

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

Уляшева В. М., Гримитлин А. М., Черников Н. А.

## INCREASING THE EFFICIENCY OF METHODS FOR CLEANING OF VENTILATION EMISSIONS AT CONSTRUCTION ENTERPRISES

Ulyasheva V. M., Grititlin A. M., Chernikov N. A.

### Аннотация

Производство строительных материалов, основанное на процессах дробления, сортировки обжига и транспортирования сырья и материалов, является источником значительных пылевывделений в производственные помещения и окружающую среду. Вследствие повышенной влажности исходного сырья в пылевоздушном потоке аспирационных систем в холодный период года происходит образование твердых отложений на внутренней поверхности циклонов, что приводит к снижению его эффективности, а в некоторых случаях и к выходу из строя. Учитывая наличие на промышленной площадке цеха по производству известняковой муки, технологический процесс которого связан с обжигом исходных материалов, предложено смешивать горячие технологические (выхлопные) газы из цеха известняковой муки и холодные пылевоздушные потоки для снижения теплового воздействия на атмосферу, повышения эффективности очистки вентиляционных выбросов из цеха нерудных материалов и экономических показателей предприятия. Несмотря на значительное количество работ, связанных с исследованием аэродинамических процессов в аспирационных системах, процессы смешивания низкотемпературных пылевоздушных и высокотемпературных потоков выхлопных газов требуют изучения методами теоретического анализа на основе фундаментальных положений тепломассообмена и аэродинамики, а также с использованием современных вычислительных программ. В данной работе на основании численного моделирования с применением программного комплекса STAR-CCM+ получены данные о распределении температур и скоростей в зоне смешивания потоков, в результате обоснованы наиболее рациональная схема узла смешивания потоков, а также соотношение расходов холодного и горячего потоков.

**Ключевые слова:** аспирационная система, известняковая мука, циклон, пылевоздушный поток, численное моделирование

### Введение

Технологические процессы предприятий строительной индустрии по переработке сырья и производству строительных материалов включают следующие операции: дробление, сортиров-

### Abstract

Production of building materials, based on processes of crushing, sorting, firing and transportation of raw and other materials, represents a source of significant dust at production facilities and in the environment. Due to high humidity of feedstock in dust-air flows of aspiration systems in the cold period of the year, solid deposits form on the inner surfaces of cyclones, leading to a decrease in their efficiency, and in some cases — to failure. Taking into account the availability of a limestone flour production shop at the industrial site, where the production process is related to firing of raw materials, it is proposed to mix hot process (exhaust) gases from the limestone flour production shop and cold dust-air flows to reduce the thermal effect on the atmosphere, improve the efficiency of cleaning ventilation emissions from the shop of non-metallic materials, and economic performance of the enterprise. Despite the significant amount of publications related to studies of aerodynamic processes in aspiration systems, processes of mixing low-temperature dust-air flows and high-temperature exhaust-gas flows require theoretical analysis methods based on the fundamental provisions of heat and mass transfer and aerodynamics, as well as modern computer programs. In this paper, on the basis of numerical simulation, using the STAR-CCM+ software package, data on distribution of temperatures and velocities in the flow mixing zone are obtained, and, as a result, a rationale for the optimal scheme of the flow mixing joint, as well as the ratio of cold and hot flow rates, is provided.

**Keywords:** aspiration system, limestone flour, cyclone, dust-air flow, numerical simulation.

ку, транспортирование и обжиг сырья, а также транспортирование готовых материалов. При этом фракционный состав сырья и материалов варьируется от крупнокускового до порошкообразного. Практически на всех этапах производ-

тва строительных материалов в окружающую среду поступает значительное количество пыли. Для обеспечения нормируемых параметров микроклимата в цехах предусматриваются аспирационные системы с технологическими отсосами. В аспирационных системах таких цехов используются преимущественно сухие пылеуловители (циклоны), размещаемые на территории промышленных площадок. Такие аппараты позволяют утилизировать отходы для повышения экономических показателей предприятия. В работе исследуется функционирование аспирационных систем цеха нерудных материалов, размещенного в Северной климатической зоне. В силу повышенной влажности исходного сырья в холодный период года в пылевоздушном потоке аспирационных систем происходит образование твердых отложений на внутренней поверхности циклонов, что приводит к снижению его эффективности, а в некоторых случаях и к выходу из строя. Одновременно на промышленной площадке в непосредственной близости размещается цех по производству известняковой муки, для получения которой исходное сырье обжигают в печах. В результате этого процесса в атмосферу выбрасываются горячие отработанные газы. Для снижения теплового воздействия на атмосферу и повышения эффективности очистки вентиляционных выбросов из цеха нерудных материалов в работе [16] предложено смешивать горячие технологические газы из цеха известняковой муки и холодные пылевоздушные потоки.

В теорию и практику аэродинамики и очистки пылевоздушных потоков существенный вклад внесли отечественные и зарубежные ученые: Г. Н. Абрамович [1], В. Н. Азаров [2], Л. С. Клячко [10], П. А. Коузов [11], И. Н. Логачев, К. И. Логачев, В. И. Минко [13], О. Д. Нейков [14], А. И. Пирумов [15] и др. Однако процессы смешивания низкотемпературных пылевых и высокотемпературных газовых потоков требуют изучения как с позиции аэродинамического взаимодействия, так и с позиции процессов тепло-массообмена. В данной работе предпринята попытка использовать возможности современных численных методов расчета для повышения эффективности аэродинамического процесса смешивания вышеуказанных сред. Таким образом, цель исследования совершенствование методов

расчета аэродинамических процессов смешивания пыле-, газо-воздушных потоков для снижения пылевых и тепловых выбросов на предприятиях строительной индустрии. Основная задача данной работы — численное моделирование процессов смешивания воздушных потоков для обоснования рационального варианта узла смешивания.

#### **Методы и материалы**

Методологической основой исследования являются основные положения теории тепло-массообмена и аэродинамики гидродинамических потоков. В работе использован метод численного моделирования.

Предприятия по производству строительных материалов, как правило, располагаются в промышленных зонах, в большинстве случаев характеризующихся дефицитом тепловой энергии. В результате в производственных помещениях в холодный период года имеет место низкая температура воздуха. В цех нерудных материалов поступает из карьера мерзлая порода. Технологический процесс в данном цехе связан с дроблением породы в нескольких установках, которые объединены общей конвейерной линией. Для удаления пыли, неизбежно образующейся при дроблении материалов, предусмотрена аспирационная система с сухими циклонами, установленными вне цеха. Поскольку исходный материал на входе в технологическую линию имеет температуру, близкую к температуре наружного воздуха, то за период производственного цикла в холодный период года материал и пыль данного материала не достигают даже минимальной величины температуры внутреннего воздуха. Результаты анализа [16] показывают, что температура запыленного потока на входе в систему аспирации составляет не выше 2°C, на входе в циклон температура потока существенно ниже 0°C. Учитывая высокую влажность удаляемой пыли, это приводит к замораживанию пыли на стенках циклона и, соответственно, практической остановке процесса очистки.

Одновременно на территории промышленного предприятия в непосредственной близости от цеха нерудных материалов располагается цех по производству известняковой муки, технологический процесс которого связан с обжигом исходного сырья, в результате которого в атмос-

феру удаляются высокотемпературные (порядка 120°C) потоки отходящих газов. В работе [16] предложено использовать теплоту этого потока путем смешивания с холодным запыленным из цеха известняковой муки для обеспечения надежного обеспыливания вентиляционных выбросов и снижения загрязнения атмосферы. В связи с началом восстановления производства строительных материалов на предприятии строительной индустрии возникла необходимость разработки технической документации рассматриваемого инженерного решения на основе современных методов моделирования.

Исследованию процессов удаления пыли из производственных помещений и технологических установок посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ, в частности работы [2, 3, 5, 10, 11, 13–15]. Однако при проведении экспериментальных исследований в лабораторных и натуральных условиях существенное влияние оказывают многочисленные случайные факторы. Для получения подробных данных о распределении параметров тепло- и гидрогазодинамических процессов широко используются современные программные продукты, такие как ANSYS, Star-CCM+ и ряд других [17–21].

В основу численного моделирования турбулентных потоков при наличии источников теплоты и примеси положено численное решение системы дифференциальных уравнений неразрывности, сохранения импульса Навье–Стокса, энергии и примесей:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j + \bar{\rho}' u_j') &= S_m \\ \rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) &= - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + S_i \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a} u_j)}{\partial x_j} &= - \frac{\partial (\rho u_j' a')}{\partial x_j} + \bar{J}_a, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $t$  — время;  $\rho$  — плотность;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости;  $\bar{u}_j$  — компоненты вектора осредненной скорости по осям координат;  $\tau'_{ij}$  — турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса);  $u'_i, u'_j, T', C'$  — локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока;  $\bar{a}$  — осредненные значения удельной плотности скалярной величины;  $S_m, S_i$  — ин-

тенсивность источников массы и импульса;  $\bar{J}_a$  — интенсивность источников примеси.

### Результаты исследования и обсуждение

В работе [9] приведено подробное описание построения геометрической модели исследуемого процесса на основе принципов трехмерного проектирования в системе КОМПАС-3D [6–8, 12]. Построено несколько вариантов геометрической модели, один вариант модели приведен на рис. 1. Геометрические модели использованы для численного моделирования процесса смешивания в программе STAR-CCM+.

Для определения параметров исследуемых потоков выполнен расчет потерь теплоты через стенку корпуса циклона на основании следующих исходных данных, полученных на основании натуральных исследований [9, 16]:

- температура наружного воздуха  $t_n = -31^\circ\text{C}$ ;
- температура запыленного воздуха  $t_3 = +2^\circ\text{C}$ ;
- относительная влажность запыленного воздуха  $\varphi_3 = 95\%$ ;
- материал стенки циклона Ст 3 с толщиной стенки  $\delta = 3$  мм;
- температура выхлопных газов  $t_r = +120^\circ\text{C}$ ;
- относительная влажность горячего газа  $\varphi_r = 6\%$ ;
- производительность аспирационной системы по воздуху  $L_3 = 3000$  м<sup>3</sup>/ч;
- расход выхлопных газов  $L_r = 600$  м<sup>3</sup>/ч;
- диаметр циклона серии ЦН ОАО «НИИОГАЗ»  $D = 0,63$  м.

На основании данных работы [4] определена температура точки росы в циклоне, которая составила при использовании системы без подмешивания  $t_{т.р} = +1,5^\circ\text{C}$ , при подмешивании  $t_{т.р} = -12^\circ\text{C}$ .

Для нахождения температуры внутренней поверхности стенки циклона выполнен расчет соответственно коэффициентов теплоотдачи при свободном внешнем обтекании вертикальной трубы и вынужденном внутреннем движении воздушного потока с учетом данных [4] по известным критериальным зависимостям:

$$\text{Nu}_{\text{св}} = 0,8(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \cdot \varepsilon \quad (2)$$

$$\text{Nu}_{\text{вын}} = 0,322 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_c}\right)^{0,25}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — поправка, учитывающая зависимость числа Прандтля от температуры;  $\text{Nu}$  — критерий Нуссельта;  $\text{Pr}$  — критерий Прандтля, опре-



Рис. 1. Геометрическая модель узла смешивания потоков

деляется по данным работы [4] по температуре потока и стенки (индекс «с»); Gr, Re — критерии Грасгофа и Рейнольдса, определяемые по зависимостям:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3}{\nu^2} \Delta t; \quad (4)$$

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}; \quad (5)$$

$$\varepsilon = \left[ 1 + \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{Pr}} \right)^2 \right]^{-1/4}, \quad (6)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения,  $K^{-1}$ ;  $d$  — диаметр, м (для горячего потока 125 мм, для холодного запыленного 250 мм);  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости,  $m^2/c$ ;  $w$  — скорость движения потока,  $m/c$ .

Коэффициенты теплоотдачи определены по формуле,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ :

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $Вт/(m \cdot K)$ .

Для наружной поверхности циклона коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_n = 33,5 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$ , для внутренней поверхности  $\alpha_b = 5,1 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$ . Исходя из полученных данных определен с учетом характеристики материала стенки [4] коэффициент теплопередачи,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}}. \quad (8)$$

Для определения плотности теплового потока через поверхность стенки и температуры на стенке использовано выражение:

$$q = k(t_b - t_n) = \alpha_b(t_b - t_{b,c}) = \alpha_n(t_{n,c} - t_n), \quad (9)$$

где  $t_b$  — температура потока внутри циклона,  $^{\circ}C$ .

Отсюда температура на внутренней поверхности

$$t_{b,c} = t_b - \frac{k}{\alpha_b}(t_b - t_n). \quad (10)$$

Для аспирационной системы без подмешивания выхлопных газов температура внутренней поверхности стенки составляет  $-17,7 \text{ }^{\circ}C$ , при этом температура точки росы  $t_{т,р} = 1,5 \text{ }^{\circ}C$ . При подмешивании выхлопных газов к холодному запыленному температура внутренней поверхности стенки составляет  $2 \text{ }^{\circ}C$ , при этом температура точки росы  $t_{т,р} = -12 \text{ }^{\circ}C$ , т. е. выполняется условие  $t_{b,c} > t_{т,р}$ . При этом обеспечивается, с одной стороны, надежная работа циклона по очистке от пыли вентиляционных выбросов цеха нерудных материалов, с другой — уменьшается объем тепловых выбросов из цеха по производству известняковой муки.

Для нахождения рациональной формы узла смешивания холодного и теплого потоков используется численное моделирование процессов тепло- массообмена и аэродинамики с применением программы Star-CCM+. Помимо указанных выше исходных параметров приняты также характеристики пыли: динамическая вязкость, молекулярная масса и удельная теплоемкость. На основании вышеприведенных расчетов процесса теплопередачи через стенку циклона определена требуемая конечная температура  $22 \text{ }^{\circ}C$  пылегазовоздушного потока для обеспечения эффективной работы циклона. Длина участка смешивания принята неизменной. В расчете принята  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности.

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования процессов смешивания при различных вариантах угла наклона подачи горячего потока в холодный пылевоздушный. На рис. 2, а-д прямой участок узла смешивания не изменялся. На рис. 2, а-в приведено распределение температуры потоков. Рис. 2, а отличается наименее низкой температурой по сечению воздухопровода, значительной зоной с температурой, близкой к  $0 \text{ }^{\circ}C$ . Результаты численного расчета (рис. 2, б) показывают, что при подмешивании горячего потока под углом  $90^{\circ}$  удалось обеспечить лучшее перемешивание. Но в этом случае также по всей длине участка смешивания имеет место зона с температурой, близкой к  $0 \text{ }^{\circ}C$ . При использовании рис. 2, в (угол наклона горячего

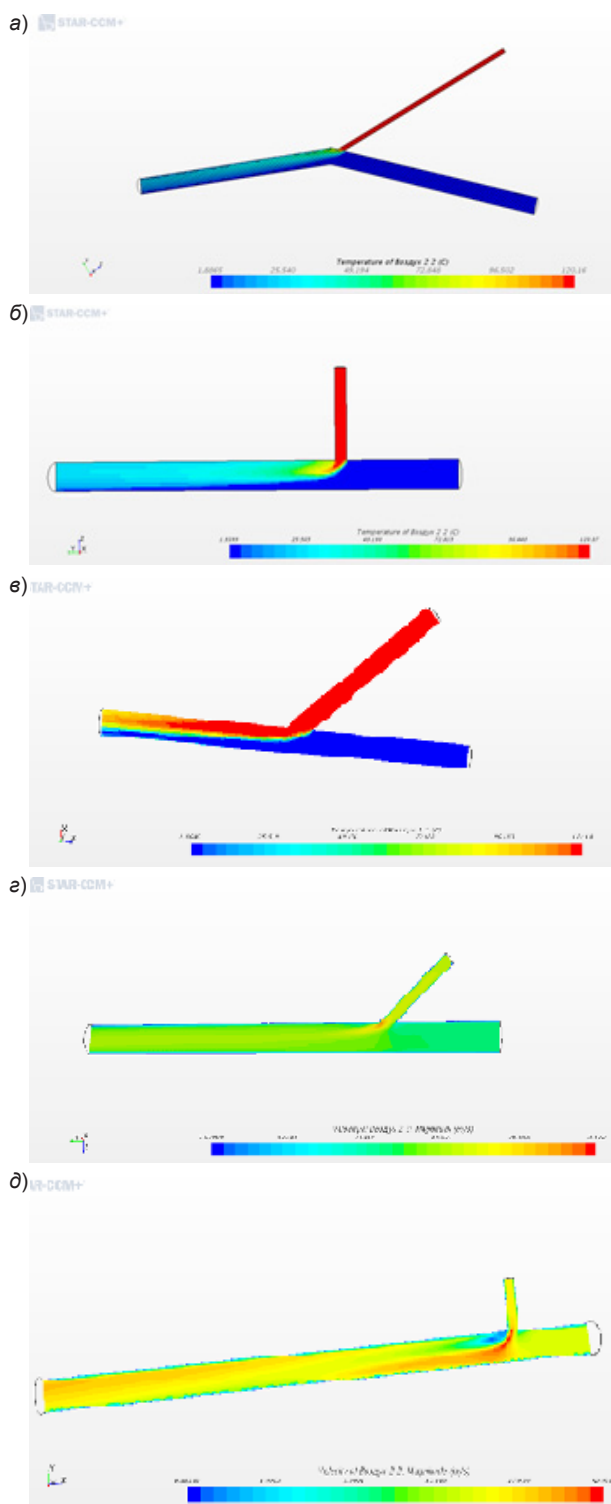


Рис. 2. Результаты численного эксперимента

потока 45°) потоки интенсивно смешиваются, но для обеспечения равномерного распределения температуры необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия. На рис. 2, з приведена схема с углом наклона горячего потока 45°, которая характеризуется достаточно равномерным распределением скорости потоков. Распределение скорости потока на рис. 2, д также равномерное, но особенности температурного поля (рис. 2, б) не позволяют принять данную схему как рациональную.

В качестве рациональной схемы выбрана схема с углом наклона горячего потока 45°, причем в конце участка смешивания предусмотрено сужение основного воздуховода. За счет этого в конце участка смешивания происходит вторичное перемешивание потоков, что подтверждается распределением скорости (рис. 3, а) и температуры в отдельных сечениях участка смешивания (рис. 3, б).

В табл. 1 приведен анализ средних значений скорости и температуры для сечения в конце

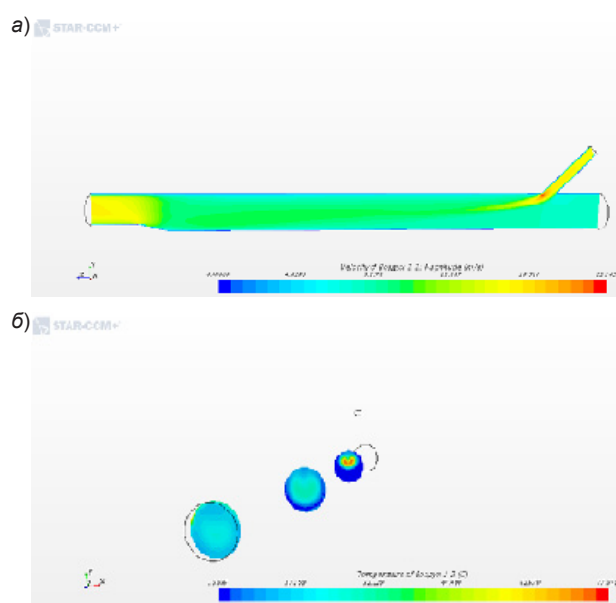


Рис. 3. Результаты численного моделирования для рациональной схемы узла смешивания потоков

Таблица 1

Результаты теоретического расчета		Результаты численного моделирования	
Скорость, м/с	Температура, °С	Скорость, м/с	Температура, °С
16	22	18	24

участка смешивания по результатам теоретического расчета и численного моделирования.

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что имеет место удовлетворительное (в пределах 10 %) соответствие сравниваемых параметров.

### Заключение

1. Использование утилизации теплоты газовоздушного потока от печей цеха производства известняковой муки позволит обеспечить необходимую температуру пылевоздушного потока для повышения надежности работы циклона в аспирационной системе цеха нерудных материалов, а также обеспечить снижение объемов тепловых выбросов в атмосферу.

2. На основе метода численного моделирования с применением программного комплекса STAR-CCM+ обоснована наиболее рациональная схема узла смешивания потоков, соотношение расходов холодного и горячего потоков.

### Литература

1. Абрамович, Г. Н. (1984). Теория турбулентных струй. 2-е изд. М.: Наука, 717 с.
2. Азаров, В. Н. (2004). Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет.
3. Алиев, Г. М.-А. (1986). Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. М.: Metallurgiya, 544 с.
4. Аметистов, Е. В., Григорьев, В. А., Емцев, Б. Т., Клименко, А. В., Комендантов, А. С., Круг, Г. К., Кувалдин, А. Б., Лабунцов, Д. А., Морозкин, В. П., Павлов, Ю. М., Протопопов, В. С., Созийев, Р. И. и Тоцкий, В. Р., Чистяков, В. С., Шпильрайн, Э. Э. и Ягов, В. В. (1982). Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. М.: Энергоиздат, 512 с.
5. Биргер, М. И., Вальдберг, А. Ю., Мягков, Б. И., Падва, В. Ю., Русанов, А. А. и Урбах, И. И. (1983). Справочник по пыле- и золоулавливанию. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 312 с.
6. Большаков, В. П. и Бочков А. Л. (2012). Основы 3D-моделирования. Изучаем работу в AutoCAD, КОМПАС-3D, Solid Works, Inventor. СПб.: Питер-Пресс, 304 с.
7. Бочков А. Л. (2007). Трехмерное моделирование в системе Компас-3D (практическое руководство). СПб.: СПбГУ ИТМО, 80 с.
8. Ганин, Н. Б. (2012). Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D. М.: ДМК-Пресс, 784 с.
9. Губин, Е. И. (2018). К вопросу моделирования процесса смешивания запыленных потоков. В: XXX Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и докторантов «Актуальные проблемы науки 21 века», М.: Cognitio, сс. 35–41.

10. Клячко, Л. С., Одельский, Э. Х. и Хрусталева, Б. М. (1983). Пневматический транспорт сыпучих материалов. Минск: Наука и техника, 216 с.

11. Коузов, П. А., Мальгин, А. Д. и Скрябин, Г. М. (1993). Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. 2-е изд. СПб.: Химия, 320 с.

12. Куничан, Г. И., Смирнова, Т. Н. и Идт, Л. И. (2016). Построение объемных моделей в системе КОМПАС-3D. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 65 с.

13. Минко, В. А., Логачев, И. Н. и Логачев, К. И. (2009). Обеспыливающая вентиляция. М.: Теплотехник, 464 с.

14. Нейков, О. Д. и Логачев, И. Н. (1981). Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. 2-е изд. М.: Metallurgiya, 192 с.

15. Пирумов, А. И. (1981). Обеспыливание воздуха. 2-е изд. М.: Стройиздат, 296 с.

16. Уляшева, В. М., Дубенков, С. В., Басова, Ю. А. и Со рокин, Н. А. (1998). Система вентиляции цеха с пылевыведениями. Патент № 2110735.

17. Boysan, F., Ayers, W. H., Swithenbank, J. (1982). A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design. Chemical Engineering Research and Design, 60a, pp. 222–230.

18. Gosman, A. D., Ioannides, E. (1983). Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors. Journal of Energy, vol. 7, No. 6, pp. 482–490.

19. Hoekstra, A. J., Derksen, J. J. and Van Den Akker, H. E. A. (1999). An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones. Chemical Engineering Science, vol. 54, issues 13–14, pp. 2055–2065. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00373-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00373-X)

20. Pant, K., Crowe, C. T., Irving, P. (2002). On the design of miniature cyclone for the collection of bioaerosols. Powder Technology, vol. 125, issues 2–3, 260–265. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00514-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00514-9)

21. Sommerfeld, M., Ho, C. H. (2003). Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows. Powder Technology, vol. 131, issue 1, pp. 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00293-0](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00293-0)

### References

1. Abramovich, G. N. (1984). *Teoriya turbulentykh struy [The theory of turbulent jets]*. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Nauka, 717 p. (in Russian).
2. Azarov, V. N. (2004). *Kompleksnaya otsenka pylevoy obstanovki i razrabotka mer po snizheniyu zapylennosti vozduшной sredy promyshlennykh predpriyatiy [Integrated assessment of dust conditions and development of dust control measures in industrial enterprises]*. Extended abstract of the PhD thesis in Engineering. Rostov-on-Don: Rostov State University (in Russian).
3. Aliyev, G. M.-A. (1986). *Tekhnika pyleulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov [Dust collection and treatment of industrial gases]*. Moscow: Metallurgiya, 544 p. (in Russian).
4. Ametistov, Ye. V., Grigoryev, V. A., Yemtsev, B. T., Klimenko, A. V., Komendantov, A. S., Krug, G. K., Kuvaldin, A. B., Labuntsov, D. A., Morozkin, V. P., Pavlov, Yu. M., Protopopov, V. S., Soziyev, R. I., Totsky, V. R., Chistyakov, V. S., Shpilrayn, E. E., Yagov, V. V. (1982). *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnichesky eksperiment [Heat and mass exchange]*.

Heat engineering experiment]. Moscow: Energoizdat, 512 p. (in Russian).

5. Birger, M. I., Valdberg, A. Yu., Myagkov, B. I., Padva, V. Yu., Rusanov, A. A., Urbakh, I. I. (1983). *Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu [Handbook on dust and ash collection]*. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Energoatomizdat, 312 p. (in Russian).

6. Bolshakov, V. P., Bochkov, A. L. (2012). *Osnovy 3D-modelirovaniya. Izuchayem rabotu v AutoCAD, KOMPAS-3D, Solid Works, Inventor [Fundamentals of 3D modeling. Studying AutoCAD, KOMPAS-3D, Solid Works, Inventor]*. Saint Petersburg: Piter-Press, 304 p. (in Russian).

7. Bochkov A. L. (2007). *Trekhmernoye modelirovaniye v sisteme Kompas-3D (prakticheskoye rukovodstvo) [3D modeling in Kompas-3D (practical guide)]*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 80 p. (in Russian).

8. Ganin, N. B. (2012). *Trekhmernoye proyektirovaniye v KOMPAS-3D [3D design in KOMPAS-3D]*. Moscow: DMK-Press, 784 p. (in Russian).

9. Gubin, Ye. I. (2018). *K voprosu modelirovaniya protsessa smeshivaniya zapylennykh potokov [Concerning modeling of the process for mixing of dust-laden flows]*. In: *XXX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchyonykh, aspirantov i doktorantov "Aktualnye problemy nauki 21 veka" [30<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, PhD Students and Second Doctorate Students "Current Issues of Science in the 21<sup>st</sup> Century"]*, Moscow: Cognitio, pp. 35–40 (in Russian).

10. Klyachko, L. S., Odelsky, E. Kh., Khrustalev, B. M. (1983). *Pnevmatichesky transport sypuchikh materialov [Pneumatic transport for bulk materials]*. Minsk: Nauka i Tehnika, 216 p. (in Russian).

11. Kouzov, P. A., Malgin, A. D., Skryabin, G. M. (1993). *Ochistka gazov i vozdukha ot pyli v khimicheskoy promyshlennosti [Gas and air de-dusting in chemical industry]*. 2<sup>nd</sup> edition. Saint Petersburg: Khimiya, 320 p. (in Russian).

12. Kunichan, G. I., Smirnova, T. N., Idt, L. I. (2016). *Postroyeniye obyemnykh modeley v sisteme KOMPAS-3D [Building 3D models in KOMPAS-3D]*. Biysk: Publishing Center of the Altai State Technical University, 65 p. (in Russian).

13. Minko, V. A., Logachyov, I. N., Logachyov, K. I. (2009). *Obespylivayushchaya ventilyatsiya [De-dusting ventilation system]*. Moscow: Teplotekhnika, 464 p. (in Russian).

14. Neykov, O. D., Logachyov, I. N. (1981). *Aspiratsiya i obespylivaniye vozdukha pri proizvodstve poroshkov [Air aspiration and de-dusting in powder manufacturing]*. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Metallurgiya, 192 p. (in Russian).

15. Pirumov, A. I. (1981). *Obespylivaniye vozdukha [Air de-dusting]*. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Stroyizdat, 296 p. (in Russian).

16. Ulyasheva, V. M., Dubenkov, S. V., Basova, Yu. A., Sorokin, N. A. (1998). *Sistema ventilyatsii tsekha s pylevydeleniyami [Ventilation system of shop with dust formations]*. Patent No. 2110735 (in Russian).

17. Boysan, F., Ayers, W.H., Swithenbank, J. (1982). A fundamental mathematical modelling approach to cyclone

design. *Chemical Engineering Research and Design*, 60a, pp. 222–230.

18. Gosman, A. D., Ioannides, E. (1983). Aspects of computer simulation of liquid- fueled combustors. *Journal of Energy*, vol. 7, No. 6, pp. 482–490.

19. Hoekstra, A. J., Derksen, J. J., Van Den Akker, H. E. A. (1999). An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones. *Chemical Engineering Science*, vol. 54, issues 13–14, pp. 2055–2065. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00373-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00373-X)

20. Pant, K., Crowe, C. T., Irving, P. (2002). On the design of miniature cyclone for the collection of bioaerosols. *Powder Technology*, vol. 125, issues 2–3, pp. 260–265. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00514-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00514-9)

21. Sommerfeld, M., Ho, C. H. (2003). Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows. *Powder Technology*, vol. 131, issue 1, pp. 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00293-0](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00293-0)

#### Авторы

**Уляшева Вера Михайловна**, д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: ulyashevavm@mail.ru

**Гримитлин Александр Моисеевич**, д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: water@spbgasu.ru

**Черников Николай Андреевич**, д-р техн. наук, профессор Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: water@spbgasu.ru

#### Authors

**Ulyasheva Vera Mikhailovna**, Dr. of Engineering, Professor Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia  
E-mail: ulyashevavm@mail.ru

**Grimitlin Aleksander Moiseyevich**, Dr. of Engineering, Professor Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia  
E-mail: water@spbgasu.ru

**Chernikov Nikolay Andreyevich**, Dr. of Engineering, Professor Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia  
E-mail: water@spbgasu.ru