

УДК: 628.83

DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_337

EDN: WFGUKM



## Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата

Д.М. Денисихина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация:** Использование современных методов математического моделирования параметров микроклимата позволяет рассчитать воздухораспределение и определить необходимый воздухообмен для сложных вентиляционных течений в общественных зданиях, например в театрах, ледовых аренах, атриумах. В частности, методы вычислительной гидродинамики позволяют получить коэффициент воздухообмена для течений с одновременным действием свободной и вынужденной конвекции, то есть там, где классические методы не имеют решения. В то же время, для повышения уровня доверия к методам моделирования для задач вентиляции необходимо показать их достоверность. Цель работы: показать, что для классических схем вентиляционных течений применение методов математического моделирования параметров микроклимата дает те же результаты, что и классические методы расчета воздухообмена и воздухораспределения. Задачами исследования являются: выполнить математическое моделирование распределения температуры и скорости, формируемые в помещении для следующих схем воздухораспределения: подача воздуха наклонными струями, сверху вниз настилающимися на потолок струями, горизонтальными стесненными струями, в обслуживаемую зону низкоскоростными потоками; сравнить полученные данные с существующими зависимостями для нахождения коэффициента воздухообмена для различных схем воздухораспределения. Получено, что отличия в значениях коэффициента воздухообмена по температуре, полученными численным моделированием и наиболее точным из классических методов, составили от 2% до 5% в зависимости от схемы воздухораспределения.

**Ключевые слова:** вентиляция, воздухораспределение, коэффициент воздухообмена, CFD-моделирование, математическое моделирование параметров микроклимата

**Для цитирования:** Денисихина Д.М. Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 337-345, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_337, EDN: WFGUKM

## Calculation of the air exchange coefficient based on CFD-simulation methods

D.M. Denisikhina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**Abstract:** The use of modern methods of numerical simulation for investigation indoor air fields makes it possible to calculate the air distribution and determine the necessary air exchange for complex ventilation flows in public buildings, such as theaters, ice arenas, atriums. In particular, computational fluid dynamics methods make it possible to obtain the air exchange coefficient for flows with simultaneous action of free and forced convection, that is, where classical approaches have no solution. At the same time, in order to increase the validity level of

CFD-methods for ventilation purpose, it is necessary to show their reliability. The objectives of the study are to compare the results of using classical methods for calculating air exchange and the method of CFD simulation for various air distribution schemes: air supply by inclined jets, from top to bottom by jets spreading on the ceiling, horizontal constrained jets, into the occupied area with low-speed velocity. Results: it was found that the differences in the values of the air exchange coefficient by temperature obtained with numerical simulation and the most accurate of the classical methods ranged from 2% to 5%, depending on the air distribution scheme.

**Keywords:** ventilation, air distribution, air exchange coefficient, CFD-methods, numerical simulation of indoor air fields

**For citation:** Denisikhina D.M. Calculation of the air exchange coefficient based on CFD-simulation methods // News KSUAE, 2023, № 4(66), p. 337-345, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_337, EDN: WFGUKM

## 1. Введение

Проектирование систем вентиляции и кондиционирования воздуха для различных помещений непосредственно связано с расчетами воздухообмена и воздухораспределения.

Расчетом воздухораспределения и определением необходимого воздухообмена занимались ученые еще с 40-х годов прошлого века. При этом, решались две основные задачи:

1. Рассчитать расход приточного воздуха, который необходимо подать в помещение для ассимиляции имеющихся в нем тепло-, влажно- и газоизбытков;
2. Обеспечить не превышение допустимых значений скорости, перепада температуры в рабочей зоне при выбранных способах и средствах раздачи воздуха.

При этом можно выделить следующие классические методы расчета воздухообмена и воздухораспределения:

1. Воздухообмен рассчитывается исходя из предположения, что распределение параметров микроклимата в помещении равномерное по площади и высоте (метод №1, с 40-х г.г.).

2. Доказано, что есть связь между температурой, концентрацией вредных веществ в обслуживаемой зоне и уходящем воздухе. С учетом этой связи [1] находится величина требуемого воздухообмена. После этого проводится расчет воздухораспределения с определением параметров в струях (скоростей, температур, концентраций) на входе в обслуживаемую зону: метод расчета по опасной точке (метод №2, с 70-х г.г.).

3. Проведение совместного расчета воздухообмена и воздухораспределения, предложенного Г.М. Позиным [2]. При таком подходе в уравнения для расчета воздухообмена входят зависимости для температур, концентраций при выбранном способе воздухораспределения. Для поиска конечного решения проводится перебор по схемам воздухораспределения, количеству воздухораспределительных устройств в помещении и пр. (метод №3, с 90-х г.г.).

Таким образом, начиная с 70-х годов, для нахождения величины воздухообмена необходимо было задать связь между температурой в обслуживаемой зоне и на вытяжных устройствах. Поиску именно этой связи было посвящено большое число работ советских ученых.

Однако, в результате исследований, ученые пришли к выводу о том, что на распределение температуры воздуха по высоте помещения влияет огромное число факторов и поэтому вывести единую формулу не представляется возможным.

Поэтому в справочниках, пособиях для расчета вентиляции появляются значения коэффициентов воздухообмена, приведенные для конкретных схем и условий вентилирования помещений. Распространение данных значений на случаи, отличные от приведенных в литературе, могло приводить к существенным ошибкам в определении величины требуемого воздухообмена.

Кроме того, все исследованные варианты и, соответственно, указания по назначению коэффициента воздухообмена относились либо к течениям с преобладанием вынужденной, либо свободной конвекции. В силу своей сложности, не рассматривались варианты, когда общее течение определяется одновременным действием приточных и конвективных струй. А это имеет место для большого числа вентиляционных течений, где сосредоточенная подача воздуха соседствует с мощными свободно-конвективными струями, поднимающимися, например от массива зрителей, нагретых поверхностей теплого пола и т.д. А также, например, при совместном использовании вытесняющей и перемешивающей вентиляции, что характерно для таких объектов как театры, стадионы и т.д.

Поэтому расчет воздухообмена и воздухораспределения оставался нерешенной проблемой [3]

Развитие вычислительных методов, вычислительных ресурсов (кластеров, суперкомпьютеров) дало новую жизнь дифференциальным нелинейным уравнениям Навье-Стокса – стало принципиально возможным использование данных уравнений без упрощений для решения любого класса вентиляционных течений, в том числе и теоретически плохо изученных течений с одновременным действием приточных и конвективных струй.

В настоящее время методы математического моделирования распределенных параметров приобретают все большую популярность для решения задач воздухораспределения [4-6]. Методы численного моделирования активно используются для анализа распространения вредностей по объему помещений [7-9], анализа эффективности воздухообмена [10], исследования течений к вытяжным отверстиям и в самих вытяжных устройствах и воздуховодах [11-13]. Их использование для задач вентиляции большеобъемных помещений [14-16] с одновременным действием сил свободной и вынужденной конвекции дает существенное отличие в коэффициентах воздухообмена, взятых согласно классическим методам и полученным при CFD-моделировании.

Однако, для подтверждения правомерности использования методов математического моделирования распределенных параметров для задач вентиляции, необходимо показать достоверность получаемых с помощью них результатов.

Целью работы является подтверждение того, что для классических схем вентиляционных течений применение методов математического моделирования дает те же результаты, что и классические методы расчета воздухообмена и воздухораспределения.

Задачами исследования являются:

- выполнить математическое моделирование распределения температуры и скорости, формируемые в помещении для следующих схем воздухораспределения: подача воздуха наклонными струями, сверху вниз настилающимися на потолок струями, горизонтальными стесненными струями, в обслуживаемую зону низкоскоростными потоками;
- сравнить полученные данные с существующими зависимостями для нахождения коэффициента воздухообмена для различных схем воздухораспределения.

## 2. Материалы и методы

Уравнения сохранения (1)-(6), используемые в настоящей работе при CFD-моделировании и описывающие вентиляционные течения в объеме помещений, аналогичны [17].

Уравнение сохранения массы

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

уравнение сохранения импульса

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

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

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

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

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

уравнение сохранения энергии

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

где  $\vec{q}, \vec{q}_t$  – молекулярная и турбулентная составляющие вектора плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\vec{V}$  – скорость потока, м/с;  $\bar{I}$  – единичный тензор;  $t$  – время, с;  $S_r$  – источниковый член радиационного потока тепла, Вт/м<sup>3</sup>.

Для нахождения характеристик турбулентности необходимо использование той или иной модели турбулентности, например  $k$ - $\epsilon$ .

В общем случае система уравнений (1)-(5) дополняется уравнениями радиационного теплообмена [15]

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s}, \vec{s}')d\Omega' \quad (6)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор, м;  $\vec{s}$  – вектор направления излучения;  $\vec{s}'$  – вектор рассеяния;  $a$  – коэффициент поглощения, 1/м;  $\sigma_s$  – коэффициент рассеяния, 1/м;  $I$  – полная интенсивность излучения, зависящая от радиус-вектора и направления излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Phi$  – индикатриса рассеяния,  $\Omega'$  – телесный угол,  $\sigma$  – постоянная Стефана -Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Моделирование было выполнено с помощью вычислительного комплекса STAR-CCM+.

В работе были рассмотрены четыре классические схемы воздухораспределения:

- ✓ схема №1, подача воздуха сверху вниз настилающимися на потолок струями;
- ✓ схема №2, подача воздуха сверху вниз наклонными струями;
- ✓ схема №3, подача воздуха горизонтальными стесненными струями выше рабочей зоны при формировании обратного потока в обслуживаемой зоне;
- ✓ схема №4, подача воздуха в обслуживаемую зону низкоскоростными потоками.

В задачах было принято: суммарные явные тепловыделения от людей 300 Вт, температура приточного воздуха 21 °С. Расход приточного воздуха составлял 300 м<sup>3</sup>/ч для схем №1, №2 и №4. Для схемы №3 расход задавался равным 600 м<sup>3</sup>/ч. Размеры помещений и расход выбирались таким образом, чтобы сохранялась расчетная схема воздухораспределения для каждого из вариантов.

Для схем №1-№4 рассчитывался коэффициент воздухообмена по теплоте, которым принято оценивать взаимосвязь между параметрами удаляемого воздуха и нормируемыми параметрами в рабочей/обслуживаемой зоне:

$$k_L^t = \frac{t_{yx} - t_0}{t_{p.z} - t_0}, \quad (7)$$

здесь  $t_0$  – температура в приточном воздухе, °С;  $t_{p.z}$  – температура в рабочей/обслуживаемой зоне, °С;  $t_{yx}$  – температура удаляемого воздуха, °С.

При этом проводилось сравнение величин коэффициента воздухообмена, полученного при использовании методов №2, №3 и метода CFD-моделирования параметров микроклимата (Таблица 1). Метод №1 наиболее грубый и предполагает равенство коэффициента воздухообмена единице для любых вентиляционных течений, поэтому сравнению по нему не проводилось.

Для расчета методом CFD-моделирования была построена конечнообъемная расчетная сетка размерностью 2,1-3,5 млн. ячеек с измельчением в областях распространения струи, нахождения людей.

#### 4. Результаты и обсуждение

Расчёт коэффициентов воздухообмена для метода №3 выполнялся по формулам (8-11) [2] без привлечения методов численного моделирования :

1. подача воздуха сверху вниз настилающимися на потолок струями

$$k_L^t = \frac{\bar{L}_{стр} - \bar{Q}_{р.з} \bar{L}_{р.з} \left(1 - \frac{F_{стр}}{F_n}\right)}{\bar{L}_{стр} + \bar{Q}_{р.з} (1 - \bar{L}_{р.з}) \left(1 - \frac{F_{стр}}{F_n}\right) - 1}, \quad (8)$$

2. подача воздуха сверху вниз наклонными струями

$$k_L^t = \frac{\theta \bar{L}_{стр} - \bar{Q}_{р.з} \bar{L}_{р.з}}{\theta (\bar{L}_{стр} - 1) + \bar{Q}_{р.з} (1 - \bar{L}_{р.з})}, \quad (9)$$

3. подача воздуха горизонтальными стесненными струями выше рабочей зоны при формировании обратного потока в обслуживаемой зоне

$$k_L^t = 1 - \frac{1}{L_{кр}}, \quad (10)$$

4. подача воздуха в обслуживаемую зону низкоскоростными потоками

$$k_L^t = \frac{a \left[ \bar{L}_{стр.к} + \bar{L}_{р.з} (1 - \bar{Q}_{р.з}) \right] + \bar{L}_{р.з} (\bar{L}_{стр.к} + \bar{L}_{р.з} - 1) \bar{Q}_к}{a \left[ \bar{L}_{стр.к} - (1 - \bar{L}_{р.з}) (1 - \bar{Q}_{р.з}) \right] - (1 - \bar{L}_{р.з}) (\bar{L}_{стр.к} + \bar{L}_{р.з} - 1) \bar{Q}_к}. \quad (11)$$

Где  $\bar{L}_{стр} = \frac{L_{стр}}{L_0}$  - относительный условный расход воздуха в струе при входе в рабочую зону,  $L_0$  - расход приточного воздуха, м<sup>3</sup>/ч,  $\bar{L}_{р.з} = 0$  - расход воздуха, удаляемого из рабочей зоны помещения местными отсосами, общеобменной вентиляцией и на технологические нужды. Принимается, что при подаче охлажденного воздуха  $\theta = 1$ .  $\bar{Q}_{р.з}$  - доля избытков явной теплоты, поступающей в рабочую зону.  $\frac{F_{стр}}{F_n}$  - отношение площади струи при входе ее в рабочую зону к площади пола помещения, приходящейся на одну струю.  $\bar{L}_{кр} = \frac{L_{кр}}{L_0}$  - относительный расход воздуха во втором критическом сечении, где  $a = \max\{\bar{L}_к, 1 - \bar{L}_{р.з}\}$ ,  $\bar{L}_к$  - расход в конвективной струе над нагретым источником,  $\bar{L}_{стр.к}$  - относительный расход воздуха в приточной струе в конце пути ее развития в рабочей зоне. Результаты расчетов по формулам (8)-(11) приведены в Таблице 1.

Значения коэффициентов воздухообмена для метода №2 были взяты из [1], значения представлены в Таблице 1.

При выполнении численных исследований для схем течений №1-№4 коэффициенты воздухообмена были рассчитаны по формуле (7), где  $t_{р.з}$  бралось из обработки результатов моделирования (выполнялось осреднение полученного поля температур по обслуживаемой зоне). Схема течений для №1-№4, а также поля температуры, полученные при использовании CFD-моделирования, приведены на Рис. 1 Рис.4. Значения коэффициента воздухообмена, полученные из обработки распределения температуры по высоте помещения, представлены в Таблице 1.

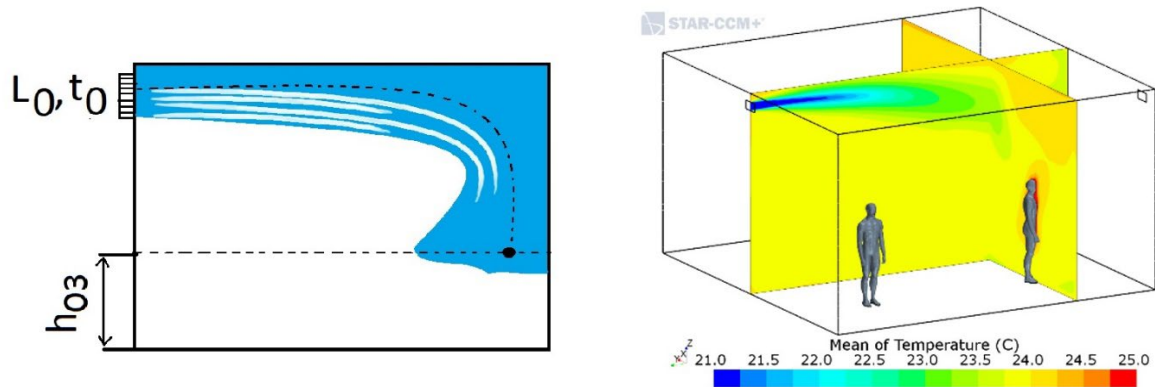


Рис.1. Подача воздуха сверху вниз настилающимися на потолок струями  
(иллюстрация авторов)

Fig.4 Air supply with jets spreading along the ceiling  
(illustration by the authors)

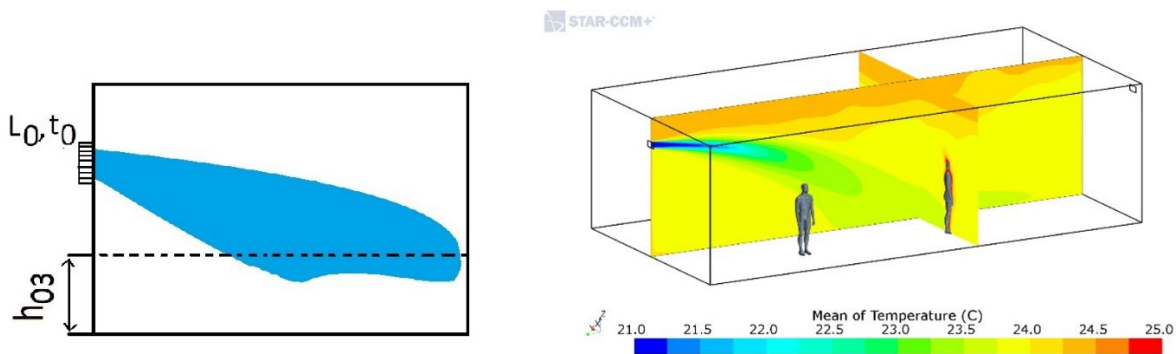


Рис.2. Подача воздуха сверху вниз наклонными струями  
(иллюстрация авторов)

Fig.2 Air supply with inclined jets  
(illustration by the authors)

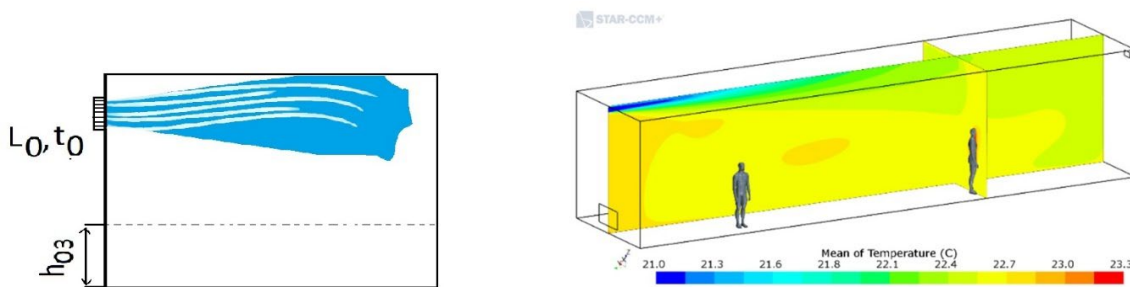


Рис.3. Подача воздуха горизонтальными стесненными струями выше рабочей зоны при формировании обратного потока в обслуживаемой зоне  
(иллюстрация авторов)

Fig.3 Air supply with horizontal jets above the occupied area while forming a reverse flow in the occupied area  
(illustration by the authors)

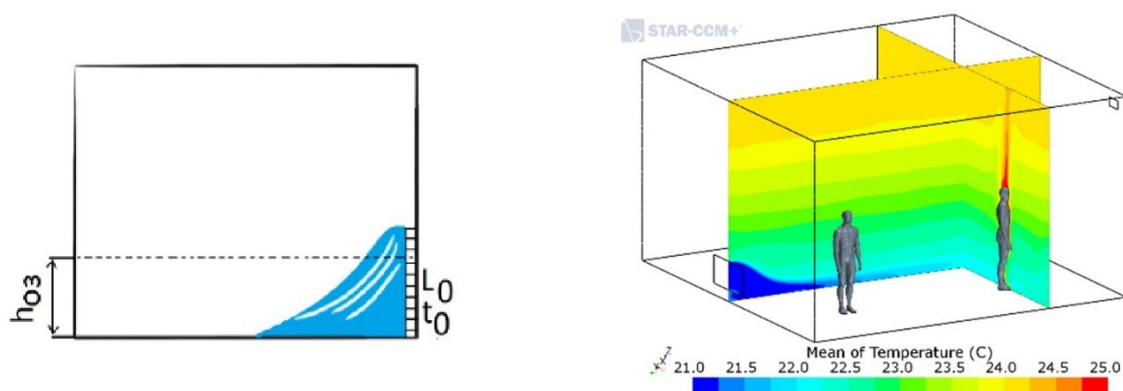


Рис.4. Подача воздуха в обслуживаемую зону низкоскоростными потоками  
(иллюстрация авторов)

Fig.4. Air supply to the occupied area with low velocity  
(illustration by the authors)

Получено, что для классических схем воздухораспределения значения коэффициентов воздухообмена ( $a$ , следовательно, и требуемый воздухообмен), полученные на основе классических методов и метода моделирования параметров микроклимата хорошо согласуются. При этом различие в результатах, полученных на основе метода CFD-моделирования и метода №3 (наиболее точного из классических методов) составляет не более 5%.

Различие между методом моделирования распределенных параметров (как и методом №2) с методом №1 для всех рассмотренных вариантов (кроме подачи воздуха непосредственно в рабочую зону) составляет менее 10%. Максимальное отличие при подаче воздуха непосредственно в рабочую зону связано с тем, что большее влияние в этом случае оказывает доля тепла, остающаяся в рабочей зоне и уходящая наверх, кроме того, в этом случае скорости в приточных струях и конвективных струях оказываются сравнимыми, что также затрудняет использование классических методов.

Таблица 1  
Значения коэффициентов воздухообмена для различных схем подачи воздуха

	сверху вниз настилающимися на потолок струями	сверху вниз наклонными струями	горизонтальными стесненными струями выше рабочей зоны	в обслуживаемую зону низкоскоростным и потоками
метод №2 (справочник проектировщика [1])	0,95	1,15	0,95	1,3
метод №3 (Г.М. Позин [2])	1,05	1,06	0,90	1,74
CFD- моделирование	1,01	1,04	0,92	1,82

Таким образом, показано, что для классических схем вентиляционных течений применение математического моделирования параметров микроклимата дает те же результаты, что и классические методы расчета воздухораспределения.

## 5. Заключение

1. Выполнено численное исследование распределения температуры и скорости, формируемые в помещении для следующих схем воздухораспределения: подача воздуха

наклонными струями, сверху вниз настилающимися на потолок струями, горизонтальными стесненными струями, в обслуживаемую зону низкоскоростными потоками.

2. Получено совпадение значений коэффициента воздухообмена для классических схем воздухораспределения, рассчитанных по существующим полуэмпирическим зависимостям и полученных с помощью метода математического моделирования распределенных параметров микроклимата. Так, отличия в значениях коэффициента воздухообмена по температуре, полученным математическим моделированием и наиболее точном из классических методов составили:

подача приточного воздуха сверху вниз настилающимися на потолок струями – 4%;

подача приточного воздуха сверху вниз наклонными струями – 2%;

подача приточного воздуха горизонтальными стесненными струями выше рабочей зоны – 2%;

подача приточного воздуха в обслуживаемую зону низкоскоростными потоками – 5%.

### Список литературы/ References

1. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Книга 1 и 2. Справочник проектировщика. Под редакцией к. т. н. Н. Н. Павлова и инж. Ю. И. Шиллера. Москва. Стройиздат. 1992 г. [Internal sanitary installations. Part 3. Ventilation and air conditioning. Book 1 and 2. Designer's Handbook. Moscow. 1992]
2. Позин Г.М. О точности определения коэффициента воздухообмена // Вестник МГСУ. 2011. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-tochnosti-opredeleniya-koeffitsienta-vozdushoobmena-1> [Pozin G.M. On the accuracy of determining the air exchange coefficient // Vestnik MGSU. 2011. Iss. 7]
3. Посохин В. Н. О расчете воздухообмена/В. Н. Посохин // С.О.К. Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 4. С.84-88. [Posokhin V. N. Air exchange calculation // S.O.K. Plumbing, heating, air conditioning. 2014. Iss. P.84-88]
4. Shokofe, R.; Majid, A.; Hasan, M. Investigating impact of gas emission uncertainty on airflow distribution in an auxiliary ventilation system using CFD and Monte-Carlo simulation // Build. Environ. 2021. №204. 108165.
5. Raphael Kubeba Tabase, Veerle Van linden, Ozer Bagci, Michel De Paepe, André J.A. Aarnink, Peter Demeyer. CFD simulation of airflows and ammonia emissions in a pig compartment with underfloor air distribution system: Model validation at different ventilation rates // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 171. Article 105297.
6. W. Chen, J. Liu, C.M. Mak, P. Wang, L. Zhao, H.M. Wong. Near fields of annular slotted hoods measured via 2D-PIV // Build. Environ. 2018. Vol 144. P. 1–8
7. Motamedi et al., H. Motamedi, M. Shirzadi, Y. Tominaga, P.A. Mirzaei. Cfd modeling of airborne pathogen transmission of COVID-19 in confined spaces under different ventilation strategies // Sustainable Cities and Society. 2022. №76. Article 103397.
8. Z. Wang, E.R. Galea, A. Grandison, J. Ewer, F. Jia. A coupled Computational Fluid Dynamics and Wells-Riley model to predict COVID-19 infection probability for passengers on long-distance trains // Safety science. 2022. № 147. Article 105572.
9. Keyvan Ahmadi Babadi, Hossein Khorasanizadeh, Alireza Aghaei. CFD modeling of air flow, humidity, CO2 and NH3 distributions in a caged laying hen house with tunnel ventilation system // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Volume 193. Article 106677.
10. V. Adjiski, D. Mirakovski, Z. Despodov, S. Mijalkovski. Method for determining the air change effectiveness of the auxiliary forcing ventilation system in underground mines using CFD software. Mining Science. 2018. Vol. 25. P. 175–192
11. K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet, Build Environ. Times, 151 (2019), pp. 338-347



12. K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova. A study of separated flows at inlets of flanged slotted hoods // *Journal of Building Engineering*, Volume 29, 2020, Article 101159
13. Зиганшин А.М., Каримуллин Т.Л., Ягфаров Э.И. Настройка численного решения задачи о течении воздуха в вентиляционных крестовинах // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 8. С. 42-49 [Ziganshin A. M., Karimullin T. L., Yagfarov E. I. Setting a numerical solution to the problem of air flow in ventilation cross junctions // *Izvestiya VUZov. Construction*. 2021. Vol. 8. P. 42-49
14. Pierre-Emmanuel Bournet, Fernando Rojano. Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: Research, applications and challenges // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Volume 201. Article 107277.
15. A. Palmowska, B. Lipska, Research on improving thermal and humidity conditions in a ventilated ice rink arena using a validated CFD model // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 86. P. 373-387
16. W. Lin, X. Liu, T. Zhang, Z. Zhou. Investigation of displacement and jet ventilation systems applied in an ice rink // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol.50. Article 104179
17. Денисихина Д.М. Численное исследование закономерностей распределения CO<sub>2</sub> в общественных зданиях // *Инновации и инвестиции*. 2023. № 5. С. 368-372 [Denisikhina D. M. Numerical simulation of CO<sub>2</sub> distribution in public buildings // *Innovation and investment*. 2023. Vol 5. P. 368-372

#### **Информация об авторах**

**Денисихина Дарья Михайловна**, кандидат физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
E-mail: denisikhina@mail.ru

#### **Information about the authors**

**Daria M. Denisikhina**, Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation  
E-mail: denisikhina@mail.ru