

Оригинальная статья / Original article

УДК 697.921.45

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-119-130>

Исследование аэродинамических параметров воздухораспределителей при взаимодействии круглых несоосных струй

О.Н. Зайцев ¹✉, Н.Е. Семичева ¹, А.П. Бурцев ¹, Е.О. Зайцева ²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: zon071941@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является определение параметров результирующего потока при взаимодействии встречных несоосных потоков воздуха для обеспечения интенсивного снижения скорости воздуха в производственно-технологических помещениях небольшого объема. Достижение поставленной цели необходимо решить такие задачи как проведение анализа существующих теоретических положений и методов расчета систем воздухораспределения производственно-технологических помещений небольшого объема; разработка математической модели процесса взаимодействия встречных несовместимых потоков и определить параметры результирующего воздушного потока в зависимости от геометрических характеристик прибора. Объектом исследования являются системы приточной вентиляции в производственно-технологических помещениях небольшого объема с незначительными тепловыми нагрузками. Предметом исследования являются процессы формирования результирующего воздушного потока, созданного путем взаимодействия встречных несоосных потоков воздуха.

Методы. Методы математического моделирования движения воздушного потока на основании уравнений аэродинамики.

Результаты. Получены аэродинамические характеристики результирующей струи – коэффициент Буссинеска и коэффициент поля скоростей.

Заключение. Выявлено, что между двумя круглыми струями с разнонаправленными скоростями и двумя результирующими потоками по внутренней области образуется пространственная вихревая зона с максимальным градиентом скорости. На границах струй происходит интенсивное подмешивание окружающего воздуха, векторы которого направлены противоположно, а величины скоростей зависят от скоростей в струях, из-за чего изменяется характер вихревого движения. Результаты показывают, что, фактический уровень перерегулирования при скачке нагрузки определяется в первом приближении величиной приращения потерь, умноженной на разность значений тепловой проводимости, обмотка-масло при исходной и конечной температурах масла в каналах охлаждения обмотки, а эта разность сама зависит от величины приращения потерь. Получены оптимальные интервалы факторов для значения максимального значения функции: t – от 40 до 120; p – от 800 до 900; c – от 1,4 до 2,3.

Ключевые слова: вентиляция; воздухораспределитель; аэродинамика; моделирование взаимодействия струй; воздушная струя.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Исследование аэродинамических параметров воздухораспределителей при взаимодействии круглых несоосных струй / О.Н. Зайцев, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, Е.О. Зайцева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 119-130. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-119-130>.

Поступила в редакцию 12.02.2024

Подписана в печать 18.04.2024

Опубликована 30.09.2024

Study of aerodynamic parameters of air distributors during interaction of round non-coaxial jets

Oleg N. Zaitsev ¹ ✉, Natalia E. Semicheva ¹, Alexey P. Burtsev ¹,
Ekaterina O. Zaitseva ²

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov
46, Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: zon071941@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of the work is to determine the parameters of the resulting flow in the interaction of counter-misaligned air flows to ensure an intensive decrease in air velocity in production and technological premises of small volume. To achieve this goal, it is necessary to solve such tasks as analyzing existing theoretical provisions and methods for calculating air distribution systems for small production and technological premises; development of a mathematical model of the process of interaction of oncoming incompatible flows and to determine the parameters of the resulting air flow depending on the geometric characteristics of the device. The object of the study is the supply ventilation systems in industrial and technological premises of small volume with insignificant thermal loads. The subject of the study is the processes of formation of the resulting air flow created by the interaction of counter-misaligned air flows.

Methods. Methods of mathematical modeling of air flow motion based on the equations of aerodynamics.

Results. The aerodynamic characteristics of the resulting jet are obtained – the Boussinesq coefficient and the velocity field coefficient.

Conclusion. In the ambiguities, between two-meter-long-range extravehicular jets and two-meter-long-range converging streams in the inner regions, a spatial vortex zone is formed with a maximum extravehicular gradient velocity. At the boundary of the jet stream there is an intense interaction with the surrounding air, the vector of the propeller is directed by the opposite direction, and the quantity of the speed of the plane depends on the speed of the jet, which changes the nature of the swirling movements. The results show that the actual level of overshoot during a load surge is determined in the first approximation by the increment value multiplied by the difference in the values of thermal conductivity, winding-oil at the initial and final temperatures of the oils in the channels of the cooled windings, and this difference itself depends on the magnitude of the incremental damage. Optimal factor intervals for the values of the maximum value of the functions are obtained: t – from 40 to 120; ρ – from 800 to 900; c – from 1.4 to 2.3.

Keywords: ventilation; air distributor; aerodynamics; simulation of jet interaction; air jet.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Zaitsev O.N., Semicheva N.E., Burtsev A.P., Zaitseva E.O. Study of aerodynamic parameters of air distributors during interaction of round non-coaxial jets. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 119-130 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-119-130>.

Received 12.02.2024

Accepted 18.04.2024

Published 30.09.2024

Введение

Современное развитие общества связано с потребностями улучшения санитарно-гигиенических условий в производственных и непроизводственных помещениях, а также экономии материальных и топливно-энергетических ресурсов. Условия труда, эффективность и надежность оборудования зависят от условий воздушной внешней среды производственных и технологических помещений, которые могут быть обеспечены вентиляционными системами.

В помещениях небольшого объема с вредными условиями, незначительными тепловыми нагрузками и фиксированными рабочими местами, значительное влияние на формирование внутреннего микроклимата имеют приточные потоки воздуха. Решение этой задачи усложняется ограничением расстояния до рабочей зоны при подаче воздуха вертикальными струями. В связи с этим возникает необходимость разработки новых конструктивных решений воздухораспределения, которые обеспечили бы одновременно создание необходимого микроклимата и экономию материальных и энергетических ресурсов. Недостаточно изученным, и как следствие, мало применяемым остается вопрос интенсификации снижения скорости воздушного

потока во взаимодействии со встречными потоками.

Целью работы является определение параметров результирующего потока при взаимодействии встречных несоосных потоков воздуха для обеспечения интенсивного снижения скорости воздуха в производственно-технологических помещениях небольшого объема.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих теоретических положений и методов расчета систем воздухораспределения производственно-технологических помещений небольшого объема;
- разработать математическую модель процесса взаимодействия встречных несовместимых потоков и определить параметры результирующего воздушного потока в зависимости от геометрических характеристик прибора.

Объектом исследования являются системы приточной вентиляции в производственно-технологических помещениях небольшого объема с незначительными тепловыми нагрузками.

Предметом исследования являются процессы формирования результирующего воздушного потока, созданного путем взаимодействия встречных несоосных потоков воздуха.

Методы исследования – математическое моделирование движения воздушного потока на основании уравнений аэродинамики.

Материалы и методы

Данная работа посвящена рассмотрению комплекса вопросов относительно параметров результирующего потока, образованного взаимодействием плоских встречных струй. Аналитически изучены плоские взаимодействующие струи и результирующий поток. Оценено влияние взаимодействия струй на характер результирующего потока в помещении небольшого объема. Аналитически спрогнозированы результаты исследований результирующего потока, образованного путем взаимодействия несоосных струй. Определены параметры результирующего воздушного потока.

Так на формирование воздушной среды помещения влияет кинетическая энергия приточных струй, содержащаяся в крупномасштабных вихрях приточных и конвективных струй. Они разделяются на меньшие, превращая кинетическую энергию в теплоту. Турбулентный перенос энергии и вещества обуславливает распределение вредностей, температур и скоростей по всей площади и объему помещения. Процессы, проходящие в вентилируемом помещении, характеризуются величиной удельной энергии [1], вносимой струей за единицу времени, отнесенной к массе воздуха в объеме помещения.

$$E = \frac{G_v^2}{2V} = \frac{F_v^3}{2V}. \quad (1)$$

Для создания равномерных струйных потоков в помещениях необходимо, чтобы величина $E_{n.c}$ приточных струй была одинакова во всей рабочей зоне.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим истечение воздуха из щели. В поперечном сечении плоской приточной струи в воздухопроводе значения удельной энергии для разных точек неравнозначны из-за неравномерности скорости выхода воздуха. В начале щели вектор скорости потока и продольная ось канала почти параллельны, а в конце канала направление скорости перпендикулярно оси [1-3].

Равномерное распределение кинетической энергии в помещении возможно, когда алгебраическая сумма $E_{n.c}$ всех приточных струй будет постоянно в нижней точке:

$$\sum E'_{n.c} = \sum E''_{n.c} = \dots \sum E^{i-1}_{n.c} < \sum E^i_{n.c}. \quad (2)$$

Условие (2) достигается при взаимодействии нескольких потоков ($E_{n.c} = E_{n.c1} + E_{n.c2}$), например, двух струй с противоположным неравномерным распределением параметров.

Струи, вытекающие из воздухораспределителей, установленных на значительном расстоянии друг от друга, до выхода в рабочую зону развиваются как одиночные. При этом равномерность вентилирования помещения все же повышается, поскольку струи распространяются по противоположным направлениям.

При взаимодействии струй, исходящих из этих воздухопроводов, можно получить результирующую приточную струю с новыми аэродинамическими характеристиками.

Различное направление скоростей потока этих струй интенсифицирует перемещение воздуха со взаимным погашением их начальной энергии.

Удельная кинетическая энергия является величиной скалярной, поэтому для того, чтобы учесть направления скоростей, необходимо в (1) отделить векторную часть, и представить ее в виде

$$E_{\text{nc}}^i = \frac{\vec{v}^i}{2V} G = \vec{v}^i = \frac{\vec{v}^i}{2V} \vec{I}^i. \quad (3)$$

Для результирующего потока i -ого участка E_{nc} будет равна:

$$\sum E_{\text{nc}}^i = E_{\text{nc1}}^i + E_{\text{nc2}}^i. \quad (4)$$

а для всей результирующей струи с учетом (3) и (4) записывается в виде:

$$\begin{aligned} E_{\text{nc}\Sigma}^i &= \left[\frac{\vec{v}^i \vec{I}^i}{2V} + \dots + \frac{\vec{v}^i \vec{I}^i}{2V} \right] + \\ &+ \left[\frac{\vec{v}^i \vec{I}^i}{2V} + \dots + \frac{\vec{v}^i \vec{I}^i}{2V} \right] = \\ &= \frac{1}{2V} \sum_{i=1}^n \left(\vec{v}_1^i \vec{I}_1^i + \vec{v}_2^i \vec{I}_2^i \right) = \\ &\frac{1}{2V} \frac{\sum_{i=1}^n (\vec{v}_1^i + \vec{v}_2^i)}{2n} \sum_{i=1}^n \vec{I}_{\Sigma}^i = \frac{v_{\Sigma}}{2V} \sum_{i=1}^n \vec{I}_{\Sigma}^i, \end{aligned} \quad (5)$$

где v_{Σ} – среднее значение скорости результирующей струи.

Векторы скоростей исследуемых плоских струй имеют разные направления, поэтому их взаимосвязь рассматривается с точки зрения векторного совмещения импульсов, т.е. из (5) необ-

ходимо выделить только один общий множитель I_{Σ}^i :

Импульс в i -й точке результирующей струи определяем по формуле:

$$\vec{I}_{\Sigma}^i = \vec{I}_1^i + \vec{I}_2^i. \quad (6)$$

В области соприкосновения границ обеих струй при наличии векторного расстояния между щелями воздухопроводов, есть возможность возникновения обратных воздушных течений [1, 3, 4, 5].

$$\vec{I}_{\Sigma}^i + \vec{I}_{36}^i = \vec{I}_1^i + \vec{I}_2^i. \quad (7)$$

Обратные воздушные течения, образующиеся при взаимодействии одинарных струй, направлены в противоположном направлении от основных. Для удобства выразим их как часть от основных:

$$\vec{I}_{36}^i = A \vec{I}_{\Sigma}^i, \quad (8)$$

$$(1 + A) \vec{I}_{36}^i = \vec{I}_1^i + \vec{I}_2^i. \quad (9)$$

Импульс результирующего потока в проекциях на оси координат можно записать как:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_{\Sigma x}^2 + I_{\Sigma z}^2}, \quad (10)$$

а с учетом обратного потока:

$$(1 + A)^2 I_{\Sigma}^2 = I_{\Sigma x}^2 + I_{\Sigma z}^2. \quad (11)$$

Выразим импульс результирующего потока через исходные импульсы в проекциях на оси координат:

$$(1 + A)^2 I_{\Sigma}^2 = (I_{1x} + I_{2x})^2 + (I_{1z} + I_{2z})^2. \quad (12)$$

Исходные импульсы обеих струй определяются из соотношений:

$$I_{1z} = I_{1h}^i \cos \alpha_1^i; \quad I_{2z} = I_{2h}^i \cos \alpha_2^i, \quad (13)$$

$$I_{1x} = I_{1h}^i \sin \alpha_1^i; \quad I_{2x} = I_{2h}^i \sin \alpha_2^i. \quad (14)$$

Подставив в (13) и (14), получим импульс результирующей струи в i -м сечении, выраженный через импульсы обеих струй с учетом направлений их движения:

$$(1+A)I_{\Sigma}^i = \sqrt{(I_1^i \cos \alpha_1^i + I_2^i \cos \alpha_2^i)^2 + (I_1^i \sin \alpha_1^i + I_2^i \sin \alpha_2^i)^2}. \quad (15)$$

Величина может быть определена из (15) при известных начальных импульсах. Обычно в практике решают обратную задачу: по известным параметрам в рабочие зоны определяются необходимые параметры на истоке. В этом случае под корнем (15) есть четыре неизвестных.

Поскольку воздушные потоки в воздуховодах одинаково направлены, то в каждом i -ом сечении обеих струй их импульсы могут быть одинаковы. Поэтому интенсивное взаимодействие встречных струй происходит по всей длине столкновения.

Равенство конструктивных размеров обоих воздуховодов и постоянство расходов по длине щели обуславливают равенство параметров обеих струй и импульсов обоих потоков ($I_{1c} = I_{2c}$). Проекции импульсов на ось (X) равны и противоположно направлены $\Sigma I_x = 0$, а на ось (Z) – также равны, однако сонаправлены.

Учитывая вышесказанное, (15) для области взаимодействия струй можно записать:

$$(1+A)I_{\Sigma c} = (1+A)I_{\Sigma c_z} = 2I_{ic_z}. \quad (16)$$

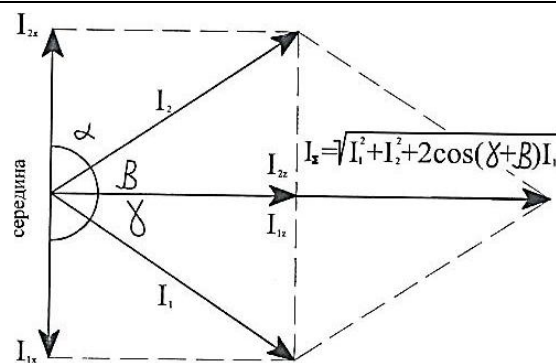


Рис. 1. Векторное добавление импульсов взаимодействующих струй

Fig.1. Vector addition of pulses of interacting jets

Аналогичное решение может быть получено путем преобразования:

$$(1+A)^2 I_{\Sigma c}^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2 \cos(\gamma + \beta) I_1 I_2. \quad (17)$$

При равных значениях углов соединение струй γ и β (рис. 1) и равных импульсах после ряда преобразований (17) получим:

$$(1+A)I_{\Sigma} = 2I_1 \cos \beta = 2I_1 \sin \alpha. \quad (18)$$

Проекция импульса на ось (z) равняется:

$$I_{iz} = \rho \beta_0 \sigma v_0^2 \Delta l, \quad (19)$$

$$I_{\Sigma z} = \rho \beta L_{\Sigma z} v_{\Sigma z} \Delta l. \quad (20)$$

Количество движения результирующей струи на расстоянии z от площади щелей.

$$B_z = 2 \operatorname{tg} \theta_{\Sigma z}, \quad (21)$$

$$I_{\Sigma z} = 2 \rho X \operatorname{tg} \theta_z \beta (K v_{\Sigma z})^2 \Delta l, \quad (22)$$

где $I_{\Sigma z} = B_z v_{\Sigma z}$ – расход воздуха в результирующей струе при входе в рабочую зону; B_z – ширина результирующей зоны, определяется по величине угла раскрытия.

Подставив в (20) значение входящих величин и $(L_{\Sigma}=K_{\Sigma} v_{\Sigma z})$, получим проекцию результирующего импульса на ось (z) .

Таким образом, зависимость результирующего импульса от исходных (16) для средней части воздуховодов можно выразить следующим образом:

$$(1+A)2\rho X \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta (K v_{\Sigma z})^2 \Delta l = 2\beta_0 \rho \delta v_0^2 \Delta l, \quad (23)$$

$$v_{\Sigma z} = \sqrt{\frac{\beta_0 v_0^2 \delta}{(1+A)z \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta K^2}}. \quad (24)$$

Итак, скорость воздуха на оси результирующей струи на расстоянии X от площади щелей для средней части каналов.

Если рабочие места расположены вне зоны действия струи, то $v_{p,z}$, вдвое меньше, чем $v_{\Sigma z}$.

Из (23) получим отношение осевой скорости результирующей струи к скорости выхода:

$$\frac{v_{\Sigma x}}{v_0} = \sqrt{\frac{\beta_0 v_0^2 \delta}{(1+A)z \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta K^2}}, \quad (25)$$

$$m = \sqrt{\frac{\beta_0}{(1+A)z \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta K^2}}. \quad (26)$$

Решая вместе (25) с формулой Шлихтинга, получим значение коэффициента (m_{Σ}) затухания осевой результирующей струи, где $\beta_0 = 1$, поскольку через открытую щель выход воздуха свободный.

Аналогично (26), из равенства импульсов определяется значение коэффициента затухания осевой скорости свободной плоской струи.

$$m = \sqrt{\frac{\beta_0}{(1+A)z \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta K^2}}. \quad (27)$$

Если поле скоростей струи описывается зависимостью Шлихтинга, то коэффициенты K и β в (26) и (27) будут иметь известные значения [1].

Однако в ряде работ по взаимодействию струй [2-13] поля скоростей результирующего потока описываются законом нормального распределения.

Поскольку значения K и β необходимо найти по всей площади поля скоростей, примем максимальное значение $b = y_{\text{гр}}$. Прологарифмировав его, получим в общем виде связь между « $y_{\text{гр}}$ » и « $y_{0,5}$ »:

$$y_{\text{гр}} = y_{0,5} \sqrt{\frac{\ln b}{t}}. \quad (28)$$

Для отдельного случая, когда $t = -0,7$ и $b = 0,06$, выражение примет вид, откуда:

$$\ln_{0,05} = -0,7 \left[\frac{y_{\text{гр}}}{y_{0,5}} \right]^2, \quad (29)$$

$$y_{\text{гр}} = 2,07 y_{0,5}. \quad (30)$$

Подставим в формулу Шлихтинга (29) и получим окончательно:

$$\frac{v_y}{v_x} = e^{-3 \left[\frac{y}{y_{\text{гр}}} \right]^2}. \quad (31)$$

Для струй, поля скоростей которых описываются зависимостью (31), могут быть получены значения коэффициентов Буссинеска и поля путем общего решения с (30), соответственно:

– коэффициент поля скоростей свободной струи:

$$K = \frac{1}{y_{\text{гр}}} \int_y^{y_{\text{гр}}} e^{-3\left(\frac{y}{y_{\text{гр}}}\right)} dy = \int_0^1 e^{-3\bar{y}^2} d\bar{y}; \quad (32)$$

Правомочный коэффициент на количество движения (Буссинеска):

$$\beta = \frac{1}{K^2} \int_0^1 \left(e^{-3\bar{y}^2} \right) d\bar{y}, \quad (33)$$

где $(e^{-3\bar{y}^2})$ – интеграл вероятности.

В результате расчета получены следующие значения коэффициентов:

при $y = y_{0,5}$	$\beta = 1,0441$	$K = 0,8085;$
при $y = y_{\text{гр}}$	$\beta = 1,4240$	$K = 0,5040;$
по Шлихтингу	$\beta = 1,560$	$K = 0,450.$

Выводы

Экспериментально установлено, что тестовые расчеты и экспериментальные данные показали достаточную для инженерных расчетов точность, максимальная относительная погрешность

для трех моделей составила 7,9% [5, 7-13]. На основе экспериментальных исследований работы установлено что, предлагаемая модель дает вполне ожидаемый результат – плавное снижение температуры в баке [1, 3].

Результаты показывают, что, фактический уровень перерегулирования при скачке нагрузки определяется в первом приближении величиной приращения потерь, умноженной на разность значений тепловой проводимости, обмотка-масло при исходной и конечной температурах масла в каналах охлаждения обмотки, а эта разность сама зависит от величины приращения потерь.

На основании рис. 1 получены следующие оптимальные интервалы факторов для значения максимального значения функции: t – от 40 до 120; ρ – от 800 до 900; c – от 1,4 до 2,3.

Список литературы

1. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial Air Quality and Ventilation: Controlling Dust Emissions. CRC Press. 2017. 414 p.
2. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet, Build. Environ. 2019, 151 338–347. doi:10.1016/j.buildenv.2019.01.039.
3. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods / K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova, A.K. Logachev // Energy Build. 2018. № 173. P. 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.036>.
4. Naidenov G.F. Gas burner devices with adjustable torch characteristics. Kiev: Tekhnika, 1974. 112 p.
5. Юдин Ю. В., Майсурадзе М. В., Водолазский Ф. В. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.
6. Logachev I., Konstantin K., Averkova O. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions. Boca Raton: CRC Press, 2015. 540 p.

7. Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П. Один из вариантов управления системой тепло-снабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 56-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.
8. Исследование процесса генерации термоэлектричества при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов / С. В. Ежов, Е. Н. Семичева, А. П. Бурцев, В. И. Зенченков, Д. А. Ермаков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 74-84. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-74-84>
9. Бурцев А. П., Булгаков А. В., Яковлева В. Н. Вариант управления воздушными потоками по схеме «умный дом» с использованием комплексного многослойного пластинчатого рекуператора // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 7(1067). С. 60-63.
10. Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 1. С. 38-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>
11. Experimental research of main characteristics in a complex multi-layer plate heat exchanger / V. S. Yezhov, N. E. Semicheva, A. P. Burtsev, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1242, no. 1. P. 012042. DOI 10.1088/1757-899x/1242/1/012042.
12. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the pollutants capture rate by local exhaust due to the use of external swirling jet. Part 1. Research methods // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63, № 3. P. 332-336.
13. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the rate of pollutants capture by local exhaust due to the use of external swirling jet. Part 2. Results of numerical and experimental studies // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63, № 4. P. 448-453.
14. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the rate of capture of pollutants by local suction due to the use of an external swirling jet. Part 1. Research methods // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 1, № 6. P. 40-45.
15. Системы отопления при нестационарном температурном режиме на основе комбинированного теплогенератора / Ф.А. Кешвединова, А.С. Умеров, С.А. Егоров, И.П. Ангелюк, О.Н. Зайцев // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25 (77). С. 87-90.
16. Коаксиальное воздухораспределительное устройство с торцевой раздачей потока для вентиляционных систем / Зайцев О.Н., Сиваченко Ю.А. // Патент на полезную модель RU 207611 U1, 03.11.2021. Заявка № 2021105119 от 25.02.2021.

17. Исследование влияния структуры потока на коэффициент гидравлического сопротивления / Т.В. Дихтярь, О.Н. Зайцев, К.С. Дихтярь, И.П. Ангелюк // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). С. 129-133.

18. Zaycev O.N., Angeluck I.P., Toporen S.S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" - Organisation and Technology of Construction Production. 2019. С. 055033. DOI: 10.1088/1757-899X/698/5/055033

19. Зайцев О.Н., Дихтярь Т.В., Циплина А.А. Совершенствование систем микроклимата в сооружениях полукрытого типа // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 11 (63). С. 187-193.

20. Исследование свободной закрученной струи с прецессирующим вихревым ядром / О.Н. Зайцев, Н.А. Степанцова, О.А. Аверкова, К.И. Логачев, В.А. Уваров // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 8 (60). С. 109-113.

References

1. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial Air Quality and Ventilation: Controlling Dust Emissions. CRC Press. 2017. 414 p.

2. Logachev K. I., Ziganshin A. M., Averkova O. A. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet. *Build. Environ.* 2019. 151: 338–347. doi:10.1016/j.buildenv.2019.01.039.

3. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A., Logachev A.K. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods. *Energy Build.* 2018. (173): 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.036>.

4. Naidenov G.F. Gas burner devices with adjustable torch characteristics. Kiev: Tekhnika; 1974. 112 p.

5. Yudin Yu. V., Maisuradze M. V., Vodolazsky F. V. Organization and mathematical planning of the experiment. Ekaterinburg; 2018. 124 p. (In Russ.).

6. Logachev I., Konstantin K., Averkova O. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions. Boca Raton: CRC Press; 2015. 540 p.

7. Zhilina K. V., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P. One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 56-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

8. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Zenchenkov V. I., Ermakov D. A. Study of the Process of Generation of Thermoelectricity in Low Grade Heat Recovery of Waste Gases. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of*

the Southwest State University. 2019; 23(2): 74-84 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-74-84>.

9. Burtsev A. P., Bulgakov A.V., Yakovleva V. N. Variant of air flow control according to the "smart house" scheme using a complex multilayer plate heat exchanger. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin construction equipment*. 2023; (7): 60-63 (In Russ.).

10. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 38-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>

11. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., et al. Experimental research of main characteristics in a complex multi-layer plate heat exchanger. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022; 1242, (1): 012042. DOI 10.1088/1757-899x/1242/1/012042

12. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the pollutants capture rate by local exhaust due to the use of external swirling jet. Part 1. Research methods. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022; 63 (3): 332-336.

13. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the rate of pollutants capture by local exhaust due to the use of external swirling jet. Part 2. Results of numerical and experimental studies. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022; 63 (4): 448-453.

14. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the rate of capture of pollutants by local suction due to the use of an external swirling jet. Part 1. Research methods. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022; 1 (6): 40-45.

15. Keshvedinova F.A., Umerov A.S., Egorov S.A., Angelyuk I.P., Zaitsev O.N. Heating systems with non-stationary temperature conditions based on a combined heat generator. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2022; (25): 87-90.

16. Zaitsev O.N., Sivachenko Yu.A. Coaxial air distribution device with end flow distribution for ventilation systems. Patent for utility model RU 207611 U1, 03.11.2021. Application No. 2021105119 dated 25.02.2021 (In Russ.).

17. Dikhtyar T.V., Zaitsev O.N., Dikhtyar K.S., Angelyuk I.P. Study of the influence of flow structure on the hydraulic resistance coefficient. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2021; (22): 129-133. (In Russ.).

18. Zaycev O.N., Angeluck I.P., Toporen S.S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" - Organisation and Technology of Construction Production*. 2019. P. 055033. DOI: 10.1088/1757-899X/698/5/ 055033

19. Zaitsev O.N., Dikhtyar T.V., Tsiplina A.A. Improving the microclimate systems in semi-open structures. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bez-opasnost' = Construction and technogenic safety*. 2018; (11): 187-193. (In Russ.).

20. Zaitsev O.N., Stepantsova N.A., Averkova O.A., Logachev K.I., Uvarov V.A. Study of a free swirling jet with a precessing vortex core. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2017; (8): 109-113 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Зайцев Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zon071941@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9084-9355>, ScopusID: 57198778856

Oleg N. Zaitsev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zon071941@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9084-9355>, ScopusID: 57198778856

Семичева Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nsemicheva@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0232-5282>, ScopusID: 56826118600

Natalia E. Semicheva, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nsemicheva@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0232-5282>, ScopusID: 56826118600

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Зайцева Екатерина Олеговна, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: katerinazaytseva01@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8199-9926>

Ekaterina O. Zaitseva, Master of the Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: katerinazaytseva01@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8199-9926>