УДК: 697.922
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.1
EDN: AJLMNN

Валидация численного решения задачи о течении запыленного потока воздуха в прямом канале

А.М. Зиганшин[1], В.Л. Черных [2], К.И. Логачев[3], Р.Р. Сарчин[1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация
[2]ООО «Метрополис», г. Казань, Российская Федерация
[3]Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова,
г. Белгород, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* При работе промышленной местной вытяжной вентиляции от оборудования пылящих производств по воздуховодам транспортируется пылевоздушный поток. Его характеристики: траектории пылевых частиц, сопротивление прямых участков и фасонных элементов, зависят сложным образом от параметров дискретной фазы и поэтому изучены недостаточно хорошо. Современные программные комплексы предлагают различные модели и алгоритмы расчета таких потоков. Цель работы состоит в валидации компьютерной модели течения монодисперсного пылевоздушного потока в прямом канале. Для этого решаются задачи – моделирование потока для разного размера, плотности и относительной концентрациичастиц; расчеты проводятся с рекомендуемыми настройками дискретной фазы и большим количеством моделей турбулентности и пристеночного моделирования; определяется влияние настроек на сопротивление трения и траектории частиц.
Результаты. По численно найденным полям давления определены коэффициенты сопротивления трения и проведено сравнение с известными данными при течении чистого и запыленного воздуха. Показано, что «стандартная k-ε» модель турбулентности и расширенное пристеночное моделирование приводят к наиболее близкому к известным значению коэффициента сопротивления для незапыленного воздуха. При моделировании течения пылевоздушного потока проведено сравнение большого количества моделей, при разном сочетании параметров дискретной фазы и показано отсутствие как какой-либо закономерности для коэффициента сопротивления от них, так и отсутствие сходимости с известными данными. При этом поведение траекторий частиц физически адекватно зависит от их плотности – осаждение частиц с плотностью 1400 кг/м^3 происходит существенно раньше, чем для частиц плотностью 700 кг/м^3.
Выводы. Использование обычно рекомендуемых настроек приводит к адекватному моделированию поведения частиц – траекторий, осаждения, что полезно для изучения течений в устройствах промышленной вентиляции. Но для правильного моделирования сопротивления трению в канале необходимы дальнейшие исследования и использование более тонких настроек моделей дискретной фазы и ее взаимодействия с несущей средой.

Ключевые слова: численное моделирование, запыленные потоки, сопротивление в прямом канале, траектории движения частиц

Для цитирования: Зиганшин А.М., Черных В.Л., Логачев К.И., Сарчин Р.Р. Валидация численного решения задачи о течении запыленного потока воздуха в прямом канале // Известия КГАСУ, 2025, № 2(72), с. 8-20, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.1, EDN: AJLMNN

Validation of a numerical solution to the problem of dusty air flow in a straight channel

A.M. Ziganshin[1], V.L. Chernykh[2], K.I. Logachev[3], R.R. Sarchin[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation
[2]Metropolis LLC, Kazan, Russian Federation
[3] Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* When industrial local exhaust ventilation is operating, a dusty air flow is transported through air ducts from dust-producing equipment. Its characteristics such as the trajectories of dust particles, the resistance of straight sections and shaped elements, depend in a complex way on the parameters of the discrete phase and therefore have not been studied insufficiently. Modern software packages offer various models and algorithms for calculating such flows.The aim of the work is to validate a computer model of monodisperse dust-air flow in a straight channel. For this purpose the tasks are solved - flow modeling for different particle size, density and relative concentration; calculations are carried out with recommended settings of discrete phase and a large number of turbulence and near-wall simulation models; the influence of settings on frictional resistance and particle trajectories is determined.
Results. Based on the numerically obtained pressure fields, the friction drag coefficients were determined and compared with the known data for the flow of clean and dusty air. It was shown that the "standard k-ε" turbulence model and enhanced wall treatments lead to the closest known value of the friction drag coefficient for dust-free air. When modeling the flow of dusty air, a large number of models were compared with different combinations of discrete phase parameters, and it was shown that there is no regularity in the drag coefficient from them, nor is there any convergence with known data. At the same time, the behavior of particle trajectories is physically reasonably depends on their density—particles with a density of 1400 kg/m^3 settle significantly earlier than particles with a density of 700 kg/m^3.
*Conclusions.*The use of commonly recommended settings leads to adequate modeling of particle behavior - trajectories, deposition, which is useful for studying flows in industrial ventilation devices. But for proper modeling of frictional resistance in the channel, further research and use of more finely set models of the discrete phase and its interaction with the carrier medium are necessary.

Keywords: numerical modeling, dusty flows, resistance in a straight channel, particle trajectories

For citation: Ziganshin A.M., Chernykh V.L., Logachev K.I., Sarchin R.R. Validation of the numerical solution of the problem of dusty air flow in a straight channel // News of KSUAE, 2025, № 2(72), p. 8-20, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.1, EDN: AJLMNN

1. Введение

При проектировании систем местной вытяжной вентиляции от оборудования, выделяющего пыль, обычно ее наличие или не учитывают или используются эмпирические зависимости, которые имеются для небольшого количества вариантов фасонных элементов. Кроме того, существующие результаты экспериментальных исследований течений запыленного воздуха говорят о неоднозначной и сложной зависимости характеристик потока от параметров пыли – ее концентрации, размеров, формы и плотности частиц и параметров самого потока –скорости и режима его течения, плотности и вязкости несущей среды [1].

В статье [2] приведенырезультаты исследования потока твердых частиц взвешенных в воздухе при высоких значениях числа Re ($1\cdot10^5\div1\cdot10^6$) и относительной массовой концентрации твердых частиц ($G_P/G_G< 0{,}6$; G_P – массовый расход частиц, G_G – массовый расход воздуха). Измерения перепадов давления и определение коэффициента

гидравлического сопротивления трения проводилось в стеклянной трубке диаметром около 25,4мм (1”). Показано, что коэффициент трения уменьшался с увеличением концентрации твердых частиц. В диссертации [3] экспериментально определены зависимости коэффициента потерь давления на трение λ при течении пыле-воздушного потока в круглой трубе диаметром около 70мм (2 3/4”) в зависимости от размера и массовой концентрации частиц. Использовались стеклянные шарики размерами: 15мкм, 100мкм, 200мкм, 840мкм и 1680мкм. Относительная массовая концентрация частиц была в пределах: G_P/G_G = 0÷2,8. При этом показано, что для развитого турбулентного движения ($Re>1\cdot10^4$) в диапазоне исследованных размеров частиц для их концентрации $G_P/G_G<$ 1÷1,5 наблюдается снижение коэффициента сопротивления λ на величину до 20-30%. Аналогичный результат получен и в работе [4] для потока частиц оксида магния размером 30мкм. На примере ламинарного потока [5] показано, что твердые частицы присутствующие в потоке, снижают скорость распространения возмущений в нем. Поэтому принято считать, что в случае, если частицы пыли двигаются так, что успевают за самыми малыми движениями – пульсациями потока воздуха, то есть имеют время релаксации сопоставимую с характерным временем для потока несущей среды (имеют достаточно малые размеры, плотность и концентрацию), то можно пренебречь наличием отдельных частиц, а поток газовзвеси представить как сплошной поток некоторой жидкости с повышенной плотностью и вязкостью. В обратном случае, частицы не успевают за потоком несущей жидкости, и начинают оказывать влияние на вихревые структуры потока, в том числе приводить к затуханию пульсаций, снижению общего сопротивления при движении потока [1]. Обнаружение этого эффекта привело к развитию направлению исследований по снижению сопротивления при течении различных жидкостей в различных каналах, при введении в поток разной формы частиц и добавок. Например в работе[6] - сферических, чешуйчатых и волокнистых микрочастиц. При этом снижение потерь давления на трение четко наблюдалось только при высоких концентрациях более 0,01 г твердого вещества на 1 $см^3$ газа. Более крупные частицы, как правило, увеличивали потери на трение, особенно при небольших концентрациях. Исследования течений запыленных потоков жидкости по каналам различной конфигурации проводились и численно. При этом проводилось исследование различных характеристик таких потоков. В статье [7] прямым численным моделированием (DirectNumericalSimulation, DNS) находились условия перехода течения из ламинарного в турбулентный. Частицы предполагались сферическими с плотностью выше плотности жидкости. В результате расчетов найдены пороговая энергия перехода, и показано, что переход может быть облегчен присутствием частиц с низкой плотностью. Это связано с тем, что частицы могут вносить в систему вредные возмущения с масштабами длин, которые изначально отсутствуют. При более высоких концентрациях, наоборот, наблюдается увеличение энергии возмущений, необходимой для перехода. Результаты показывают, что наличие частиц влияет на вторичные неустойчивости и разрушение струи. Эти эффекты могут быть причиной уменьшения сопротивления, которое наблюдается при турбулентном течении жидкости с частицами в канале. В работе [8] также методом DNS в комбинации с экспериментальными методами исследовано влияние на характеристики турбулентного течения наличия нейтрально плавучих сферических частиц. Определены – падение давления и общее сопротивление (коэффициент трения), скорость жидкости и распределение частиц в канале в зависимости от размера частиц и объемного расхода. Показано существенное влияние частиц на среднюю скорость жидкости, флуктуации скорости и распределение частиц в трубе для низких скоростей потока. Однако влияние добавленных твердых частиц уменьшается по мере увеличения скорости потока. Численные исследования [9] для вертикальных каналов также показали влияние частиц на турбулентность потока. В работе[10] были численно исследованы механизмы, которые приводят к снижению сопротивления при течении потока в канале при введении в него частиц. Расчеты проводились в расчетном модуле, реализующим методы DNS и LES (LargeEddySimulation, моделирование крупных вихрей). Рассматриваются частицы с числом Стокса (St)равным 6 и 30 при изменении относительной массовой концентрации G_P/G_G от 0,2 до 1,0. Моделирование показало, что частицы с числом St =30 вызывают

уменьшение сопротивления на 19,74% при концентрации G_P/G_G = 1,0, в то время как частицы St = 6 вызывают увеличение сопротивления на 16,92% также при G_P/G_G = 1,0. Был обнаружен механизм, приводящий к снижению сопротивления, который заключается в образовании чрезвычайно длинных кластеров – «канатов». Эти структуры преимущественно выстраиваются с низкоскоростными струйками и способствуют их стабилизации и предотвращению разрыва. Несмотря на дополнительные напряжения, вызванные наличием частиц, пристеночные вихревые структуры приводят к большему снижению напряжений сдвига Рейнольдса и частичной реламинаризации пристеночного течения. В случае увеличивающих сопротивление частиц с St = 6 также наблюдается снижение напряжений сдвига Рейнольдса, однако этого снижения недостаточно для преодоления дополнительных напряжений частиц, что приводит к увеличению сопротивления.

Существующие исследования показывают наличие влияния присутствия частиц в потоке несущей среды на ее параметры – как на микроуровне – вихревые структуры, пограничный слой, так и интегрально –локальную скорость, сопротивление трению. При этом влияние параметров дискретной фазы – диаметра частиц, их концентрация, плотность, форма неоднозначно и может приводить как к затуханию турбулентности, так и к ее развитию, как к снижению сопротивления, так и к его повышению. Для задач транспортирования запыленных потоков важно установить зависимости сопротивления как прямых участков систем аспирации, так и основных фасонных элементов. В существующей литературе имеется лишь ограниченная информация. Кроме этого, моделирование потока запыленных частиц позволит определить и характерные его особенности, такие как вихревые зоны, возникающие в местах резкого изменения направления потока, а также зависимость их формы и размеров от параметров потока. Знание таких особенностей позволит использовать различные методы снижения потерь энергии в фасонных элементах систем вентиляции. Сейчас для чистого воздуха имеется целый ряд таких исследований, где численно и экспериментально разрабатываются энергоэффективные формы различных фасонных элементов. При этом используются как способы скругления острой кромки по различным очертаниям взятым в природе [11] или по плавным кривым [12] , так и по очертаниям вихревых зон, возникающих на таких участках[13,14]. Кроме этоиспользуются методы топологической оптимизации [15,16]и интеллектуальную оптимизацию, включающую моделирование потока [17]. Кроме этого имеются и другие способы снижения сопротивления элементов, например установка внутри элемента направляющих лопаток [18]. Все эти способы апробированы и дают эффект при транспортировании чистого воздуха. Для запыленных потоков такие способы не исследованы. Поэтому знание особенностей течения запыленного потока в фасонных элементах систем вентиляции, позволят в дальнейшем разработать энергоэффективные детали систем перемещения запыленных потоков.Результаты моделирования течения запыленного воздуха важно не только при проектировании систем его транспортирования по воздуховодам. Правильное моделирование поведения частиц позволит проводить численные исследования и разработку устройств как улавливания пыли местными отсосами различной конструкции[19,20], так и ее очистки [21,22]и сепарации в различных устройствах [23,24].

Существующие исследования, в основном, проводятся при помощи специализированных вычислительных программ, реализующих методы DNS. Поэтому построение компьютерной модели течения запыленного потока в универсальном программном комплексе, которая позволяет исследовать течение запыленного потока является актуальной и новой задачей.

Целью работы является валидация компьютерной модели течения запыленного воздуха в прямом канале и определение влияние моделей турбулентности и основных настроек универсального программного комплекса на параметры течения. Для достижения поставленной цели:

- решается ряд задач для наиболее универсальных моделей турбулентности и рекомендуемых настроек моделей дискретной фазы (диаметры частиц, их плотность и концентрация, скорости несущей среды и дискретной фазы);

- предлагается методика обработки численных расчетов, строятся траектории пылевых частиц, и определяется коэффициент сопротивления трения;
- проводится сравнение полученных численных результатов и известных достоверных данных, делается вывод о возможности использования стандартных настроек и моделей при расчетах пылевоздушных течений в каналах.

2. Материалы и методы

Коэффициент сопротивления трения при течении пылевоздушного потока находится из графика[3], где приведен график зависимости величины относительного снижения коэффициента сопротивления трения $(\lambda_0-\lambda_P)/\lambda_0$ (λ_0 – коэффициент сопротивления трения для незапыленного потока) в зависимости от диаметра частиц d_P и относительной массовой концентрации G_P/G_G. На рис. 1 показан график построенный для λ_Pпо данным $(\lambda_0-\lambda_P)/\lambda_0$ (значение λ_0 = 0,034 принято из работы [3] для максимального из исследованных чисел Re – развитого турбулентного потока).

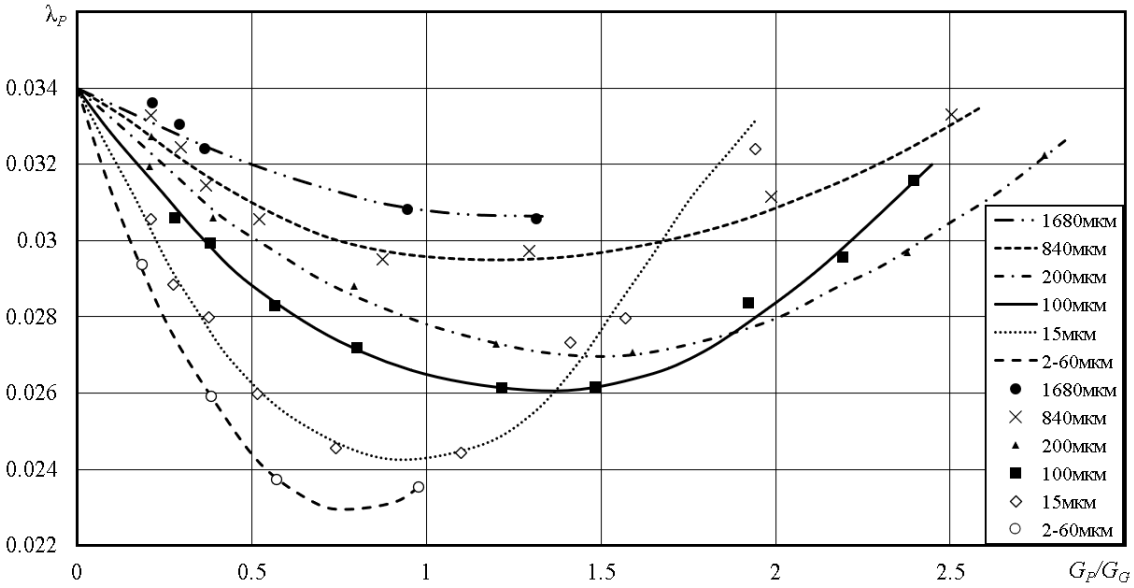

Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления λ_P для запыленного потока [3] от диаметра частиц d_P и относительной массовой концентрации G_P/G_G (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Dependence of the resistance coefficient λ_P for a dusty flow [3] on the particle diameter d_P and the relative mass concentration G_P/G_G (illustration by the authors)

На первом этапе проводится моделирование течения незапыленного воздуха. При построении компьютерной модели для проверки влияния выбраны наиболее универсальные модели турбулентности, их подмодели и способы пристеночного моделирования. Всего исследовано 12 вариантов (таблица 1):

Таблица 1

Исследованные варианты сочетаний моделей

Модель турбулентности	Подмодель турбулентности	Пристеночное моделирование
k-ε	Standard (SKE) RNG (RNGKE)	Standard Wall Functions (SWF) Scalable Wall Functions (ScWF) Non-Equilibrium Wall Functions (NEWF) Enhanced Wall Treatment (EWT) Menter-Lechner (ML)
k-ω	Standard (SKW) SST (SSTKW)	Standard Wall Functions (SWF) –

Геометрия задачи (рис. 2) - прямой горизонтальный воздуховод квадратного сечения размерами AxB = 0,1x0,1м длиной l = 5м. Та же геометрия далее используется и при моделировании течения запыленного потока.

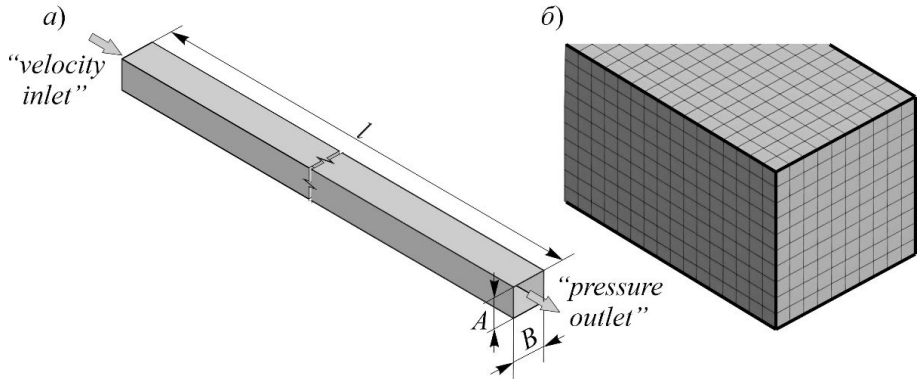

Рис. 2. Компьютерная модель: а) геометрия задачи; б) начальная расчетная сетка (часть области)(иллюстрация авторов)
Fig. 2. Computer model: a) geometry of the problem; b) initial computational grid (part of the domain) (illustration by the authors)

На входе в канале устанавливаются граничные условия (ГУ) «velocityinlet» со значением модуля скорости $|v_0|$ = 1,46 м/с, в направлении внутренней нормали к плоскости границы. Выход из канала моделируется при помощи ГУ «pressureoutlet» с нулевым избыточным давлением. Остальные границы – ГУ «wall»: непроницаемая стенка с условием непроскальзывания.

При моделировании течения запыленного потока, дополнительно настраивались его модели и параметры. При этом одним из основных подходов, является исследование потока без взаимодействия, в рамках которого происходит отдельное подключение моделей и расчет траекторий дискретной фазы. Этот подход хорошо зарекомендовал себя при определении траекторий движения частиц, в том числе с учетом полидисперсного состава, плотности и других особенностей течения пылевоздушного потока. Имеет интерес проверить использование этого подхода при решении задач о сопротивлении.

Для возможности сравнения получающихся результатов с данными [3] массовый расход частиц задавался для обеспечения относительной массовой концентрации G_P/G_G = 1:1 кг/кг – G_P= 0,017521кг и 2:1 кг/кг – G_P= 0,035042кг. Пылевоздушный поток моделировался монодисперсным с диаметром частиц d_P= 100 мкм и d_P= 60 мкм с плотностью ρ_P = 700 кг/м^3. Начальная скорость частиц задавалась равной скорости воздуха v_P=v_0 = 1,46 м/с. Выпуск частиц производился по входной границес равномерным распределением частиц по площади. На твердых границах установлено условие абсолютно упругого отскока частиц («reflect»), а на выходной границе – исход из расчетной области(«escape»).

Расчетная сетка – структурированная гексаэдрическая, где каждая ячейка представляет собой куб, первоначальные размеры которого равны 0.01×0.01×0.01м^3. Далее при исследовании на «сеточную зависимость» сетка измельчалась. Был проведен 1 этап адаптации по всей области (сетка №1), а далее 3 раза проводилось измельчение двух слоев ячеек вдоль твердых стенок (таблица 2).

Таблица 2

Характеристики расчетной сетки при исследовании на «сеточную зависимость»

№ сетки	Характеристики расчетной сетки				
	Количество ячеек, шт.	Количество узлов, шт.	Размер ячейки, мм		y*
			макс.	мин.	
0	400 000	441 441	10	10	~30
1	1 408 000	1 665 945	5	5	14,92
2	3 592 000	4 786 569	5	2,5	8,36
3	12 440 000	17 427 833	5	1,25	4,87
4	48 056 000	68 310 377	5	0,625	2,66

Коэффициент сопротивления трения λ определяется по рассчитанному численно распределению полного давления по длине канала. Для этого через расстояние B/4 =

0,025м строятся поперечные сечения, в которых определяются значения осредненного по расходу значения полного давления. При этом из-за установки входного ГУ в виде равномерно распределенной скорости, на начальном участке канала наблюдается деформация полей скорости и давлений, выражающаяся в существенном изменении значения λ, то есть Δλ> 1% (рис. 3). График изменения λ по длине канала построен для случая модели турбулентности k-ωSST с G_P/G_G = 1; d_P = 100мкм. Видно, что для участка канала *x/B*> 10,75 резкое изменение λ прекращается, и по расчетам, относительное изменениеΔλ становится ≤ 1%. На этом участке определяется значение среднего коэффициента сопротивления трения, который в данном случае равен 0,03023. Значение λ, найденное в этом случае по известным достоверным зависимостям (например, формула Альтшуля), составляет 0,0318.

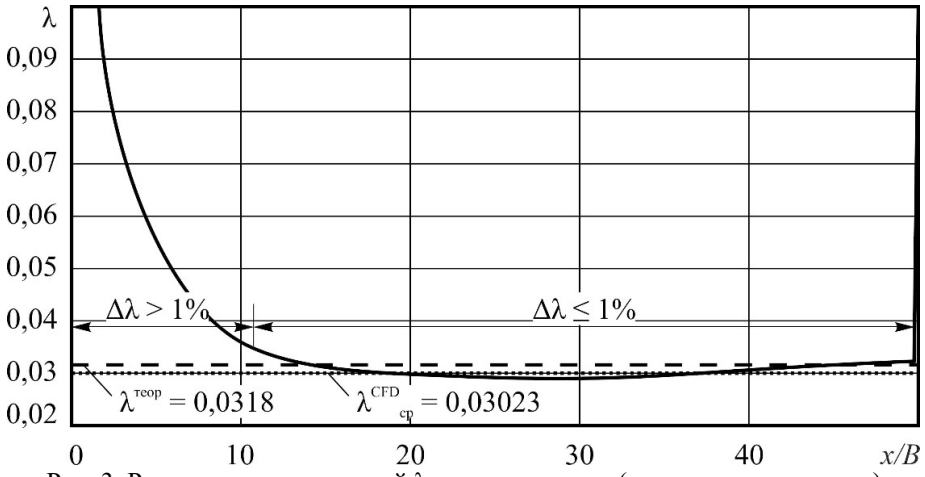

Рис. 3. Распределение значений λ по длине канала(иллюстрация авторов)
Fig. 3. Distribution of λ values along the channel length (illustration by the authors)

Аналогично определяются значения λ_0 и λ_P для всех исследованных моделей.
The values of λ0 and λP are determined similarly for all the models studied.

3. Результаты и обсуждение

Для незапыленного потока воздуха одновременно с проверкой на сеточную зависимость проводилась и валидация модели при сравнении с известными значениями коэффициента сопротивления трения (рис. 4).

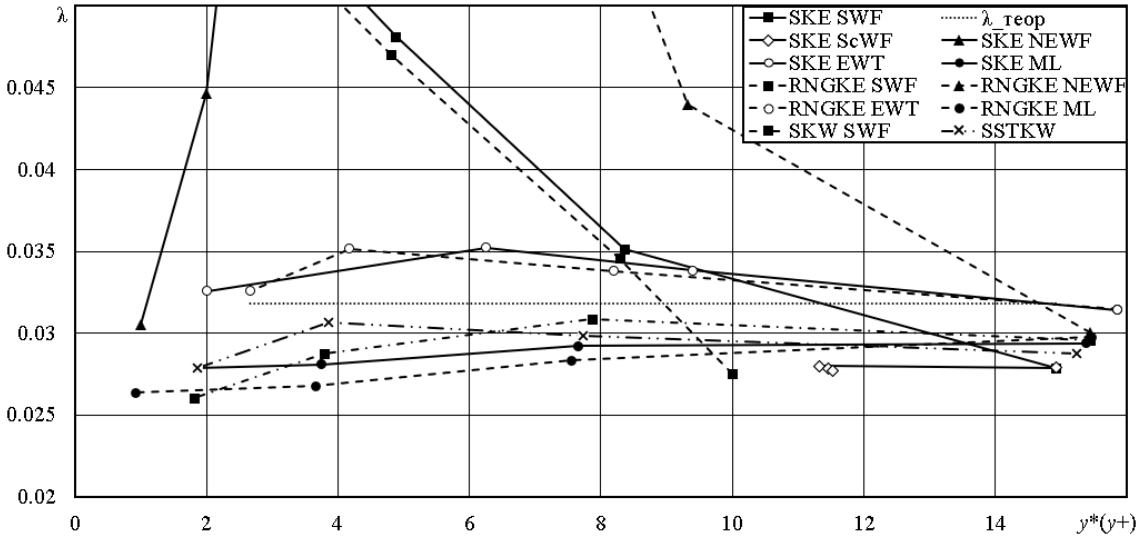

Рис. 4. Изменение значений λ при верификации и валидации(иллюстрация авторов)
Fig. 4. Change in λ values during verification and validation (illustration by the authors)

На рисунке показано изменение значений λ при измельчении расчетной сетки, которое характеризуется значением величины безразмерного расстояния *y** (*y*+ для EWT) [25]. Видно, что, в основном, использование разных моделей турбулентности в сочетании

со стандартными (SWF) и неравновесными пристеночными функциями (NEWF) показывает нестабильный результат при измельчении сетки. Использование расширенного пристеночного моделирования (EWT), масштабируемых пристеночных функций (ScWF) и пристеночная модель Menter-Lechner (ML) приводит к более стабильным результатам – изменение значения λ при измельчении сетки в диапазоне величин 15 <y+ < 2 не превышает 10%. Использование сочетания SKEEWT приводит к наименьшему отличию от значения $\lambda^{теор}$ и составляет 2,3%.

По результатам исследования течения чистого воздуха, далее используется, в основном, расширенное пристеночное моделирование (EWT) и те модели турбулентности, которые приводят к наиболее стабильным и близким к, уже известным, результатам. Результаты определения коэффициента сопротивления при течении запыленного воздуха λ_P приведены в таблице 3 и на гистограмме (рис. 6).

Таблица 3

Значения λ_P, с использованием разных моделей, для разных значений относительной массовой концентрации G_P/G_G и диаметров частиц d_P

G_P/G_G, кг/кг→	0	1		2
d_P, мкм →	0	60	100	100
Вариант расчета↓	λ_P [$(\lambda_0-\lambda_P)/\lambda_0$] ↓			
Boyce[3]	0.03180 [0.0%]	0.02194 [31%]	0.02482 [21.94%]	0.02655 [16.5%]
DES	0.02954[0.0%]	-	0.02848 [3.60%]	0.02848 [3.60%]
RKE EWT	0.03200 [0.0%]	0.03200 [0.0%]	0.03225 [-0.80%]	-
RNGKE EWT	0.03258 [0.0%]	0.03258 [0.0%]	0.03292 [-1.04%]	0.02216 [32%]
SKE EWT	0.03256 [0.0%]	0.03256 [0.0%]	0.03289 [-0.99%]	0.03256 [0.0%]
SST KW	0.02787 [0.0%]	0.02845 [-2.05%]	0.03289 [-17.98%]	0.02880 [-3.31%]

Для возможности сравнения получаемых результатов, значения λ (рис. 1, [3]) пересчитаны с использованием λ_0 = 0,0318, найденного при исследуемых числах Re, и для двух диаметров частиц 60мкм и 100мкм. Значками показаны результаты экспериментов, а линиями - их интерполяция (рис. 5).

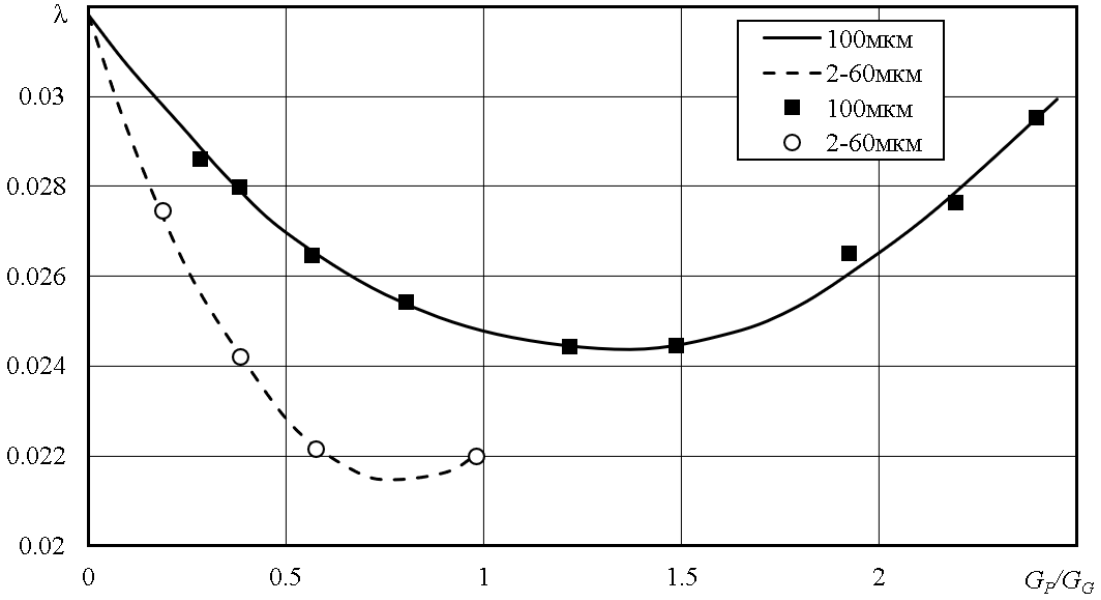

Рис. 5. Зависимость коэффициента сопротивления λ для запыленного потока от относительной массовой концентрации G_P/G_G[3] для диаметров частиц d_P = 2-60мкм и 100 мкм, пересчитанного с использованием λ_0 = 0,0318 (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Dependence of the resistance coefficient λ for a dusty flow on the relative mass concentration G_P/G_G [3] for particle diameters d_P = 2–60 μm and 100 μm, recalculated using λ_0 = 0.0318 (illustration by the authors)

Для сравнения, полученные данные численных расчетов и данные [3], представлены в виде гистограммы (рис. 6).

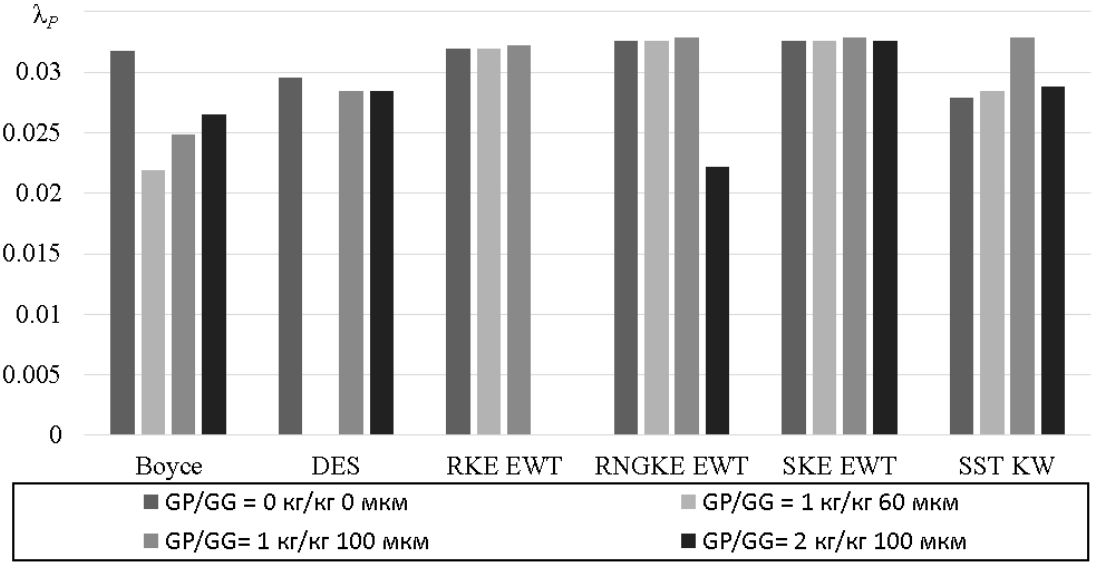

Рис. 6. Сравнение результатов расчета λ_P для запыленного потока (иллюстрация авторов)
Fig. 6. Comparison of λ_P calculation results for a dusty flow (illustration by the authors)

Видно, что несмотря на то, что согласно экспериментальным данным [3] есть видимая зависимость коэффициента сопротивления λ_P при течении запыленного воздуха, как от относительной массовой концентрации G_P/G_G, так и от диаметра частиц d_P, при численных расчетах такой зависимости не наблюдается ни при одном из исследованном сочетании моделей. В случае заметного отличия от значения λ для чистого воздуха, количественное значение λ_P существенно отличается от известных значений.

При этом полученные, в результате численных расчетов, результаты позволяют в достаточной степени адекватно оценивать и определять поведения частиц пыли, их траектории. На рис. 7 показаны траектории частиц пыли, рассчитанные численно, с использованием указанных выше моделей, для параметров пыли: $v_P=v_0$ = 17,9 м/с; G_P = G_G =0,21928кг/с; G_P/G_G = 1; d_P= 100 мкм;ρ_P = 700 кг/м^3.

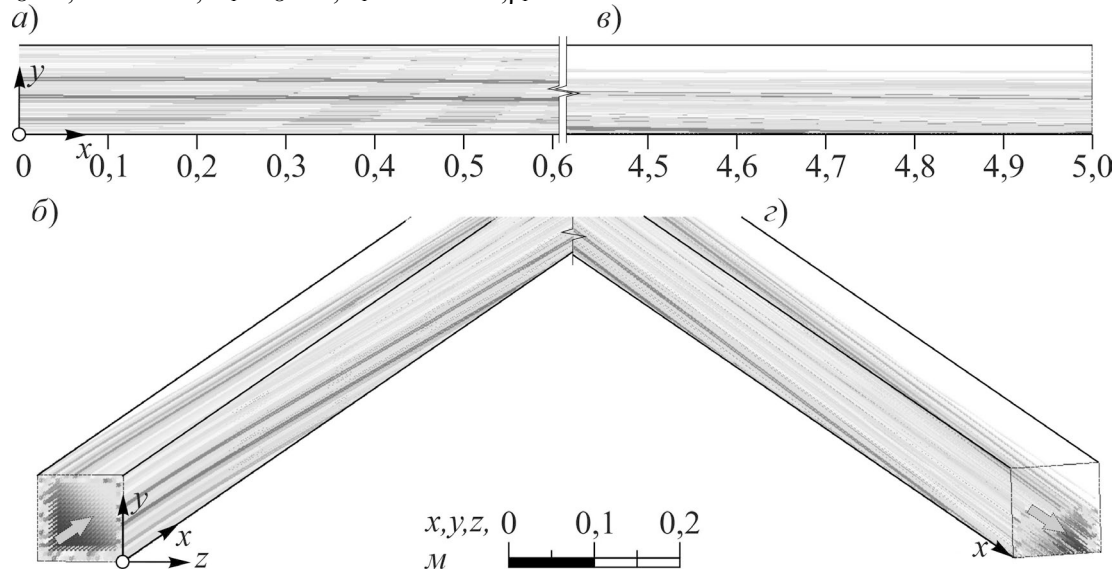

Рис. 7. Траектории частиц: *а*), *б*) – начальный участок канала, вид сбоку и в изометрии; *в*), *г*) – конечный участок канала, вид сбоку и в изометрии
(иллюстрация авторов)
Fig. 7. Particle trajectories: a), b) – initial section of the channel, side view and isometric view; c), d) – end section of the channel, side view and isometric view
(illustration by the authors)

На рис. 8 показаны траектории частиц пыли, рассчитанные численно, с использованием указанных выше моделей, для тех же параметров пыли, но с плотностью частиц в 10 раз выше: $\rho_P = 7000$ кг/м^3.

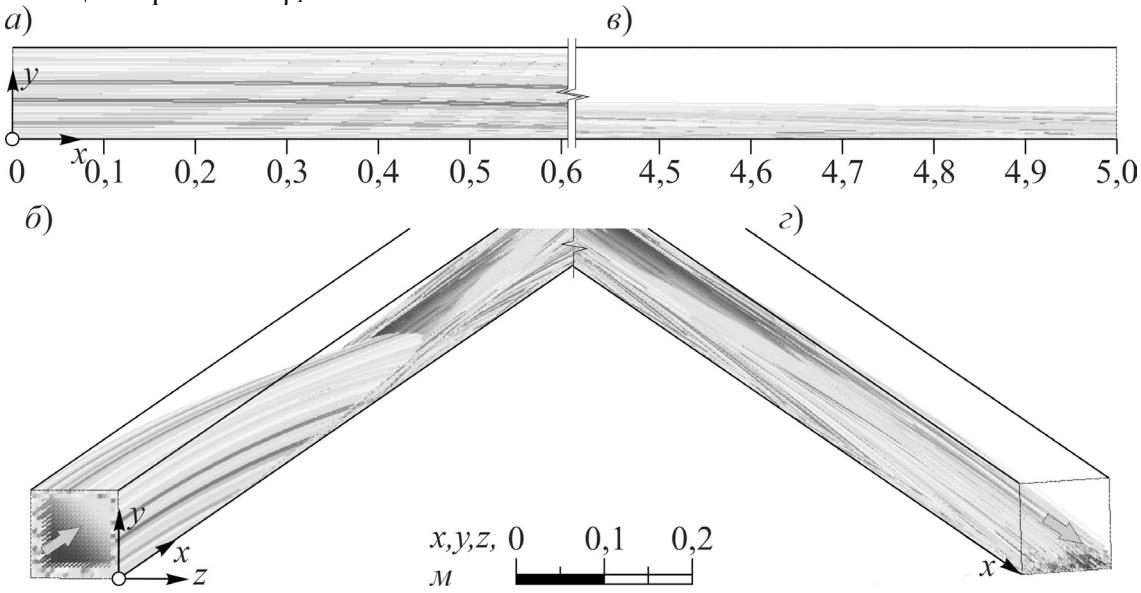

Рис. 8. Траектории частиц: *а*), *б*) – начальный участок канала, вид сбоку и в изометрии; *в*), *г*) – конечный участок канала, вид сбоку и в изометрии
(иллюстрация авторов)
Fig. 8.Particle trajectories: a), b) – initial section of the channel, side view and isometric view; c), d) – end section of the channel, side view and isometric view
(illustration by the authors)

Видно, что увеличение плотности, приводит к более раннему снижению траекторий частиц. Это показывает возможность использования приведенных настроек при численном исследовании поведения частиц в пылевоздушном потоке.

4. Заключение

1. При использовании различных сочетаний моделей турбулентности и пристеночных функций смоделировано течение незапыленного чистого воздуха в квадратном канале. Найдено наиболее адекватное сочетание моделей – «стандартная k-ε» модель турбулентности и расширенное пристеночное моделирование (SKEEWT);
2. С использованием найденного сочетания моделей турбулентности и пристеночного моделирования и обычно рекомендуемых настроек для дискретной фазы, создана компьютерная модель пылевоздушного течения в квадратном канале, разработана методика определения коэффициента сопротивления для запыленного потока.
3. Найденные траектории пылевых частиц демонстрируют адекватность компьютерной модели по визуализации их движения. Для определения коэффициента сопротивления λ предложенные настройки компьютерной модели приводят к неверным результатам и необходимы дополнительные исследования по корректировке настроек моделирования дискретной фазы.

Список литературы/References

1. Peters L.K., Klinzing G.E. Friction in turbulent flow of solids-gas systems // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 1972. Vol. 50, No. 4. P. 441–444. DOI: 10.1002/cjce.5450500401.
2. McCarthy H.E., Olson J.H. Turbulent Flow of Gas-Solids Suspensions // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1968. Vol. 7, No. 3. P. 471–483. DOI: 10.1021/i160027a019.

3. Boyce M.P. Fluid flow phenomena in dusty air. The University of Oklahoma,1969. - 204 p.
4. Soo S.L., Trezek G.J. Turbulent pipe flow of magnesia particles in air // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. 1966. Vol. 5, No. 3. P. 388–392. DOI: 10.1021/i160019a016.
5. Saffman P.G. On the stability of laminar flow of a dusty gas // Journal of Fluid Mechanics. 1962. Vol. 13, No. 1. P. 120–128. DOI: 10.1017/S0022112062000555.
6. Michael D.H. The stability of plane Poiseuille flow of a dusty gas // Journal of Fluid Mechanics. 1964. Vol. 18, No. 1. P. 19–32. DOI: 10.1017/S0022112064000027.
7. Klinkenberg J., Sardina G., De Lange H.C., Brandt L. Numerical study of laminar-turbulent transition in particle-laden channel flow // Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. 2013. Vol. 87, No. 4. P. 1–11. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.043011.
8. Leskovec M., Zade S., Niazi M., Costa P., Lundell F., Brandt L. Turbulent pipe flow with spherical particles: Drag as a function of particle size and volume fraction // International Journal of Multiphase Flow. Elsevier Ltd, 2024. Vol. 179, № July. P. 104931. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104931.
9. Li Y., McLaughlin J.B., Kontomaris K., Portela L. Numerical simulation of particle-laden turbulent channel flow // Physics of Fluids. 2001. Vol. 13, No. 10. P. 2957–2967. DOI: 10.1063/1.1396846.
10. Dave H., Kasbaoui M.H. Mechanisms of drag reduction by semidilute inertial particles in turbulent channel flow // Physical Review Fluids. 2023. Vol. 8, No. 8. P. 1–28. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.8.084305.
11. Liu Y., Gao R., Zhang Z., Zhu W., Zhou L., Jing R., Zheng Q., Li A. Study on resistance reduction in a jugular profiled bend based on entropy increase analysis and the field synergy principle // Building and Environment. 2021. Vol. 203. P. 108102. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108102.
12. Gao R., Wang M., Guo W., Zhang S., Wen S., Wu D., Zhou H., Li A. Study of the shape optimization of a variable diameter in a ventilation and air-conditioning duct based on the Boltzmann function // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. P. 102833. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102833.
13. Зиганшин А.М., Каримуллин Т.Л., Логачёв К.И., Кареева Ю.Р. Очертания вихревых зон и разработка энергоэффективных крестовин вытяжных вентиляционных систем // Известия ВУЗов. Строительство. 2024. № 9. С. 77–87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87.
Ziganshin A.M., Karimullin T.L., Logachev K.I., KareevaYu.R. Outlines of vortex zones and development of energy-efficient crosspieces for exhaust ventilation systems // News of the universities. Construction. 2024. No. 9. P. 77–87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87.
14. Ziganshin A., Logachev K., Batrova K. Reducing the drag of midpoint lateral orifices of exhaust air ducts by shaping them along vortex zone outlines // Building and Environment. 2021. Vol. 188. P. 107491. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107491.
15. Goeke S., Wünsch O. Adjoint based topology optimization of a duct bend // Pamm. 2019. Vol. 19, No. 1. P. 2–3. DOI: 10.1002/pamm.201900438.
16. Courtais A., Lesage F., Privat Y., Frey P., Latifi A. razak. Adjoint system method in shape optimization of some typical fluid flow patterns // Computer Aided Chemical Engineering. 2019. Vol. 46. P. 871–876. DOI: 10.1016/B978-0-12-818634-3.50146-6.
17. Liu M., Gao R., Zhao Y., Li A. Swirl diffuser shape optimization based on a comprehensive evaluation index for both winter and summer conditions // Indoor and Built Environment. 2025. Vol. 34, No. 4. P. 736–750. DOI: 10.1177/1420326X251319479.
18. Yagmur S. Optimizing 3D guide vanes to minimize secondary flow and energy loss in turbulent flow through a 90−Degree bend // Ocean Engineering. 2025. Vol. 319, No. December 2024. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.120219.

19. Averkova O.A., Goltsov A.B., Logachev K.I., Uvarov V.A. Numerical study of aspiration efficiency of local exhaust devices under action of cross draughts of dust-laden airflow. 2023. P. 040003. DOI: 10.1063/5.0130640.
20. Гольцов А.Б., Логачев К.И., Аверкова О.А., Елистратова Ю.В., Семиненко А.С. Численное моделирование воздушного потока в аспирационной воронке с выравнивающим устройством // Известия ВУЗов. Строительство. 2024. т. 787, № 7. С. 64–75. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-787-7-64-75.
Goltsov A.B., Logachev K.I., Averkova O.A., ElistratovaYu.V., Seminenko A.S. Numerical modeling of air flow in an aspiration funnel with a leveling device // News of the universities. Construction. 2024. Vol. 787, No. 7. P. 64–75. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-787-7-64-75.
21. Belyaeva G.I., Zamalieva A.T., Ziganshin M.G. Experimental and calculated testing of the efficiency of cyclone filtering devices // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 972, No. 1. P. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/972/1/012067.
22. Belyaeva G.I., Zamalieva A.T., Ziganshin M.G. Numerical and experimental studies of gas cleaning in multi-cyclone elements with filter inserts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 481, No. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012041.
23. Ибятов Р.И., Ахмадиев Ф.Г., Зиннатуллина А.Н., Киселева Н.Г. Компьютерное моделирование процессов разделения двухфазных сред в сепараторах с криволинейными вставками // Вестник Технологического университета. 2025. Vol. 28, № 3. P. 85–90. DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_3_85.
Ibyatov R.I., Akhmadiev F.G., Zinnatullina A.N., Kiseleva N.G. Computer modeling of two-phase separation processes in separators with curved inserts // Bulletin of the Technological University. 2025. Vol. 28, No. 3. P. 85–90. DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_3_85.
24. Ibyatov R.I., Akhmadiev F.G., Galimov R.A., Galiev D.M. Computer Simulation of the Flow of Non-Newtonian Two-Phase media in Areas of Complex Geometry // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. Vol. 58, No. 4. P. 1265–1271. DOI: 10.1134/S0040579524602000.
25. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - Near-Wall Treatments for Wall-Bounded Turbulent Flows. 4.12.1 Overview [Electronic resource]. 2024. URL: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node98.htm.

Информация об авторах

Зиганшин Арслан Маликович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: amziganshin@kgasu.ru, ORCID: 0000-0001-7335-7797
Черных Владислав Леонидович, инженер-проектировщик ОВиКВ, ООО «Метрополис», г. Казань, Российская Федерация
Email: vladislav_cherhykh@inbox.ru, ORCID: 0009-0003-7647-6339
Логачев Константин Иванович, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация
Email: kilogachev@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0632-6784
Сарчин Руслан Рашидович, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: sarchinrr@kgasu.ru, ORCID: 0009-0008-4460-7863

Information about the authors

Arslan M. Ziganshin, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: amziganshin@kgasu.ru, ORCID: 0000-0001-7335-7797

Vladislav L. Chernyh, HVAC Design Engineer, Metropolis LLC, Kazan, Russian Federation
Email: vladislav_cherhykh@inbox.ru, ORCID: 0009-0003-7647-6339
Konstantin I. Logachev, doctor of technical sciences, professor, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation
Email: kilogachev@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0632-6784
Ruslan R. Sarchin, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: sarchinrr@kgasu.ru, ORCID: 0009-0008-4460-7863

Дата поступления: 12.04.2025 *Дата принятия: 10.06.2025*