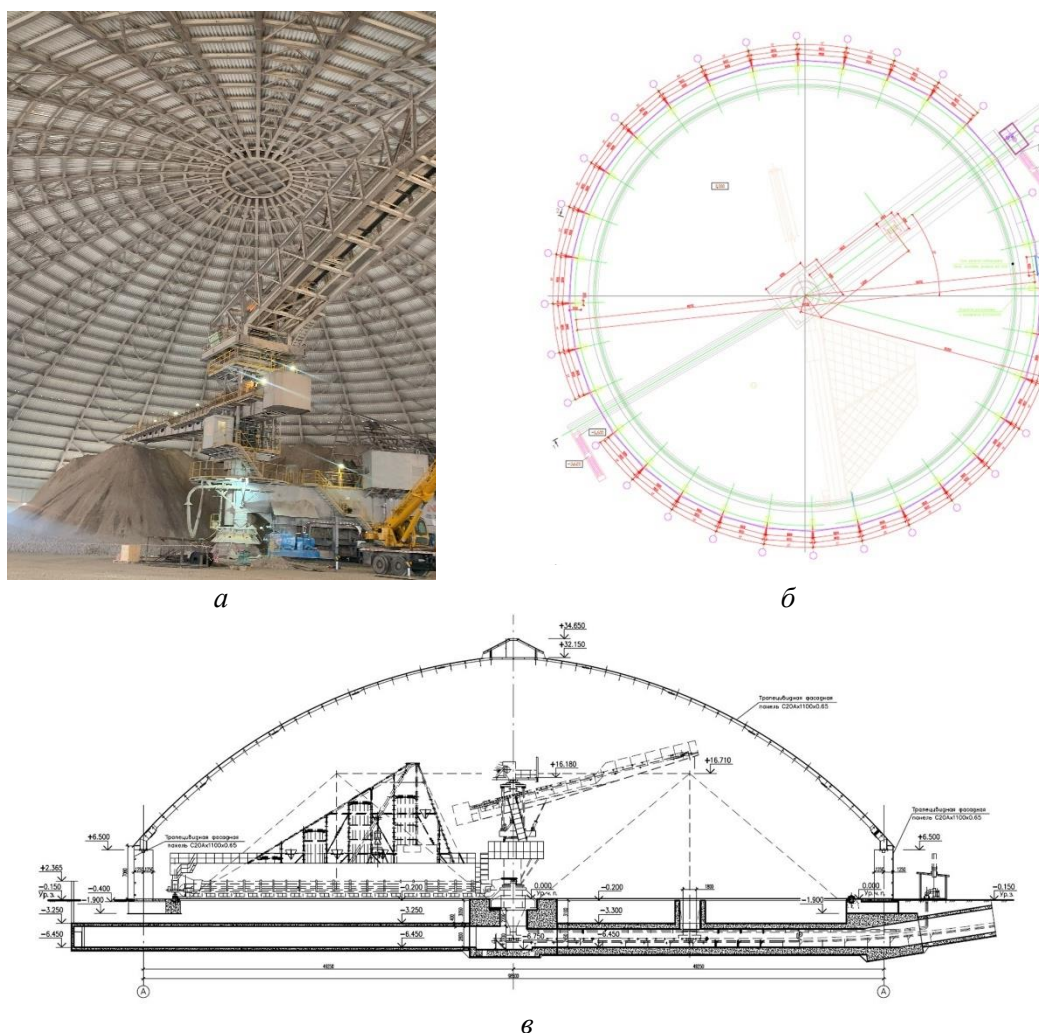


Рис. 1. Объект исследования: *а* – фотография; *б* – план; *в* – разрез

Климатические условия для проектирования сооружений устанавливаются в соответствии с СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» [8]. Расположение Объекта исследования соответствует следующим климатическим параметрам:

- снеговой район – III;
- ветровой район – Ia;
- минимальная температура – -35°C ;
- максимальная температура – $+34^{\circ}\text{C}$.

Трехмерная геометрическая модель склада сыпучих материалов, согласно исходным данным, разрабатывалась в ПК *ANSYS SpaceClaim* (рис. 2).

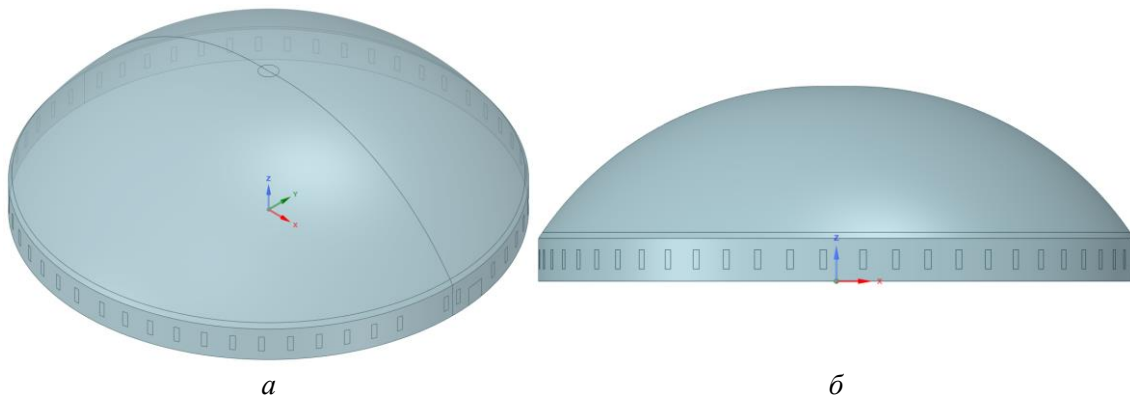


Рис. 2. Трехмерная геометрическая модель Объекта исследования в ПК ANSYS SpaceClaim: а – изометрическая проекция; б – вид сбоку

Математическое моделирование сопряженного тепломассообмена сводится в общем случае к численному решению системы трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики (1) – (3) с учетом уравнений теплофизики (4) – (5) [23, 24, 28, 29]:

– уравнения Навье-Стокса:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\zeta \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \rho F_i, \quad (1)$$

где u_i – компоненты вектора скорости потока [м/с]; t – время, [с]; p – давление, [Па]; ρ – плотность воздуха, [кг/м³]; η – коэффициент динамической вязкости воздуха, [Па·с]; ζ – объемный коэффициент вязкости, [Па·с]; F_i – компоненты вектора массовой силы F , [м/с²]; δ_{ik} – символ Кронекера.

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (2)$$

– уравнение состояния идеального газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (3)$$

где V – объем газа, [м³]; m/M – количество вещества; T – температура, [K]; $R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, [Дж/моль·K].

– закон сохранения энергии:

$$\underbrace{\frac{\partial (\rho E)}{\partial t}}_{\text{нестационарность}} + \underbrace{\nabla (\vec{u} (\rho E + p))}_{\text{конвекция}} = \nabla \left(\underbrace{k_{eff} \nabla T}_{\text{теплопроводность}} - \underbrace{\sum_j h_j J_j}_{\substack{\text{диффузия} \\ \text{компонентов}}} + \underbrace{\tau_{eff} \vec{u}}_{\substack{\text{вязкостная} \\ \text{диссипация}}} \right) + \underbrace{S_h}_{\text{энthalпия} \text{ источник/сток}} \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена с учетом теплопроводности (дифференциальное уравнение конвективного теплообмена Фурье-Кирхгофа) может быть интерпретировано следующим образом [18, 28]:

$$\rho \cdot c \left(\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{нестационарность теплообмена}} + \underbrace{(\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) T}_{\text{конвекция}} \right) = \underbrace{\text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T))}_{\text{теплопроводность}} + \underbrace{q_v}_{\text{внутренний источник теплоты}} + \underbrace{\mu \cdot \Phi}_{\text{диссипация}} - \underbrace{p \cdot \text{div}(\vec{u})}_{\text{тепловое расширение/сжатие}} \quad (5)$$

Прямое решение уравнений сопряженного теплообмена с учетом вихрей всех масштабов (*DNS*, *Direct Numerical Simulation*) при современных возможностях ЭВМ практически реализуемо только для очень малых скоростей потока и чисто исследовательских задач. Для решения практических наукоемких инженерных задач в современной расчетной практике преобладает применение подхода *RANS/URANS*, система уравнений которого принимает следующий вид [23, 24]:

– осредненные по времени уравнения Навье-Стокса:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{\rho u'_i u'_j})}{\partial x_j}; \quad (6)$$

– осредненное по времени уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (7)$$

где \bar{p} – осредненное по времени давление, [Па]; индексы $i = 1, 2, 3$ и $j = 1, 2, 3$ соответствуют координатам x, y, z . Напряжения Рейнольдса $\overline{u'_i u'_j}$ – дополнительные 6 неизвестных к параметрам осредненного движения воздушных масс.

В текущем исследовании замыкание системы разрешаемых уравнений осуществляется путем моделирования турбулентности *RANS*-подходом *WJ-BSL-EARSM*, относящегося к группе явных алгебраических моделей рейнольдсовых напряжений [27, 28], способствующим корректному расчету траектории движения воздушных масс совместно с моделированием тепловых эффектов и механизмов теплопереноса.

ANSYS Fluent реализует численное решение уравнений гидрогазодинамики и теплообмена методом конечных объемов (МКО) [28]. Интегральное представление законов сохранения (массы, импульса и энергии) обеспечивает их соблюдение как локально в каждом контрольном объеме, так и глобально во всей расчетной области в целом. Расчетная сетка формирует совокупность конечных объемов, центры которых содержат узлы со значениями вычисляемых неизвестных в процессе расчета.

Конечно-объемная сетка разрабатывалась в ПК *ANSYS Fluent Meshing*. С целью повышения точности в зонах у стен (*wall*) использованы пристеночные призматические слои сетки. Размерность расчетной конечно-объемной сетки составляет ~ 500 тыс. ячеек и принята исходя из проведенного исследования сеточной независимости результатов (температуры и скорости потока) в контрольных точках мониторинга. Конечно-объемная модель и ее параметры приведены на рис. 3 и в табл. 1 соответственно.

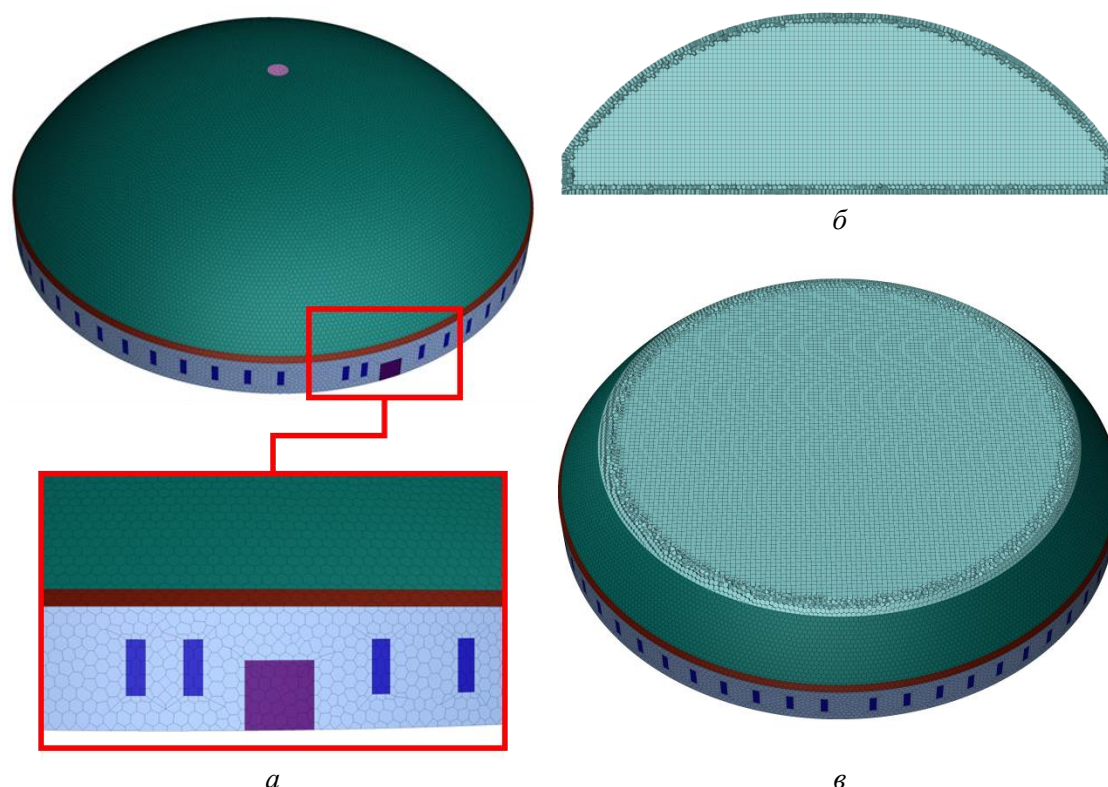


Рис. 3. Конечно-объемная сетка: *а* – поверхностная сетка; *б, в* – объемная сетка

Таблица 1

Параметры конечно-объемной сетки

Параметр		Значение
Поверхностная сетка	Минимальный размер	0,8 м
	Максимальный размер	0,8 м
	Скорость роста	1,2
Призматические слои	Количество слоев	3
	Коэффициент перехода	0,272
	Скорость роста	1,2
Объемная сетка	Минимальный размер	0,4 м
	Максимальный размер	0,8 м
	Переходный слой	2
	Метод генерации	<i>Poly-hexcore</i>

Точность и достоверность численного моделирования, наряду с сеточной дискретизацией, в значительной степени определяются корректностью граничных и начальных условий, а также обоснованным выбором параметров модели, обусловленных постановкой задачи (табл. 2, рис. 4).



Таблица 2

Параметры расчетной модели

Параметр	Описание		Значение
Граничные условия (рис. 4)	На входе в расчетную область (<i>inlet</i>)	Массовый расход	60 кг/с
		Температура	60°C
		Интенсивность турбулентности	1 %
		Характерный масштаб турбулентности	1 м
	На выходе из расчетной области (<i>outlet</i>)	Дополнительное давление	0 Па
		Отсутствие обратного потока	<i>Prevent reverse flow</i>
	На стенках (<i>wall</i>)	Прилипание потока (<i>no slip wall</i>)	$u_x = u_y = u_z = 0$ м/с
		Температура покрытия (кровли), стен и окон склада (равна температуре наружного воздуха)	-35°C
		Температура пола склада	0°C
		Плотность теплового потока на стенке въезд (условие теплоизолированной стенки)	0 Вт/м ²
Начальные условия	Гибридная инициализация	Поле скорости	$\nabla^2 \varphi = 0$
		Условие на стенке	$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right _{\text{стенка}} = 0$
		Условие на входе	$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right _{\text{inlet}} = V_{\perp}$
		Условие на выходе	$\varphi = 0$
		Поле давления	$\nabla^2 P = 0$
	Воздушный домен	Температура воздуха	-35°C
		Статическое давление	1 атм.
Свойства среды	Сжимаемый воздух	Модель идеального газа	$\rho = \frac{p_{op} + p}{\frac{R}{M_w} T}$

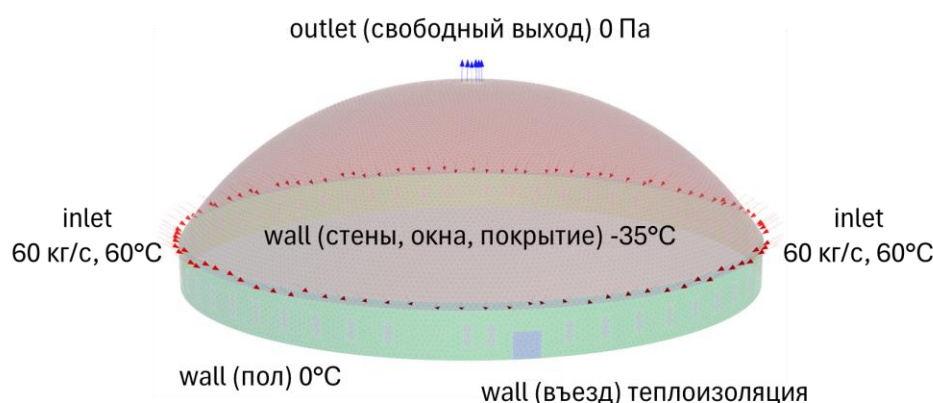


Рис. 4. Граничные условия

Численный аэродинамический расчет конвективного теплообмена осуществлялся в трехмерной стационарной *RANS*-постановке с параметрами моделирования, приведенными в табл. 3.

Таблица 3

Параметры численного расчета

Параметр	Описание
Решатель	Основанный на решении уравнения для давления (<i>Pressure based</i>)
Численная схема	Связанный алгоритм (<i>Coupled</i>)
Пространственная дискретизация	Неявная формулировка второго порядка (<i>Implicit second-order upwind</i>)
Количество итераций	500

В данном расчете сопряженный теплоперенос в ограждающих конструкциях моделируется упрощенно – граничное условие конвективного теплообмена (или условие первого рода с заданной температурой) учитывает теплофизические свойства и толщину покрытия без существенного влияния на искомые интегральные показатели микроклимата.

Результаты

В результате расчетного исследования внутреннего конвективного теплообмена складского помещения сыпучих материалов шатрового типа получены изополя средних скоростей (рис. 5а), избыточного давления (рис. 5б), температуры (рис. 5в, 5г) и векторное поле скоростей (рис. 5д) воздушных потоков в вертикальной плоскости симметрии, а также трехмерные линии тока в объеме расчетной области (рис. 5е).

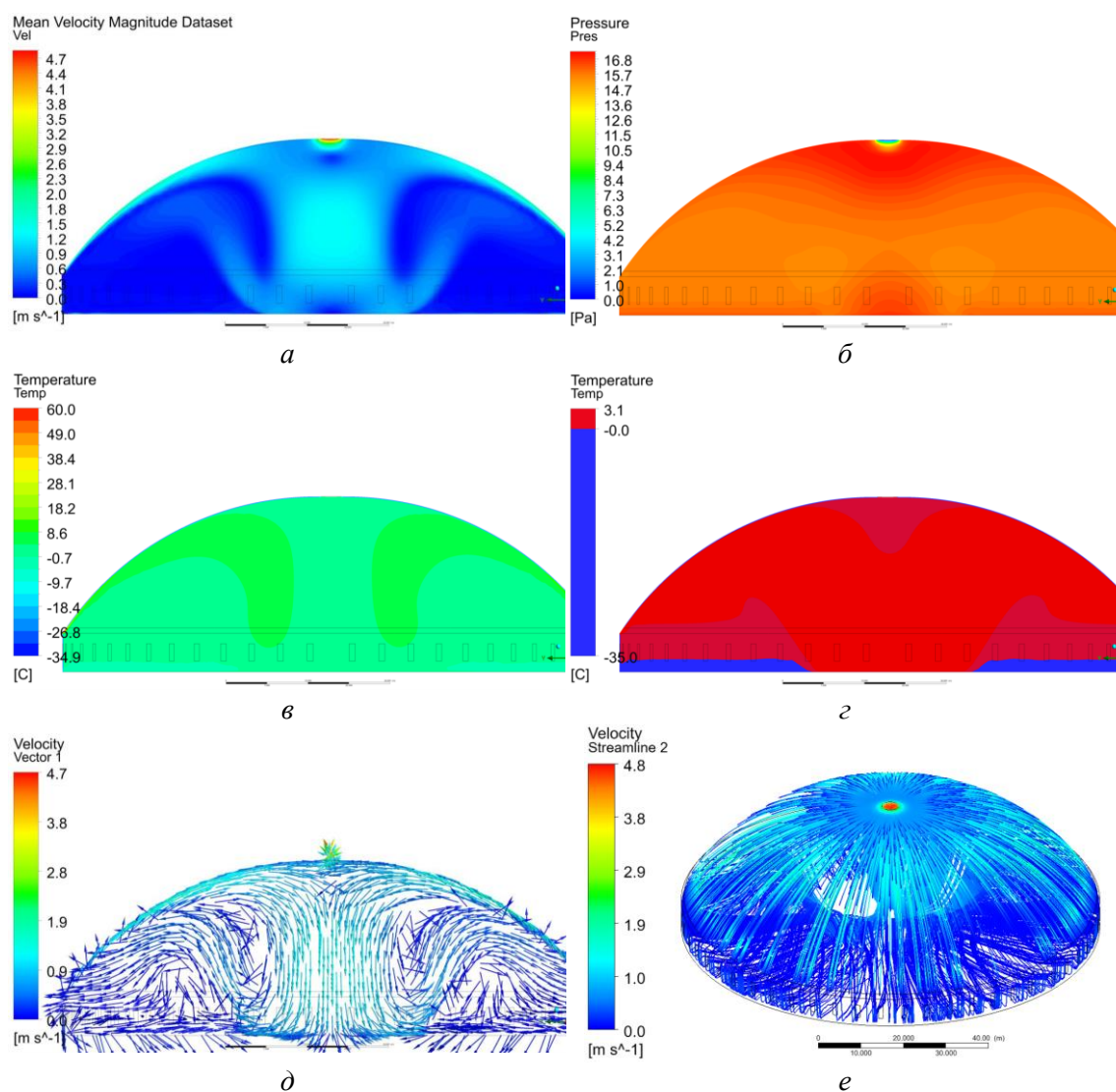


Рис. 5. Результаты CFD-моделирования: а – средняя скорость, м/с; б – статическое давление, Па; в, г – температура, °С; д – векторное поле скоростей, м/с; е – трехмерные линии тока, м/с

Для количественной оценки результатов определены теплотопотери через границы воздушного домена и средние интегральные параметры воздушной среды, представленные в табл. 4 и 5 соответственно.

Таблица 4

Теплотопотери через ограждающие конструкции

Наименование ограждающей поверхности	Теплотопотери, Вт
Пол	1 919
Окна	-24 938
Покрытие	-3 240 768
Стены	-277 516
Сумма	-3 541 303



Таблица 5

Средние интегральные теплофизические характеристики среды

Параметр	Значение
Средняя температура воздуха, °С	3,13
Средняя скорость воздуха, м/с	0,30
Среднее избыточное давление, Па	15,79

Из расчетного анализа результатов установлено, что теплотери через стены составляют -277516 Вт, что в 11,68 раз ниже теплотерь через покрытие, которое составляет -3240768 Вт (табл. 4), в связи с чем отсутствует целесообразность в утеплении стен. Теплоизоляция покрытия положительно скажется на тепловом балансе помещения, минимизируя теплотери через крышу. Это приводит к снижению необходимой мощности теплогенератора и, следовательно, уменьшению энергопотребления для поддержания заданной температуры внутри помещения. Однако применение дополнительного утеплителя увеличивает вес покрытия, что приведет к повышенной нагрузке на кровлю; требуется расчетный анализ несущей способности с целью недопущения перегруза конструкций.

Для поддержания необходимого температурного режима в помещении рекомендуется принять характеристики системы обогрева теплогенераторами с подачей тепла через вентиляционные каналы не ниже приведенных в табл. 2 и на рис. 4 в качестве граничных условий *Inlet* для численного моделирования – массовый расход не ниже 60 кг/с и температура поступающего воздуха не ниже 60 °С, а также суммарной мощностью оборудования не ниже 3 541 303 Вт (табл. 4).

С целью эффективного удаления нагнетаемого воздуха и снижения избыточного давления в воздушной среде рекомендуется установить систему принудительной вентиляции на кровлю исследуемого Объекта. Повторный расчетный анализ после подбора теплогенераторного оборудования и разработки принципиальных схем расположения вентиляционных каналов позволит уточнить теплофизические характеристики среды внутри складского помещения.

Выводы

На основе проведенного численного моделирования конвективного теплообмена на складе сыпучих материалов шатрового типа можно сделать следующие выводы:

1. Разработана трехмерная аэродинамическая модель склада сыпучих материалов шатрового типа в стационарной постановке, учитывающая процессы теплообмена во внутренней среде.

2. Рассчитан вклад ограждающих конструкций (стены, покрытие, окна и пол) в общие теплотери: кровля -3 240 768 Вт ($\approx 91,41\%$), стены -277 516 Вт ($\approx 7,84\%$), окна -24 938 Вт ($\approx 0,70\%$), пол +1 919 Вт ($\approx 0,05\%$); суммарно -3 541 303 Вт.

3. Для поддержания требуемой неотрицательной температуры воздуха внутри помещения при принятых условиях необходима тепловая мощность не менее 3,541 МВт (равная суммарным теплотерям воздушного домена при заданных фиксированных температурах ограждений).

4. При расчетных параметрах притока $\dot{m} = 60$ кг/с, $T_{in} = 60^\circ\text{C}$ достигаются средние интегральные параметры воздушной среды: $T_{cp} = 3,13^\circ\text{C}$, $u_{cp} = 0,30$ м/с, $\Delta p_{cp} = 15,79$ Па.



5. Для эффективного удаления нагнетаемого воздуха и снижения избыточного давления целесообразна организация кровельной вытяжки (последующий расчет с учетом ее расхода позволит уточнить тепловой баланс и требуемую мощность оборудования).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кувшинов, Ю. Я. Основы обеспечения микроклимата зданий : учебник для вузов / Ю. Я. Кувшинов, О. Д. Самарин. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2012. – 200 с. – ISBN 978-5-93093-883-8.
2. Гаврилкин, В. П. Основы проектирования систем кондиционирования воздуха / В. П. Гаврилкин. – Астрахань : [б. и.], 2010. – 578 с.
3. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2008 № 123-ФЗ : [принят Государственной Думой 4 июля 2008 года : одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года] : [редакция от 25.12.2023]. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.
4. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : свод правил : утвержден и введен в действие Приказом МЧС России от 25 марта 2009 г. № 182 : дата введения 2009-05-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156?ysclid=mizojmcp3r891595273>. – Текст : электронный.
5. СП 57.13330.2011. Складские здания : свод правил : актуализированная редакция СНиП 31-04-2001* : дата введения 20.05.11. – URL: <https://propb.ru/library/baza/svody-pravil/svod-pravil-skladskie-zdaniya-aktualizirovannaya-redaktsiya-snip-31-04-2001-sp-57-13330-2011-ot-30-1/?ysclid=mizp2lbbnp874094759>. – Текст : электронный.
6. СП 56.13330.2021. Производственные здания : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 27 декабря 2021 г. № 1024/пр : дата введения 28 января 2022 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/728193558?ysclid=mizpc8dko8532547966>. – Текст : электронный.
7. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. N 921/пр : дата введения 1 июля 2021 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573697256?ysclid=mizpnwj4tv208060618>. – Текст : электронный.
8. СП 131.13330.2020. Строительная климатология : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2020 г. N 859/пр : дата введения 25 июня 2021 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358?ysclid=mizpsmjtr332580403>. – Текст : электронный.
9. Sargsyan, S. V. The effect of the aerodynamics of indoor air flows on the power of the heating system / S. V. Sargsyan, V. V. Agafonova // Construction Materials and Products. – 2025. – Vol. 8, No. 1. – 12 с.
10. Саргсян, С. В. Поддержание требуемых параметров микроклимата неотапливаемых частей зданий за счет организации переточного воздушного отопления / С. В. Саргсян, В. Ю. Кравчук // Вестник МГСУ. – 2023. – Том 18, № 9. – С. 1433–1443.
11. Саргсян, С. В. Совершенствование инженерных методов расчета вентиляции крытой ледовой арены / С. В. Саргсян, В. Н. Варапаев, В. А. Борисова // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2019. – № 3 (207). – С. 74–79.
12. Buratti, C. Prediction of Indoor Conditions and Thermal Comfort Using CFD Simulations: A Case Study Based on Experimental Data / C. Buratti, D. Palladino, E. Moretti // Energy Procedia. – 2017. – № 126. – P. 115–122.



13. Numerical and Experimental Study on Ventilation Panel Models in a Subway Passenger Compartment / Y. Tao, M. Yang, B. Qian, F. Wu, T. Wang // Engineering. – 2019. – № 5 (2). – P. 329–336.
14. Thermal comfort assessment in civil aircraft cabins / P. Liping, Q. Yue, L. Dong, L. Meng // Chinese Journal of Aeronautics. – 2014. – № 27 (2). – P. 210–216.
15. Odabaş, I. Evaluation of Passenger Thermal Comfort for Two Different Underground Metro Station Typologies in Istanbul / I. Odabaş, N. Eskin // International Journal of Engineering and Technology Innovation. – 2025. – № 15 (2). – P. 152–166.
16. Саргсян, С. В. Методика лабораторных испытаний способов организации воздухообмена на физических моделях / С. В. Саргсян // Научное обозрение. – 2015. – № 16. – С. 76–79.
17. Саргсян, С. В. Исследование способов организации воздухообмена и систем воздухораспределения на физических моделях в лабораторных условиях / С. В. Саргсян // Научное обозрение. – 2015. – № 16. – С. 68–71.
18. Numerical Simulation of the Temperature Field of an Office Space with Three Types of Heating Systems / R. Akhverdashvili, A. Gulkanov, S. Saiyan, K. Modestov // Proceedings of FORM 2022. – 2022. – P. 477–488.
19. Konstantinov, M. Numerical Simulation of the Thermal Comfort in a Model of a Passenger Car Cabin / M. Konstantinov, C. Wagner // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. – 2016. – P. 383–393.
20. Sarna, I. CFD Modelling of Thermal Comfort in the Passenger Coach / I. Sarna, A. Palmowska // Architecture Civil Engineering Environment. – 2022. – № 4. – P. 133–146.
21. Numerical Investigation of Airflow Dynamics and Thermal Comfort in Space Station Habitats Under Microgravity Conditions / H. Aouinet, M. Dhahri, A. Yuksel, M. Arıcı, H. Sammouda // Aerotecnica Missili & Spazio. – 2025. – № 104 (4). – P. 1–12.
22. Hu, X. Improving Thermal Comfort in Aircraft Cockpit Based on Optimization of Supply Air Grille / X. Hu, Y. Liu // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 769 (4). – P. 1–9.
23. Белостоцкий, А. М. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. Учебное пособие / А. М. Белостоцкий, П. А. Акимов, И. Н. Афанасьева. – Москва : АСВ, 2017. – 720 с. – ISBN 978-5-4323-0217-5.
24. Дубинский, С. И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы : специальность 05.13.18 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дубинский Сергей Иванович ; Московский государственный строительный университет. – Москва, 2010. – 199 с.
25. Menter, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / F. R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – № 32 (8). – P. 1598–1605.
26. Menter, F. R. Best practice: generalized k- ω two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO) / F. R. Menter, R. Lechner, A. Matyushenko // ANSYS Germany GmbH. – 2019. – Том 107. – P. 108.
27. Wallin, S. An explicit algebraic Reynolds stress model for incompressible and compressible turbulent flows / S. Wallin, A.V. Johansson // J. Fluid Mech. – 2000. – Vol. 403. – P. 89–132.
28. Ansys Fluent Theory Guide. Release 2021 R2. – Canonsburg : ANSYS, Inc., 2021. – 1024 с.
29. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учебное пособие. В 10 томах. Том VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1986. – 736 с.



SAIYAN Sergey Gurgenovitch¹, researcher, scientific and educational center for computer modeling named after A. B. Zolotov; EFIMOVA Aleksandra Mikhailovna², leading research engineer

NUMERICAL SIMULATION OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN A TENT-TYPE BULK MATERIALS WAREHOUSE

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering.

26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Tel.: (958) 832-13-59; e-mail: berformert@gmail.com

²LLC «TMH Advance Technology Center»

7, Nobelya St., Scolkovo, Moscow, 121205, Russia.

E-mail: sasha.basket.8@yandex.ru

Key words: numerical simulation, convective heat transfer, indoor microclimate, indoor aerodynamics, warm-air heating, heat losses, tent-type structures, ANSYS Fluent.

Computational fluid dynamics methods are widely used to solve internal aerodynamics problems, particularly for calculating microclimatic characteristics in premises of various types to study and optimise air-heating systems. This study aims to numerically assess the thermal power required by equipment to maintain the necessary microclimate parameters of a tent-type bulk-materials warehouse under winter conditions, based on three-dimensional CFD-modeling of internal convective heat transfer carried out in the ANSYS Fluent software package in a steady RANS formulation with constant thermophysical properties. Integral characteristics of the air medium have been obtained (mean temperature, velocity, and excess static pressure). Based on the heat fluxes through the boundaries, the specific contributions and the total heat losses of the enclosing structures have been calculated. These results provide a basis for evaluating the thermal power required for the heat-generating equipment under the adopted system parameters, and also provide grounds for further optimization and for the development of principal schemes of heat supply and the placement of ventilation ducts.

REFERENCES

1. Kuvshinov Yu. Ya., Samarin O. D. Osnovy obespecheniya mikroklimata zdaniy [Fundamentals of Building Microclimate Provision]: uchebnik dlya vuzov. Moscow, Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2012, 200 p. ISBN 978-5-93093-883-8.

2. Gavrilkin V. P. Osnovy proektirovaniya sistem konditsionirovaniya vozdukha [Fundamentals of Air Conditioning System Design]. Astrakhan, 2010, 578 p.

3. Tekhnicheskiy reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti [Technical Regulations on Fire Safety Requirements]: federalny zakon Rossiiskoy Federatsii ot 22.07.2008 № 123-FZ : [prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 4 iyulya 2008 goda : odobren Sovetom Federatsii 11 iyulya 2008 goda] : [redaktsiya ot 25.12.2023]. URL: <http://www.consultant.ru>.

4. SP 12.13130.2009. Opredelenie kategorii pomeshcheniy, zdaniy i naruzhnykh ustanovok po vzryvopozharnoy i pozharnoy opasnosti [Determination of Categories of Premises, Buildings and External Installations for Explosion and Fire Hazard]: svod pravil: utverzhden i vveden v deystvie Prikazom MChS Rossii ot 25 marta 2009 g. № 182: data vved. 2009-05-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156?ysclid=mizojmcp3r891595273>.

5. SP 57.13330.2011. Skladskie zdaniya [Warehouse Buildings]: svod pravil : aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 31-04-2001* : data vvedeniya 20.05.11. URL: <https://propb.ru/library/baza/svody-pravil/svod-pravil-skladskie-zdaniya-aktualizirovannaya-redaktsiya-snip-31-04-2001-sp-57-13330-2011-ot-30-1/?ysclid=mizp2lbbnp874094759>.



6. SP 56.13330.2021. Proizvodstvennye zdaniya [Industrial Buildings]: svod pravil: utverzhden prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaistva Rossiiskoy Federatsii (Minstroy Rossii) ot 27 dekabrya 2021 g. № 1024/pr: data vvedeniya 28 yanvarya 2022 g. URL: <https://docs.cntd.ru/document/728193558?ysclid=mizpc8dko8532547966>.
7. SP 60.13330.2020. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha [Heating, Ventilation and Air Conditioning]: svod pravil: utverzhden prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaistva Rossiiskoy Federatsii ot 30 dekabrya 2020 g. N 921/pr : data vvedeniya 1 iyulya 2021 g. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573697256?ysclid=mizpnwj4tv208060618>.
8. SP 131.13330.2020. Stroitel'naya klimatologiya [Building Climatology]: svod pravil: utverzhden prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaistva Rossiiskoy Federatsii ot 24 dekabrya 2020 g. N 859/pr : data vvedeniya 25 iyunya 2021 g. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358?ysclid=mizpsmjtr332580403>.
9. Sargsyan S. V., Agafonova V. V. The effect of the aerodynamics of indoor air flows on the power of the heating system. Construction Materials and Products. 2025. Vol. 8, No. 1. 12 p.
10. Sargsyan S. V., Kravchuk V. Yu. Podderzhanie trebuemykh parametrov mikroklimata neotaplivayemykh chastei zdaniy za schet organizatsii peretochnogo vozdušnogo otopleniya [Maintaining Required Microclimate Parameters in Unheated Parts of Buildings by Organizing Overflow Air Heating]. Vestnik MGSU [Vestnik MGSU]. 2023, Vol. 18, № 9, P. 1433–1443.
11. Sargsyan S. V., Varapaev V. N., Borisova V. A. Sovershenstvovanie inzhenernykh metodov rascheta ventilyatsii krytoy ledovoy areny [Improvement of Engineering Methods for Calculating Ventilation of a Covered Ice Arena]. Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie [Plumbing, Heating, Air Conditioning]. 2019, № 3 (207), P. 74–79.
12. Buratti C., Palladino D., Moretti E. Prediction of Indoor Conditions and Thermal Comfort Using CFD Simulations: A Case Study Based on Experimental Data. Energy Procedia. 2017. № 126. P. 115–122.
13. Tao Y., Yang M., Qian B., Wu F., Wang T. Numerical and Experimental Study on Ventilation Panel Models in a Subway Passenger Compartment. Engineering. 2019. № 5 (2). P. 329–336.
14. Liping P., Yue Q., Dong L., Meng L. Thermal comfort assessment in civil aircraft cabins. Chinese Journal of Aeronautics. 2014. № 27 (2). P. 210–216.
15. Odabaş, I., Eskin N. Evaluation of Passenger Thermal Comfort for Two Different Underground Metro Station Typologies in Istanbul. International Journal of Engineering and Technology Innovation. 2025. № 15 (2). P. 152–166.
16. Sargsyan S. V. Metodika laboratornykh ispytaniy sposobov organizatsii vozdukhoobmena na fizicheskikh modelyakh [Methodology for Laboratory Testing of Air Exchange Organization Methods on Physical Models]. Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]. 2015, № 16, P. 76–79.
17. Sargsyan S. V. Issledovanie sposobov organizatsii vozdukhoobmena i sistem vozdushoraspredeleniya na fizicheskikh modelyakh v laboratornykh usloviyakh [Study of Air Exchange Organization Methods and Air Distribution Systems on Physical Models in Laboratory Conditions]. Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]. 2015, № 16, P. 68–71.
18. Akhverdshvili R., Gulkanov A., Saiyan S., Modestov K. Numerical Simulation of the Temperature Field of an Office Space with Three Types of Heating Systems. Proceedings of FORM 2022. 2022. P. 477–488.
19. Konstantinov, M., Wagner C. Numerical Simulation of the Thermal Comfort in a Model of a Passenger Car Cabin. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2016. P. 383–393.
20. Sarna, I., Palmowska A. CFD Modelling of Thermal Comfort in the Passenger Coach. Architecture Civil Engineering Environment. 2022. № 4. P. 133–146.



21. Aouinet H., Dhahri M., Yuksel A., Arıcı M., Sammouda H. Numerical Investigation of Airflow Dynamics and Thermal Comfort in Space Station Habitats Under Microgravity Conditions. *Aerotecnica Missili & Spazio*. 2025. № 104 (4). P. 1–12.
22. Hu, X., Liu Y. Improving Thermal Comfort in Aircraft Cockpit Based on Optimization of Supply Air Grille. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. № 769 (4). P. 1–9.
23. Belostotskiy A. M., Akimov P. A., Afanaseva I. N. *Vychislitelnaya aerodinamika v zadachakh stroitelstva* [Computational Aerodynamics in Construction Problems]. Uchebnoe posobie. Moscow, ASV, 2017, 720 p. ISBN 978-5-4323-0217-5.
24. Dubinskiy S. I. *Chislennoe modelirovanie vetrovykh vozdeystviy na vysotnye zdaniya i komplekсы* [Numerical Simulation of Wind Effects on High-Rise Buildings and Complexes]: spetsialnost 05.13.18 : diss. ... kand. tekhn. nauk; Moskovskiy gosudarstvennyy stroitelnyy universitet. Moscow, 2010, 199 p.
25. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994. № 32(8). P. 1598–1605.
26. Menter F. R., Lechner R., Matyushenko A. Best practice: generalized k- ω two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO). ANSYS Germany GmbH. 2019. Vol. 107. P. 108.
27. Wallin, S., Johansson A.V. An explicit algebraic Reynolds stress model for incompressible and compressible turbulent flows. *J. Fluid Mech.* 2000. Vol. 403. P. 89–132.
28. *Ansys Fluent Theory Guide*. Release 2021 R2. Canonsburg : ANSYS, Inc., 2021. 1024 p.
29. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika* [Theoretical Physics]: uchebnoe posobie. V 10 tomakh. Vol VI. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. 3-e izd., pererab. Moscow, Nauka, 1986, 736 p.

© С. Г. Саиян, А. М. Ефимова, 2025

Получено: 01.10.2025 г.