

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАМЕННОУГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ПРОТЯЖЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ

В.А. Родионов<sup>1</sup>, В.Д. Цыганков<sup>2</sup>, С.Я. Жихарев<sup>3</sup>, Д.С. Кормщииков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: 79213258397@mail.ru

<sup>2</sup> Военизированный горноспасательный пункт ФГКУ «УВГСЧ в строительстве» ВГСЧ МЧС РФ,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

**Аннотация:** Работа посвящена актуальной проблеме в сфере пожарной и промышленной безопасности горнопромышленных предприятий, добывающих, транспортирующих, перерабатывающих и складировующих каменноугольное сырье, а именно процессам пылеобразования пожаро-взрывоопасных концентраций витающей пыли, а также ее отложению на технологическом оборудовании и в труднодоступных местах. Выполнены выбор, обоснование, описание и апробация методики исследования аэродинамических свойств каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных и наклонных выработках. В основу практической составляющей методики положены натурные испытания, проводимые на разработанном авторами аэродинамическом стенде. Расчет и моделирование аэродинамических процессов распространения каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных и наклонных выработках выполнены при помощи программного комплекса ANSYS Fluent. В ходе апробации используемой нами методики была получена хорошая сходимость экспериментальных исследований с результатами разработанной авторской математической модели. Схожие результаты были получены авторами аналогичных исследований, что указывает на необходимость дальнейшей экспериментальной проверки и усовершенствования математической модели, используемой в данной работе. Описанная методика в дальнейшем может быть использована для моделирования движения и отложения угольной пыли на горнопромышленных объектах при добыче, транспортировке, пересыпе и складировании каменноугольного сырья, что в свою очередь позволит спрогнозировать места образования пожаро-взрывоопасных концентраций витающей пыли. Полученные результаты исследования могут быть использованы инженерно-техническими работниками предприятий для разработки мероприятий по уменьшению или устранению мест образования опасной концентрации пыли, т.е. для профилактики или недопущения взрывов отложений каменноугольной пыли.

**Ключевые слова:** каменноугольная пыль, аэродинамические свойства, горные выработки, уравнение Розина-Раммлера, SST модель, витающая пыль, взрывоопасная пыль.

**Для цитирования:** Родионов В. А., Цыганков В. Д., Жихарев С. Я., Кормщииков Д. С. Методика исследования аэродинамических свойств каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 69–79. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_69.

---

## Research procedure for coal dust aerodynamics in long roadways

V.A. Rodionov<sup>1</sup>, V.D. Tsygankov<sup>2</sup>, S.Ya. Zhikharev<sup>3</sup>, D.S. Kormshchikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: 79213258397@mail.ru

<sup>2</sup> Federal State Public Institution «The Directorate of the Paramilitary Mine Rescue Divisions in construction» of the Paramilitary Mine Rescue Divisions of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

---

**Abstract:** This article addresses the urgent problem of fire prevention and safety of mining practices connected with production, handling, processing and storage of coal raw material. The studies focus on fire hazardous and explosive airborne dust concentrations and depositions on process equipment and in hard-to-reach places. The article describes selection, validation and test of a research procedure for aerodynamic properties of coal dust in long horizontal and inclined roadways. The practical part of the procedure is based on the actual test data obtained using the aerodynamic test bench designed by the authors. The aerodynamic modeling and design of coal dust patterns in long horizontal and inclined roadways are implemented in ANSYS Fluent. Testing of the procedure showed a good agreement between the experimental results and the author's mathematical model data. The same output was obtained in the similar investigations. This means that the presented mathematical model is worth of experimental validation and improvement. The procedure described in this paper can be used to model coal dust flow and deposition during mining, handling, re-handling and storage of coal raw material, which can enable prediction of places of fire-hazardous and explosive concentrations of airborne dust. The research findings are applicable in elaboration of measures aimed at reduction or elimination of hazardous dust concentrations toward precaution and prevention of settled coal dust explosions.

**Key words:** coal dust, aerodynamic properties, roadways, Rosin–Rummler equation, SST model, airborne dust, explosive dust.

**For citation:** Rodionov V. A., Tsygankov V. D., Zhikharev S. Ya., Kormshchikov D. S. Research procedure for coal dust aerodynamics in long roadways. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):69-79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_69.

---

### Цель работы

Методом подбора из имеющихся в программном продукте ANSYS Fluent моделей подобрать оптимальную модель расчета для прогнозирования витания и отложения заданного дисперсного состава каменноугольной пыли в пространстве стенда.

### Моделирование движения пылевоздушной смеси

Для проверки и апробации предложенной нами математической модели

было решено использовать результаты экспериментов, полученные авторами работ [1–3].

Этапы математического моделирования:

#### 1. Построение геометрической модели расчетной области

Согласно экспериментальным исследованиям пылевой динамики [1, 3, 4] был использован стенд, чья геометрическая модель взята для дальнейшего расчета. Размеры геометрической модели составили: сечение 1×1 м; длина 30 м.

## 2. Построение сетки по геометрической модели

На основе модели была построена сетка с размерами ячеек 100×100 мм, кубической формы.

## 3. Выбор математических моделей решения турбулентности, взаимодействия частиц между собой и стенками, непрерывной фазы

В работах [5–10] рекомендуется применять модели турбулентности  $k$ - $\varepsilon$  и SST модель, которая сочетает в себе две наиболее часто применяемые модели ( $k$ - $\varepsilon$  и  $k$ - $\omega$ ). В настоящей работе для решения задачи принимаем SST модель, которая описывается следующим образом [6, 10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + C_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \end{cases}$$

где  $G_k$  – турбулентная кинетическая энергия, Дж;  $\Gamma_k$  и  $\Gamma_\omega$  – эффективный коэффициент диффузии для  $k$  и  $\omega$ ;  $D_\omega$  – диффузия;  $Y_k$  и  $Y_\omega$  – рассеивание из-за турбулентности  $k$  и  $\omega$ ;  $u$  – скорость жидкости, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $S_k$  и  $S_\omega$  – дополнительные параметры, назначаемые исследователем,  $\omega$  – удельная скорость рассеивания, с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon$  – скорость турбулентного рассеивания, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $k$  – кинетическая энергия на единицу массы.

Предполагается, что объемная доля дискретной фазы достаточно мала: она не принимается во внимание при составлении уравнений непрерывной фазы. Общая форма уравнений сохранения массы и импульса в ANSYS Fluent приведена в (2) и (3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_{DPM} + S_{other}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \rho + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} + \overline{F_{DPM}} + \overline{F_{other}}, \quad (3)$$

где  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $S_{DPM}$  – полная энтропия дискретно-фазовой модели, Дж/К;  $\overline{F_{DPM}}$  – вектор силы дискретно-фазовой модели, Н;  $\overline{F_{other}}$  – вектор других сил, Н.

Объемная доля фазы твердых частиц учитывается путем расширения (4) и (5) на следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) = \sum_{q=1}^{nphases} (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p \vec{v}_p) = & -\alpha_p \nabla \rho + \nabla \cdot \left[ \alpha_p \mu_p (\nabla \vec{v}_p + \nabla \vec{v}_p^T) \right] + \alpha_p \rho_p \vec{g} + \\ & + F_{vm, lift, user} + \sum_{q=1}^{nphases} \left( \overline{K_{qp}} (\vec{v}_q - \vec{v}_p) + \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp} - \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} \right) + K_{DPM} (\overline{v_{DPM}} - \vec{v}_p) + S_{DPM, explicit} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\dot{m}_{qp}$  и  $\dot{m}_{pq}$  – массоперенос из фазы  $q$  в фазу  $p$  и из фазы  $p$  в фазу  $q$  соответственно, кг/с;  $\rho_p$  – плотность фазы  $p$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\vec{v}_p$  – скорость фазы  $p$ , м/с;  $\alpha_p$  – объемная доля фазы  $p$ ;  $\overline{K_{qp}}$  – турбулентное сопротивление для дисперсной фазы  $p$  и непрерывной фазы  $q$ ;  $F_{vm}$  – массовая сила, Н.

Передача импульса от непрерывной фазы к дискретной фазе, определяется путем изучения изменения импульса частицы, когда она проходит через каждый контрольный объем в модели. Это изменение импульса вычисляется по следующей формуле:

$$F = \sum \left( \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{\text{other}} \right) \dot{m}_p \Delta t, \quad (6)$$

где  $d_p$  – диаметр частицы, м;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\dot{m}_p$  – массовый расход частиц, кг/с;  $\mu$  – вязкость жидкости, Па·с;  $u_p$  – скорость частицы, м/с;  $u$  – скорость жидкости, м/с;  $C_D$  – коэффициент трения;  $\Delta t$  – временной шаг, с;  $F_{\text{other}}$  – другие силы взаимодействия, Н.

ANSYS Fluent позволяет использовать метод дискретных элементов [6, 11–14]. Метод дискретных элементов подходит для моделирования сыпучих материалов (например, гравия, угля, гранул любого материала). Такие симуляции характеризуются большой объемной долей частиц, где важно взаимодействие между частицами. При этом взаимодействие с потоком газа может быть важным, а может и не иметь значения.

Данная модель позволяет моделировать движущиеся частицы как движущиеся массовые точки, где абстракции используются для формы и объема частиц. Однако детали обтекания частиц (например, образование вихрей, отрыв

потока, пограничные слои) не учитываются.

Используя второй закон Ньютона, и обыкновенные дифференциальные уравнения движение частиц представляются следующим уравнением:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \overline{F_{\text{drag}}} + \overline{F_{\text{pressure}}} + \overline{F_{\text{virtual\_mass}}} + \overline{F_{\text{gravitation}}} + \overline{F_{\text{other}}}, \quad (7)$$

$$\frac{dx}{dt} = \vec{v}. \quad (8)$$

Реализация данной модели где движущиеся частицы как движущиеся массовые точки основана на работах [11, 15–18] и учитывает силы, возникающие в результате столкновения частиц (так называемый подход «мягкой сферы»). Затем эти силы входят через член в уравнении (9). Силы от столкновений частиц определяются деформацией, которая измеряется как перекрытие между парами сфер (рис. 1). Уравнение (9) интегрируется во времени, чтобы уловить взаимодействие частиц, используя временную шкалу для интегрирования, которая определяется жесткостью материалов.

Для не вращающихся частиц была использована модель взаимодействия со стенками, которая учитывает потерю энергии из-за неупругого столкновения со стенкой. Частица отскакивает от рассматриваемой границы с изменением

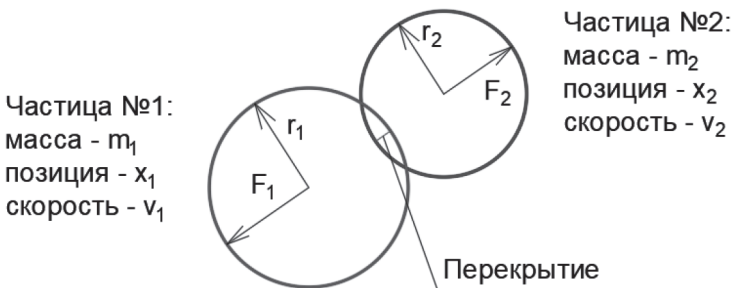


Рис. 1. Силы взаимодействия между частицами

Fig. 1. Interparticle interaction force

своего импульса, определяемого коэффициентом восстановления, из следующего выражения:

$$e_n = \frac{V_{2n}}{V_{1n}} \quad (9)$$

где  $V_{1n}$  и  $V_{2n}$  — скорость частицы по нормали к стенке до и после столкновения соответственно, м/с.

Точно так же тангенциальный коэффициент восстановления  $e_t$  определяет количество импульса в направлении, касательном к стенке, которое удерживает частица.

В этой модели время контакта частицы со стенкой делится на два периода; а именно сжатие и восстановление. Система уравнений определяется в зависимости от того, перестает ли частица скользить в течение периода сжатия.

Для данной работы были заданы параметры стенок «Отскок» с сохранением тангенциальной и нормальной энергии и импульса равный 0,8 для обоих параметров.

#### 4. Задание граничных условий

Для входного отверстия были приняты следующие значения: атмосферное

давление воздуха — 101 325 Па; скорость воздушной струи — 1,78 м/с.

Для выходного отверстия было принято выставить нулевое значение давления.

Турбулилизация потока была задана при помощи интенсивности турбулизации и принята 5%, гидравлический диаметр равен 1 м, он соответствует диаметру стэнда для квадратного сечения.

#### 5. Задание параметров дискретной фазы

Для выбранной нами исследуемой пыли параметры распределения имеют следующие значения:

- математическое ожидание диаметра частиц пыли  $M = 68,95$  мкм;
- мода  $M_d = 74,93$  мкм;
- диапазон частиц 0,1 — 227,8 мкм.

График исходного распределения granulометрического состава частиц экспериментальной пыли показан на рис. 2.

Для учета и задания распределения пыли по различным фракциям в ANSYS Fluent воспользуемся уравнением Розина-Раммлера:

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n}, \quad (10)$$

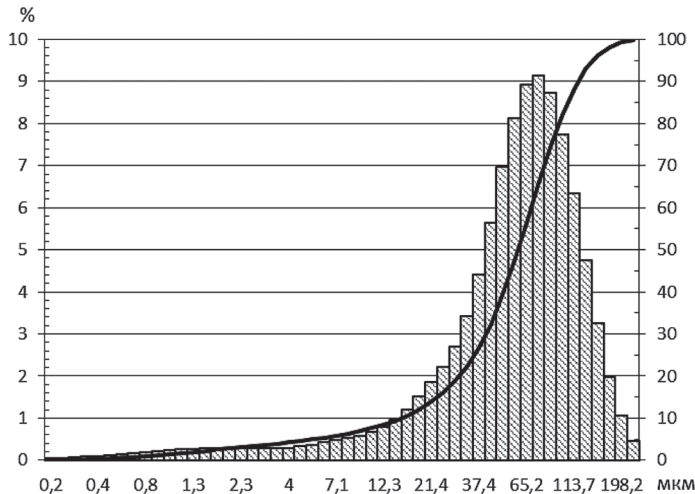


Рис. 2. Распределение granulометрического состава частиц каменноугольной пыли  
Fig. 2. Grain size composition of coal dust

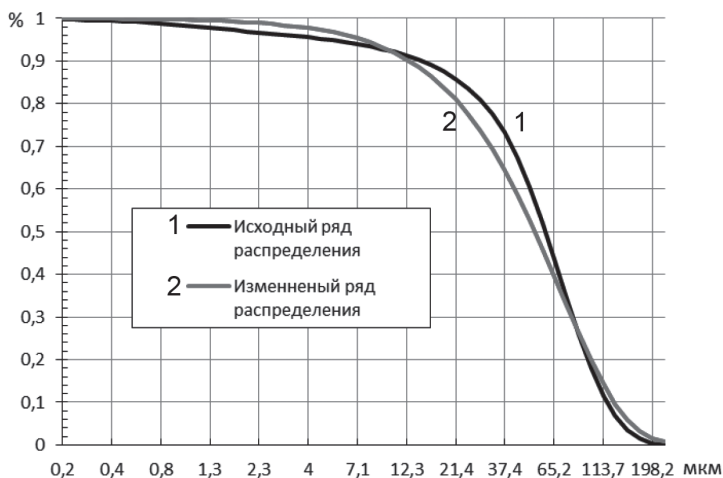


Рис. 3. Распределение granulометрического состава экспериментальной пыли, приведенное в соответствии с уравнением Розина-Раммлера

Fig. 3. Grain size composition of test coal dust in concordance with the Rosin–Rummler equation

где  $d$  – диаметр частицы, мкм;  $\bar{d}$  – среднее значение диаметра частицы, мкм.

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d / \bar{d})}. \quad (11)$$

После преобразования исходного распределения в соответствии с уравнениями (10), (11) оно будет использовано в последующем расчете (рис. 3).

Исходя из преобразования распределения granulометрического состава экспериментальной пыли для входного

отверстия задания пыли были использованы следующие значения:

- концентрация подаваемой пыли – 554 мг/м<sup>3</sup>;
- минимальный диаметр частиц угольной пыли – 0,1 мкм;
- максимальный диаметр частиц угольной пыли – 227,8 мкм;
- математическое ожидание диаметра частиц пыли – 68,95 мкм;
- параметр распространения – 1,334687;

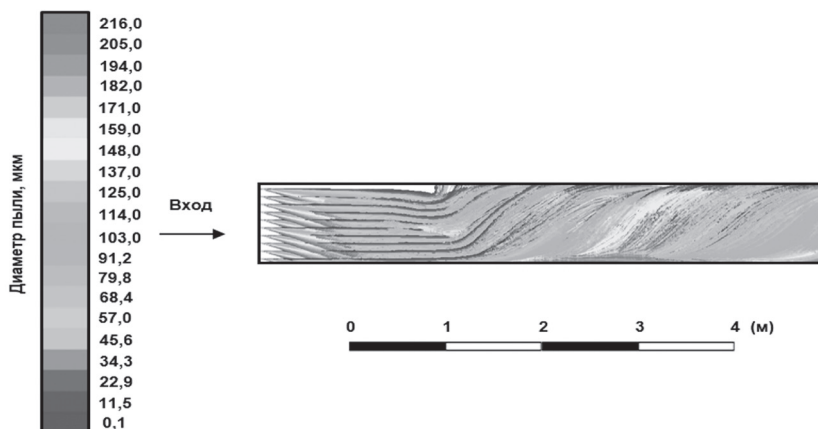


Рис. 4. Визуализация расчета движения угольной пыли в программной среде ANSYS Fluent

Fig. 4. Visualization of coal dust flow in ANSYS Fluent

- форма частиц — сферические;
- плотность частиц —  $800 \text{ кг/м}^3$ .

#### 6. Запуск решения и визуализация расчета

#### Обсуждение полученных результатов моделирования

На рис. 4 видно, что распределение на входе граничной области модели дисперсии пыли осуществляется равномерно, однако сразу после происходит ее рассеивание следующим образом: более мелкие фракции оказываются в верхней части стэнда, а более крупные — в нижней. Стоит также отметить, что происходят завихрения частиц, связанные с их соударением друг с другом и стенками модели, что нами ранее было учтено в математической модели.

После завершения расчета был построен график зависимости средней концентрации каменноугольной пыли

от расстояния от источника пылеобразования (рис. 5).

На графике линией «Фактическая концентрация пыли» показано распределение концентрации пыли, построенное по данным, взятым из источников [1, 4], а линией «Расчетная концентрация пыли» показано распределение концентрации пыли, построенное по данным, рассчитанным в программном продукте ANSYS Fluent. Сопоставив данные графики, можно сделать вывод, что полученные результаты в данной работе хорошо сходятся с результатами, полученными экспериментально в работах [1, 18–20].

Несмотря на хорошую сходимость, в данной работе необходимо провести дополнительные испытания, сопоставив их с результатами, полученными на другом лабораторном стэнде, в котором будет учтено следующее:

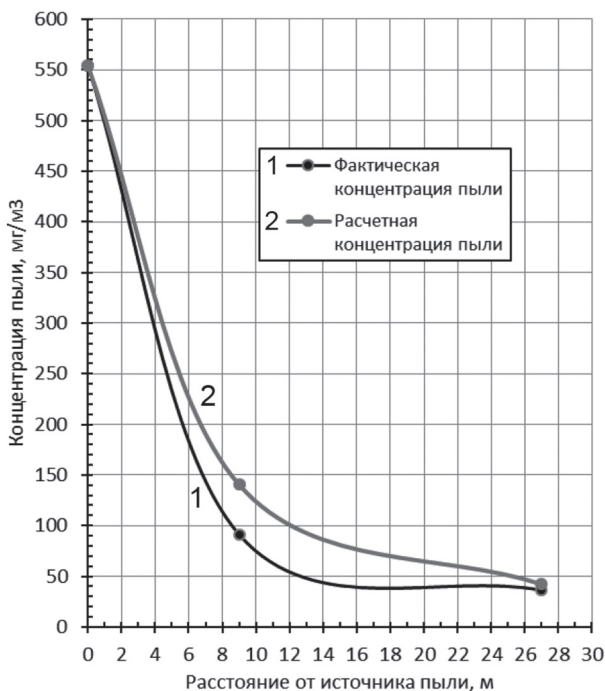


Рис. 5. График зависимости средней концентрации угольной пыли от расстояния от источника пылеобразования

Fig. 5. Average coal dust concentration versus distance to dusting source



- необходимо создать более равномерный воздушный поток на входе стенда, так как задание потока, приближенного к ламинарному течению на входе с более равномерными скоростями воздуха по всей поверхности сечения, обеспечит более прогнозируемые результаты, а следовательно, и большую сходимость в дальнейшем;

- производить замер фракционного состава по всему сечению стенда, так как метод отбора проб, реализуемый в работе [1], дает весьма субъективные данные о фракционном составе витающей пыли, так как происходит захват пылевых частиц за счет всасывания, и при этом возможен захват частиц большего диаметра.

### **Заключение**

В результате проведения натурных экспериментов и работ на основе полученных экспериментальных данных по подбору наиболее адекватной модели, позволяющей исследовать аэродинамические свойства каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных и наклонных выработках, при помощи программного продукта ANSYS Fluent была получена математическая модель, удовлетворяющая поставленной цели исследова-

вания. В основу разработанной авторами модели были заложены следующие установки:

1. Для задания многофазного течения была использована усовершенствованная лагранжевая многофазная модель.

2. Процессы моделирования турбулентности осуществлялись с использованием SST модели.

3. Впрыск дискретной фазы выполнялся с учетом данных уравнения Розина-Раммлера. Это предоставило авторам возможность задавать дискретную фазу с разным набором фракций и необходимым нам массовым распределением частиц.

В результате сопоставления данных, полученных на аэродинамической установке, и процесса разработки модели, учитывающей полученные результаты, авторы установили, что эти результаты не противоречат имеющимся данным, изложенным в других работах [1–4, 21, 22], а также достоверно позволяют изучить процесс распространения каменноугольной пыли по протяженным горизонтальным и наклонным выработкам. Авторы работы считают, что работу в данном направлении необходимо продолжить.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Романченко С. Б., Руденко Ю. Ф., Костеренко В. Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. — М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. — 256 с.

2. Родионов В. А., Турсенев С. А., Скрипник И. Л., Ксенофонтов Ю. Г. Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 617–622. DOI:10.31897/PMI.2020.6.3.

3. Шаравин Е. О., Цыганков В. Д., Бельшина Ю. Н. Применение ANSYS Fluent для расчета параметров распространения ударной волны в узлах сопряжений горных выработок // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2018. — № 4 (48). — С. 40–48.

4. Родионов В. А., Цыганков В. Д., Жихарев С. Я. Морфологическим состав шахтной угольной пыли и его влияние на взрывопожароопасность горных выработок // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2020. — № 1. — С. 145–158.

5. Шаблий Л. С., Кривцов А. В., Колмакова Д. А. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent: учебное пособие. — Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. — 108 с.

6. ANSYS Fluent User's Guide (2018) ANSYS, Inc, URL: [http://ansys.fem.ir/ansys\\_fluent\\_tutorial.pdf](http://ansys.fem.ir/ansys_fluent_tutorial.pdf) (Дата обращения 03.03.2021).



7. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
8. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. 1979, vol. 29, pp. 47–65.
9. Tabakoff W., Wakeman T. Measured particle rebound characteristics useful for erosion prediction // *ASME paper 82-GT-170*. 1982.
10. Zhou Z., Hu P., Qi C., Niu T., Li M., Tian L. The influence of ventilation arrangement on the mechanism of dust distribution in woxi pithead // *Shock and Vibration*. 2018, vol. 2018, article 8928120. DOI: 10.1155/2018/8928120.
11. Liu X., Chang P., Wang E., Zhang Z., Yang S. Numerical study of the respirable coal dust removal performance of a vortex ventilation system at an excavation face // *Energies*. 2018, vol. 11, no. 9, article 2449. DOI: 10.3390/en11092449.
12. Бруяка В. А., Фокин В. Г., Солдусова Е. А., Глазунова Н. А., Адеянов И. Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 271 с.
13. Кобылкин А. С. Распределение пыли различного дисперсного состава в горных выработках, в зависимости от расположения источника пылевыведения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — № 6. — С. 291–302.
14. Коркодинов Я. А. Обзор семейства  $k$ - $\epsilon$  моделей для моделирования турбулентности // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. — 2013. — № 2 (15). — С. 5–16.
15. Grzegorz B., Bolesław D. Numerical calculation of the flow through a three-way coal dust separator // *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2078, article 020066. DOI: 10.1063/1.5092069.
16. Zheng Y., Organiscak J. A., Zhou L., Beck T. W., Rider J. P. CFD analysis on gas distribution for different scrubber redirection configurations in sump cut // *Transactions*. 2015, vol. 338, no. 1, pp. 423–432.
17. Wang J., Tang Y., Du H., Shang W. Development of a respirable dust mitigation system for a high longwall face at sihe colliery in China — a case study // *Journal of Engineering & Technological Sciences*. 2017, vol. 49, no. 4, pp. 438–456.
18. Левин Л. Ю., Исаевич А. И., Семин М. А., Газизуллин Р. Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // *Горный журнал*. — 2015. — № 1. — С. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13
19. Файнбург Г. З., Семин М. А., Исаевич А. Г. Взаимосвязь физических механизмов, математических моделей и технических способов проветривания тупиковых горных выработок // *Горное эхо*. — 2020. — № 3. — С. 131–137.
20. Dmitrievich M. R., Alekseevich R. V., Borisovich S. V. Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1154–1161.
21. Кобылкин С. С., Хубиева В. М. Учет локальной естественной тяги при обеспечении аэрологической безопасности на горных предприятиях // *Безопасность труда в промышленности*. — 2021. — № 1. — С. 60–65. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-60-65.
22. Кобылкин С. С., Кобылкин А. С. Трехмерное моделирование при проведении инженерных расчетов по тактике горноспасательных работ // *Горный журнал*. — 2018. — № 5. — С. 82–85. DOI:10.17580/gzh.2018.05.13. **ПЛАБ**

## REFERENCES

1. Romanchenko S. B., Rudenko Yu. F., Kosterenko V. N. *Pylevaya dinamika v ugol'nykh shakhtakh* [Dust dynamics in coal mines], Moscow, Izd-vo «Gornoe delo» OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2011, 256 p.

2. Rodionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Yu. G. Investigation data on kinetics of spontaneous ignition of coal dust. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 617 – 622. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2020.6.3.

3. Sharavin E.O., Tsygankov V. D., Bel'shina Yu. N. Application of ANSYS Fluent to calculating shock wave parameters at junctions of roadways in mines. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2018, no. 4 (48), pp. 40 – 48. [In Russ].

4. Rodionov V. A., Tsygankov V. D., Zhikharev S. Ya. Morphological composition of coal dust and impact on fire/explosion safety in roadways. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2020, no. 1, pp. 145 – 158. [In Russ].

5. Shabliy L. S., Krivtsov A. V., Kolmakova D. A. *Komp'yuternoe modelirovanie tipovykh gidravlicheskiy i gazodinamicheskikh protsessov dvigateley i energeticheskikh ustanovok v ANSYS Fluent: uchebnoe posobie* [Computer modeling of representative hydrodynamics and gas-dynamics processes in motors and power plants in ANSYS Fluent: Educational aid], Samara, 2017, 108 p.

6. *ANSYS Fluent User's Guide* (2018) ANSYS, Inc, available at: [http://ansys.fem.ir/ansys\\_fluent\\_tutorial.pdf](http://ansys.fem.ir/ansys_fluent_tutorial.pdf) (accessed 03.03.2021).

7. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.

8. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geo-technique*. 1979, vol. 29, pp. 47–65.

9. Tabakoff W., Wakeman T. Measured particle rebound characteristics useful for erosion prediction. *ASME paper 82-GT-170*. 1982.

10. Zhou Z., Hu P., Qi C., Niu T., Li M., Tian L. The influence of ventilation arrangement on the mechanism of dust distribution in woxi pithead. *Shock and Vibration*. 2018, vol. 2018, article 8928120. DOI: 10.1155/2018/8928120.

11. Liu X., Chang, P., Wang E., Zhang Z., Yang S. Numerical study of the respirable coal dust removal performance of a vortex ventilation system at an excavation face. *Energies*. 2018, vol. 11, no. 9, article 2449. DOI: 10.3390/en11092449.

12. Bruyaka V. A., Fokin V. G., Soldusova E. A., Glazunova N. A., Adeyanov I. E. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench: uchebnoe posobie* [Engineering analysis in ANSYS Workbench: Educational aid], Samara, Gos. tekhn. un-t, 2010, 271 p.

13. Kobylkin A. S. Distribution of different-dispersion dust in mine workings depending on dust release source location. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 6, pp. 291–302. [In Russ].

14. Korkodinov Ya. A. Overview of the  $k$ - $\epsilon$  model family for turbulence modeling. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2013, no. 2 (15), pp. 5 – 16. [In Russ].

15. Grzegorz B., Bolesław D. Numerical calculation of the flow through a three-way coal dust separator. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2078, article 020066. DOI: 10.1063/1.5092069.

16. Zheng Y., Organiscak J. A., Zhou L., Beck T. W., Rider J. P. CFD analysis on gas distribution for different scrubber redirection configurations in sump cut. *Transactions*. 2015, vol. 338, no. 1, pp. 423 – 432.

17. Wang J., Tang Y., Du H., Shang W. Development of a respirable dust mitigation system for a high longwall face at sihe colliery in China – a case study. *Journal of Engineering & Technological Sciences*. 2017, vol. 49, no. 4, pp. 438 – 456.

18. Levin L. Yu., Isaevich A. I., Semin M. A., Gazizullin R. R. Air-dust mixture dynamics analysis in blind roadway ventilation during operation of shearing machinery. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 1, pp. 72 – 75. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13

19. Faynburg G. Z., Semin M. A., Isaevich A. G. Interaction of physical mechanisms, mathematical models and technical processes in ventilation of blind roadways. *Gornoe ekho*. 2020, no. 3, pp. 131 – 137. [In Russ].

20. Dmitrievich M. R., Alekseevich R. V., Borisovich S. V. Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1154–1161.

21. Kobylkin S. S., Khubieva V. M. Inclusion of local natural drag in mine air safety concept. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 1, pp. 60 – 65. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-60-65.

22. Kobylkin S. S., Kobylkin A. S. 3D modeling in engineering design in mine rescue tactics. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 5, pp. 82 – 85. DOI:10.17580/gzh.2018.05.13. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Родионов Владимир Алексеевич* — канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: 79213258397@mail.ru, Scopus ID: 57202923447,  
<https://orcid.org/0000-0003-2398-5829>,

Санкт-Петербургский горный университет,  
*Цыганков Валерий Дмитриевич* — заместитель командира  
ВГСП ФГКУ «УВГСЧ в строительстве» ВГСЧ МЧС РФ,

e-mail: 19valery96@mail.ru,  
*Жихарев Сергей Яковлевич*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник, e-mail: perevoloki55@mail.ru,  
Scopus ID: 57202921925,

*Кормщииков Денис Сергеевич*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
научный сотрудник, e-mail: dkormshchikov@gmail.com,

<sup>1</sup> Горный институт Уральского отделения РАН.

**Для контактов:** Родионов В.А., e-mail: 79213258397@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.A. Rodionov*, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
e-mail: 79213258397@mail.ru, Scopus ID: 57202923447,  
<https://orcid.org/0000-0003-2398-5829>,

Saint-Petersburg Mining University,  
199106, Saint-Petersburg, Russia,  
*V.D. Tsygankov*, Deputy commander  
of the Paramilitary Mine Rescue Point,  
Federal State Public Institution «The Directorate  
of the Paramilitary Mine Rescue Divisions in construction»  
of the Paramilitary Mine Rescue Divisions  
of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence,  
Emergencies and Elimination of Consequences

of Natural Disasters, Saint-Petersburg, Russia,  
*S.Ya. Zhikharev*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher,  
e-mail: perevoloki55@mail.ru,

*D.S. Kormshchikov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,  
e-mail: dkormshchikov@gmail.com,

<sup>1</sup> Mining Institute of Ural Branch,  
Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

**Corresponding author:** V.A. Rodionov, e-mail: 79213258397@mail.ru.

Получена редакцией 03.03.2021; получена после рецензии 23.04.2021; принята к печати 10.09.2021.

Received by the editors 03.03.2021; received after the review 23.04.2021; accepted for printing 10.09.2021.