

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ ШАХТ И РУДНИКОВ

Б.П. Казаков¹, Е.В. Колесов¹, Е.В. Накаряков¹, А.Г. Исаевич¹

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: kolesovev@gmail.com

Аннотация: Приведен обзор современного состояния в области моделирования и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников. Особое внимание уделяется последним достижениям вычислительной гидродинамики (CFD). Описаны принципы вычислительной гидрогазодинамики, а также основные процедуры CFD-моделирования для получения качественных моделей: достижение сеточной сходимости, достижение независимости решения от выбора шага по времени, а также верификация CFD-моделей. Представлены наиболее часто применяющиеся в задачах рудничной вентиляции модели турбулентности и области их применимости. Приведен обзор исследований и разработок с применением CFD-моделирования в шахтной и рудничной вентиляции. Основными направлениями исследований с использованием CFD в рудничной вентиляции являются: вентиляционные потоки в тупиковых горных выработках и способы их вентиляции, динамика газов в выработанном пространстве и зонах обрушения, шахтные пожары, самонагревание угля и эндогенные пожары, динамика и контроль метана и пыли. Актуальность исследований обусловлена тем, что объем физических экспериментов может быть значительно сокращен с использованием CFD-методов, поскольку вычислительные затраты на CFD-моделирование снижаются в результате увеличения мощностей компьютеров и детализации компьютерных моделей исследуемых физических систем, а стоимость натуральных и лабораторных экспериментов, наоборот, увеличивается.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, модели турбулентности, аварийный режим вентиляции, вычислительная гидрогазодинамика, газодинамика, CFD моделирование, самонагревание, эндогенные пожары, пожары в шахтах, контроль пыли, контроль метана.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-15-50125.

Для цитирования: Казаков Б. П., Колесов Е. В., Накаряков Е. В., Исаевич А. Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 5–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_5.

Models and methods of aerogasdynamic calculations for ventilation networks in underground mines: Review

B.P. Kazakov¹, E.V. Kolesov¹, E.V. Nakariakov¹, A.G. Isaevich¹

¹ Mining Institute, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: kolesovev@gmail.com

Abstract: The article offers a review of the modern methods available for modeling and calculating aerogasdynamic processes in ventilation networks in underground mines. A special attention is paid to the latest advances in computational fluid dynamics (CFD). The foundations of CFD and the main procedures of high quality CFD modeling are described: the mesh convergence; the independence of the solution from a time step chosen; the verification of CFD models. The models of turbulence, which are most often used in the problems on mine ventilation, and their application ranges are presented. The R&D projects connected with CFD modeling of mine ventilation are reviewed. The main CFD-based research subjects in mine ventilation are: ventilation flows and ventilation methods in blind roadways; gas dynamics in mined-out voids and caving zones; mine fires; coal self-heating and endogenous fires; methane and dust dynamics and control. The relevance of the presented research rests upon the fact that CFD methods can greatly reduce the amount of physical experimentation as computation cost of CFD modeling currently gets lower thanks to higher-capacity computers and enhanced refinement of computer-aided models of physical systems under testing, while the full-scale and lab tests become more expensive, vice versa.

Key words: mine ventilation, turbulence models, emergency ventilation mode, computational fluid dynamics, gas dynamics, CFD modeling, self-heating, endogenous fires, mine fires, dust control, methane control.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 19-15-50125.

For citation: Kazakov B. P., Kolesov E. V., Nakariakov E. V., Isaevich A. G. Models and methods of aerogasdynamic calculations for ventilation networks in underground mines: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(6):5-33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_5.

Введение

Принципы вычислительной динамики жидкости и газа широко применяются в рудничной вентиляции при исследовании таких процессов, как движение воздушных потоков, пыли, горючих и ядовитых газов, распространение ударных волн, развитие пожаров, а также при расчетах эффективности и устойчивости вентиляции. Понимание механизмов движения жидкости и газа имеет важное значение для решения задач рудничной вентиляции, связанных с безопасностью и здоровьем горнорабочих. В связи со значительным прогрессом в области вычислительных технологий в последние годы все большее применение получают методы вычислительной гидродинамики, или CFD-методы (computational fluid dynamics), в области рудничной вен-

тиляции. Существует множество программных CFD-пакетов: Ansys Fluent, Ansys CFX, Comsol Multiphysics, Flow Vision, OpenFOAM, Star-CCM+, XFlow и другие. Методы CFD необходимы, когда всесторонний анализ с использованием физических экспериментов невозможен, поскольку требует дорогостоящего оборудования, большого количества времени и доступа в малопроеходимые, а зачастую запрещенные к посещению места шахт и рудников. Объем физических экспериментов может быть значительно сокращен при использовании CFD-методов, поскольку CFD-моделирование с развитием технологий затрачивает все меньше вычислительных ресурсов, в то время как стоимость физических экспериментов увеличивается. За последние два десятилетия опубли-

ковано множество статей и научных работ, связанных с применением CFD-методов, однако среди них мало публикаций, включающих детализированный обзор современного состояния исследований и разработок в области рудничной вентиляции. Цель настоящей работы — провести анализ и представить обзор современных исследований и разработок с применением CFD-методов в шахтной и рудничной вентиляции.

Моделирование турбулентных течений

Вычислительная гидрогазодинамика является одним из направлений механики сплошных сред, включающим совокупность математических, физических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоков жидкостей и газов. В сущности, CFD занимается численным решением дифференциальных уравнений, описывающих физику потоков жидкостей и газов, их взаимодействие с твердыми телами [1]. В CFD используются численные методы и алгоритмы для решения и анализа задач, связанных с вычислением характеристик потоков газов и жидкостей, тепломассопереносом, многофазными средами, химическими реакциями и т.д. При этом CFD-моделирование позволяет пользователю прогнозировать, что произойдет с потоком жидкостей и газов при том или ином наборе обстоятельств (начальных и граничных условий, геометрии расчетной области, физических параметров жидкости и газа).

CFD базируется на основных уравнениях гидрогазодинамики, которые выражают фундаментальные физические принципы динамики жидкости и газа: законы сохранения массы, импульса и энергии.

Движение воздушных и газовых потоков в горных выработках имеет сложный характер, и в большинстве случаев

оно протекает в режиме развитой турбулентности. При таком движении поля скорости, давления, температуры и других физических величин имеют сложную вихревую нерегулярную структуру.

Классификация существующих подходов к численному моделированию турбулентных течений основана на степени детальности разрешения турбулентных пульсаций и их энергетического спектра. С учетом этого признака можно выделить четыре основных подхода: прямое численное моделирование (direct numerical simulation, или DNS), метод крупных вихрей (large eddy simulation, или LES), метод отсоединенных вихрей (detached eddy simulation, или DES) и метод, основанный на осреднении по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds averaged Navier–Stokes, или RANS) [2].

Для метода DNS требуется численное разрешение всех пространственных и временных масштабов, от самых крупных до самых малых. Это приводит к тому, что прямое численное моделирование течений, имеющих практическое значение в инженерной деятельности, еще достаточно долго будет недоступно, во-первых, в связи с ограниченными возможностями современных вычислительных устройств, во-вторых, из-за избыточности информации, которую дает DNS, для инженерной практики.

Суть метода LES заключается в том, что большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а влияние мелких вихрей моделируется. Уравнения сохранения для моделирования крупных вихрей получаются с помощью фильтрации мгновенных уравнений сохранения [2–5]. Это вычислительно дорогой метод, который не обязательно приводит к улучшению результатов прогнозирования для полностью развитого турбулентного потока по сравнению с RANS моделями [6]. Поскольку метод LES на-

ходится на гораздо более ранней стадии разработки, чем модели RANS, в областях, связанных с рудничной вентиляцией, найдено не очень много работ. CFD-пакет «Симулятор динамики огня» (FDS – Fire Dynamics Simulator) использует метод LES и применяется для изучения пожаров в шахтах. Некоторые исследования шахтных пожаров с применением FDS рассматриваются в разделе 5.4.

Метод DES является комбинацией LES и RANS моделей. Идея метода DES состоит в использовании RANS-моделей только в тех областях потока, где локальный размер используемой вычислительной сетки d недостаточно мал для разрешения турбулентных структур с линейными масштабами порядка характерного локального масштаба турбулентности l_{turb} , т.е. где $d > l_{\text{turb}}$, и в использовании метода LES в остальной области потока, где $d < l_{\text{turb}}$. В существующей литературе по рудничной вентиляции не удалось найти работ, в которых применялся бы метод DES [2].

Метод RANS основан на решении уравнений Рейнольдса, полученных в результате осреднения уравнений Навье-Стокса. Уравнения Рейнольдса представляют собой уравнения переноса для средних значений параметров потока, подверженных случайным пульсациям. При выводе уравнений Рейнольдса используется разложение мгновенного значения скорости на сумму среднего значения и пульсационной составляющей. Период осреднения должен быть достаточно велик по сравнению с периодом пульсаций, чтобы среднее значение случайной пульсации было равно нулю, но и не столь большим, чтобы не сглаживались глобальные изменения средних величин во времени.

Таким образом, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса для случая несжимаемых потоков имеют вид:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) =$$

$$= -\nabla p + \mu \Delta \vec{V} - \nabla \cdot R + \vec{F}$$

где ρ – плотность, кг/м³; p – давление, Па; μ – динамическая вязкость, Па·с; \vec{V} – вектор усредненной по Рейнольдсу скорости, м/с; R – тензор турбулентных напряжений Рейнольдса, Па; \vec{F} – плотность осредненной сторонней объемной силы; t – время, с; ∇ – дифференциальный оператор Гамильтона; Δ – оператор Лапласа.

Осредненная по Рейнольдсу система уравнений является незамкнутой: необходимо дополнительно 6 уравнений для компонент симметричного тензора R . Для решения проблемы замыкания требуется физически обоснованная математическая модель, позволяющая рассчитать турбулентные напряжения. Поставленная цель достигается с помощью той или иной эмпирической модели турбулентности [2].

Многие используемые в существующих CFD-пакетах модели турбулентности основываются на гипотезе Буссинеска, суть которой заключается в предположении наличия линейной связи между тензором турбулентных напряжений R и тензором скоростей деформации осредненного течения S_{ij} :

$$R = -2\mu_t S_{ij}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{dV_j}{dx_i} + \frac{dV_i}{dx_j} \right)$$

В рамках этой гипотезы проблема замыкания сводится к определению только одной скалярной величины (турбулентной вязкости μ_t) вместо 6 компонент тензора R .

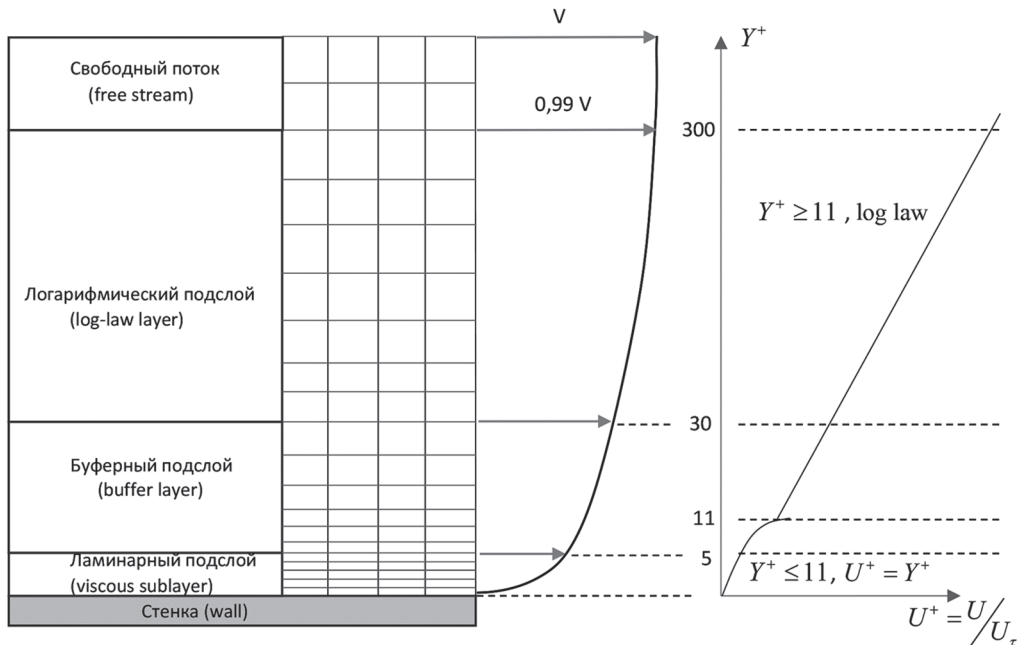
Модели турбулентности, основанные на гипотезе Буссинеска, можно разделить на следующие группы по количеству дополнительно вводимых уравнений переноса характеристик турбулентности для вычисления турбулентной вязкости:

- алгебраические модели (нульпараметрические);
- модели с одним дифференциальным уравнением переноса характеристик турбулентности, как правило, турбулентной кинетической энергии (однопараметрические модели), например модель Спаларта-Аллмараса;
- модели с двумя дифференциальными уравнениями переноса (двухпараметрические модели), например семейства моделей $k-\varepsilon$ и $k-\omega$;
- модели с большим числом уравнений.

Помимо моделей, использующих гипотезу Буссинеска, существуют модели переноса напряжений Рейнольдса (Reynolds stress equation model, или RSM), которые базируются на использовании модельных соотношений непосредственно для компонент тензора реинольдсовых напряжений R . В зависимости от типа этих соотношений соответствующие модели называются алгебраически-

ми или дифференциальными моделями переноса реинольдсовых напряжений.

Следует отметить, что для правильного расчета турбулентных течений важно детально моделировать турбулентный пограничный слой (область у поверхности обтекаемого твердого тела). У турбулентного пограничного слоя выделяют 3 подслоя (рисунок). Непосредственно на твердой поверхности скорость газа или жидкости равна нулю, а в тонком ламинарном, или вязком, подслое у стенки скорость линейно зависит от расстояния от стенки. Далее следует область, называемая буферным подслоем, в которой начинается переход к турбулентности. Заканчивается этот подслой областью развитой турбулентности, или логарифмическим подслоем, где средняя скорость течения определяется логарифмической зависимостью от расстояния от стенки. Еще дальше от стенки находится область свободного течения. Для расчета поля



Структура турбулентного пограничного слоя
Turbulent boundary layer structure

скорости во всех четырех областях турбулентного пограничного слоя можно использовать уравнения Рейнольдса.

Модели турбулентности, которые требуют детального моделирования пограничного слоя вплоть до вязкого подслоя, называются низкорейнольдсовыми. При использовании низкорейнольдсовых моделей турбулентности необходима такая достаточно густая расчетная сетка вблизи стенки, чтобы центр ближайшего к твердой поверхности элемента лежал в вязком подслое, что, в свою очередь, повышает требования к вычислительным ресурсам. Использование низкорейнольдсовых моделей необходимо в том случае, если требуется получение более точного решения в областях вблизи твердых поверхностей при исследовании нестационарных процессов теплообмена и массообмена, а также отрывных течений.

Однако, поскольку толщина вязкого и буферного слоев весьма мала (их суммарная толщина на два порядка меньше толщины логарифмического подслоя), и при этом их форма чаще всего универсальна и неизменна, то с помощью использования так называемых пристеночных функций можно отказаться от решения уравнений Рейнольдса в этих областях и аналитически рассчитать поле скорости вблизи стенки. Модели, использующие пристеночные функции, называются высокорейнольдсовыми [7], и их применение может существенно снизить требования к вычислительным ресурсам, необходимым для решения уравнений Рейнольдса.

RANS-модели турбулентности, применяемые в рудничной вентиляции

Ниже представлены наиболее часто применяющиеся в задачах рудничной вентиляции модели турбулентности, основанные на решении осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса.

Модель Спаларта-Аллмараса (SA)

Модель, разработанная Спалартом и Аллмарасом [8], представляет собой однопараметрическую низкорейнольдсовую модель. Она была разработана специально для аэрокосмических приложений, включая течения, ограниченные твердыми стенками. В этой модели решается уравнение переноса для модифицированной турбулентной кинематической вязкости $\tilde{\nu}$, и далее вычисляется турбулентная динамическая вязкость по формуле:

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1}$$

где f_{v1} — демпфирующая функция.

Модель SA является экономичной с точки зрения вычислительных мощностей и позволяет достаточно точно рассчитывать простые течения без больших зон отрыва [2].

Стандартная модель k-ε

Стандартная модель k-ε, или standard k-ε, представляет собой двухпараметрическую модель, в которой турбулентная динамическая вязкость вычисляется путем решения двух дополнительных уравнений переноса: кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации турбулентности ε [9]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

где C_μ — константа модели.

Данная модель позволяет рассчитать многие турбулентные течения с приемлемой для задач рудничной вентиляции точностью и дает достаточно хорошую сходимость результатов [10]. К недостаткам стандартной k-ε модели можно отнести низкую точность при моделировании течений с отрывом от поверхностей, а также необходимость использования специальных приемов при расчете пристеночных течений.

Стандартная модель k-ε может обеспечить приемлемую корреляцию между измеренными и промоделированными

результатами, однако при определенных обстоятельствах она может давать неточные результаты, особенно при моделировании потоков с вращением, сильным завихрением и потоков с сильной кривизной линии тока [2]. Отчасти это связано с тем, что гипотеза Буссинеска о турбулентной вязкости в этих обстоятельствах не верна, а также с тем, что уравнение для ε имеет много эмпирических констант, которые не являются универсальными для всех типов течений.

Модель RNG $k-\varepsilon$

Модель RNG $k-\varepsilon$ является улучшением стандартной модели $k-\varepsilon$ и основывается на статистических методах, используемых в области теории ренормализованных групп (Renormalization Group) [11, 12]. Структура уравнений переноса для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε остается прежней, но для вычисления турбулентной вязкости вводится аналитическая зависимость, что позволяет повысить точность расчета характеристик турбулентных течений при малых числах Рейнольдса. Опыт применения модели RNG $k-\varepsilon$ показал улучшенное (по сравнению со стандартной версией $k-\varepsilon$ модели) согласование расчетных и экспериментальных данных для некоторых типов течений, в частности при относительно малых числах Рейнольдса, большой кривизне линий тока и в областях больших деформаций поля скорости [2, 3].

Реализуемая модель $k-\varepsilon$

«Реализуемая» означает, что модель удовлетворяет определенным ограничениям на напряжения Рейнольдса, присутствующим реальным турбулентным течениям, чего нет в двух других $k-\varepsilon$ моделях. Реализуемая модель $k-\varepsilon$ имеет то же уравнение переноса для кинетической энергии турбулентности, что и стан-

дартная модель, но для расчета турбулентной вязкости использует переменную C_μ , вместо константы. Кроме того, используется новое уравнение переноса для скорости диссипации турбулентной энергии [13]. Отличия этого уравнения от стандартного заключаются в том, что член генерации диссипации пропорционален интенсивности скоростей сдвига осредненного течения, а также что уравнение не имеет особенности при $k \rightarrow 0$.

Эта модель создана и откалибрована (т.е. подобраны ее константы) для течений в турбулентных струях. Расчеты показали, что она предпочтительнее при моделировании отрывных и сложных вторичных течений, а также течений в пограничных слоях с обратным градиентом давления [11, 13].

Модель $k-\omega$

Указанные для standard $k-\varepsilon$ модели недостатки не наблюдаются при использовании модели турбулентности $k-\omega$ [14]. В модели $k-\omega$ турбулентная динамическая вязкость вычисляется путем решения двух дополнительных уравнений переноса: кинетической энергии турбулентности k и частоты турбулентных пульсаций ω :

$$\mu_t = a^* \rho \frac{k}{\omega},$$

где a^* — демпфирующая функция, корректирующая значение турбулентной вязкости при низких числах Рейнольдса. Для больших чисел Рейнольдса $a^* = 1$.

Данная модель дает лучшее решение в пристеночном слое, а также она хорошо зарекомендовала себя при моделировании течений по сильно искривленным каналам, отрывных и струйных течений. Эта модель относится к низкорейнольдсовым, но она также может быть использована совместно с пристеночными функциями в случае слишком грубой расчетной сетки вблизи стенок. Она отличается высокой степенью не-

линейности, и поэтому хуже сходится, чем стандартная модель $k-\varepsilon$. Еще одним недостатком $k-\omega$ модели, в отличие от модели standard $k-\varepsilon$, является довольно сильная зависимость результатов расчета от значений ω , задаваемых на входе в расчетную область.

Модель SST $k-\omega$

Модель переноса сдвиговых напряжений SST $k-\omega$ (Shear Stress Transport) сочетает в себе достоинства моделей $k-\omega$ и $k-\varepsilon$. Она представляет собой суперпозицию моделей $k-\omega$ и $k-\varepsilon$, умноженных соответственно на весовые функции $F1$ и $(1 - F1)$. Функция $F1$ задается так, чтобы быть равной единице на верхней границе пограничного слоя и стремиться к нулю при приближении к стенке. Таким образом, в модели SST $k-\omega$ для расчета течения в свободном потоке используются уравнения $k-\varepsilon$ модели, а в области вблизи стенок — уравнения $k-\omega$ модели. [3]. Поэтому модель SST $k-\omega$ также может использоваться в качестве низкорейнольдсовой. Модель SST $k-\omega$ хорошо зарекомендовала себя в расчетах отрывных течений с небольшой зоной отрыва [10, 15, 16].

Модели RSM

Предполагаемая гипотезой Буссинеска пропорциональность тензоров рейнольдсовых напряжений и скоростей деформаций осредненного течения имеет место не во всех течениях. Для учета эффектов, связанных с анизотропией рейнольдсовых напряжений, разработаны модели переноса напряжений Рейнольдса, или RSM-модели. В этих моделях для решения проблемы замыкания решаются 7 дополнительных уравнений переноса для рейнольдсовых напряжений, в связи с чем требуются существенные вычислительные мощности. С помощью RSM-моделей можно более точно учесть эффекты закрученности потока,

вращения, резкого изменения напряжений между слоями, чем с использованием одно- и двухпараметрических моделей турбулентности. Однако RSM-модели имеют некоторые упрощения, которые были приняты для составления уравнений переноса рейнольдсовых напряжений, в связи с чем требуется использование специальных средств для обеспечения устойчивости и сходимости. Использование этих моделей турбулентности рекомендуется в случаях, когда анизотропия турбулентного потока оказывает доминирующее влияние на характер турбулентного течения [2].

Разработка CFD-модели

Для получения высококачественных результатов CFD-моделирования помимо выбора наиболее подходящей модели турбулентности необходимо тщательное выполнение следующих важных этапов: достижение сеточной сходимости, достижение независимости решения от выбора шага по времени, а также калибровка CFD-модели.

Исследование сеточной сходимости и шага по времени

При решении гидродинамических задач численными методами исследователи часто сталкиваются с неудовлетворительной точностью получаемых результатов. Одними из наиболее распространенных причин этому является недостаточное разрешение расчетной сетки и слишком большой временной шаг. Поиск расчетной сетки с наименьшим количеством элементов, при которой дальнейшее ее дробление не повлияет на получаемое решение, называется исследованием сеточной сходимости.

Прежде всего необходимо определить, какие характеристики исследуемого течения являются ключевыми и отражают корректность получаемого решения. При этом рассматривать необходимо

сразу все характеристики, поскольку сеточная сходимость для каждой из них может быть достигнута при разном разрешении расчетной сетки. Характеристики потока, обычно используемые для проверки независимости решения от сетки, — это профиль скорости вдоль линии тока, контур и векторное поле скорости в критических местах, распределение температуры, а также концентрация загрязняющих веществ.

Для исследования сеточной сходимости проводят серию предварительных расчетов на сетках с различной плотностью элементов, как правило, с удвоением общего количества элементов, пока не найдется такая сетка, при которой дальнейшее ее измельчение не повлияет на получаемое решение. Более мелкая сетка может обеспечить более точное решение, но это несущественное для инженерных задач увеличение точности приведет к существенному увеличению времени вычислений [2, 3].

Добыча полезных ископаемых — это динамический процесс, во время которого постоянно изменяется вентиляционная сеть шахты в связи с появлением новых выработок и связей между ними. Для решения проблем с перемещением механических компонентов и изменением формы выработки может быть использован метод динамической сетки [17]. При использовании этого метода вычислительная сетка не статична, а перестраивается при изменении расчетной области для симуляции динамического процесса. Метод динамической сетки в настоящее время имеет ограниченное применение в связи с существенными вычислительными и временными затратами.

В работе [18] предложен модульный подход к созданию конечно-элементной сетки, позволяющий легко адаптировать CFD-модель к различным изменениям геометрии расчетной области. В этой

статье представлена методология построения сетки и ее масштабирования, а также рекомендации по использованию CFD-моделирования при моделировании вентиляции длинных очистных забоев. Процесс проектирования модели начинается с создания отдельных модулей, представляющих отдельные элементы добычного участка: длинный очистной забой, воздухоподающие и воздуховыдающий штреки, выработанное пространство. В каждом модуле строится сетка с различной плотностью, и каждый вновь созданный модуль добавляется в библиотеку для будущего использования. Этот процесс позволяет разработчикам быстро вносить изменения в геометрию без перестроения сетки целиком, при этом модульный подход существенно сокращает время моделирования по сравнению со стандартным способом построения единообразной сетки во всей расчетной области.

Одним из основных критериев, определяющих качество расчетной сетки, специфичный для аэрогидродинамических задач и отвечающий за достаточность измельчения сетки вблизи стенки породного массива, где присутствуют высокие градиенты скорости и температуры, является безразмерное расстояние от стенки до первого элемента, или Y^* (см. рисунок) [7]. Данный параметр имеет ограничения в зависимости от выбранной модели турбулентности. Высокорейнольдсовы модели турбулентности k - ε имеют наименее жесткие условия, накладываемые на данный параметр: $30 \leq Y^* \leq 300$. Из этого условия вытекает требование к расчетной сетке иметь как минимум 10 слоев призматических элементов в турбулентном пограничном слое. При этом если используется масштабируемая пристеночная функция, то условие упрощается: $Y^* \leq 300$.

В случае использования низкорейнольдсовых моделей, например, k - ω или

SST $k-\omega$, условие имеет вид: $Y^+ < 2$. При этом требуется наличие минимум 15 слоев призматических элементов в пограничном слое.

При выборе шага по времени для нестационарных задач в случае использования явной разностной схемы необходимо помнить про критерий Куранта-Фридрихса-Леви (Ku), суть которого заключается в том, что частица жидкости за один шаг по времени не должна продвинуться больше, чем на один пространственный шаг. Дело в том, что вычислительный алгоритм не может корректно рассчитывать распространение физического возмущения, которое в реальности движется быстрее, чем вычислительная схема позволяет отслеживать. Например, при размере ячейки 0,1 м и скорости струи 10 м/с шаг по времени должен быть не более 0,01 с при $Ku = 1$. В случае использования неявной разностной схемы необходимо также тщательно выбирать шаг по времени, но уже из условия независимости получаемого решения от этого шага по аналогии с исследованием сходимости решения по сетке [7].

Проверка CFD-модели

Проверка CFD-модели заключается в сопоставлении модельных данных с экспериментальными данными, полученными в ходе лабораторных или шахтных испытаний. В случае проведения лабораторных экспериментов результаты действительны, только когда между физической моделью и ее реальным прототипом достигается геометрическое и динамическое подобие. Геометрическое подобие требует, чтобы физическая модель имела одинаковое линейное масштабное уменьшение в трех измерениях, а динамическое подобие требует, чтобы модель и прототип имели одинаковые безразмерные параметры подобия. В приближении несжимаемой жидкости

без свободных поверхностей необходимо, чтобы число Рейнольдса (Re) было одинаковым; а если существует свободная поверхность, то числа Рейнольдса, Фруда (Fr) и Вебера (We) должны быть одинаковыми. В случае сжимаемой жидкости требуется также, чтобы число Маха было одинаковым. Например, в работе [19] для проверки CFD-модели проветривания камерообразной выработки была разработана лабораторная модель в масштабе 1:10. Для описания турбулентности сравнивались стандартная $k-\varepsilon$ модель и RSM, показавшая наилучшее соответствие эксперименту.

Другим методом, обычно используемым для проверки CFD-моделей, является использование данных, полученных в ходе натурных исследований. Например, авторы работы [20] использовали ручной анемометр и детектор метана для получения данных о скорости распространения и концентрации метана, которые затем использовались для проверки CFD-модели. Исследователи в [21] провели детальные замеры воздушного потока в тупиковой выработке угольной шахты. Замеры проводились с использованием проволочного термоанемометра для проверки численной модели. Результаты CFD-моделирования показали хорошее согласие с экспериментальными данными. Затем утвержденная модель использовалась для моделирования различных комбинаций методов приточной и всасывающей вентиляции.

В исследованиях систем вентиляции зданий практикуется использование трассирующих газов [22]. Методы трассировки газа в шахтных условиях были использованы во многих ситуациях, когда обычные способы исследования воздушных потоков неэффективны или неприменимы [23], например, при слишком малых скоростях воздуха, при исследовании движения воздуха и газов через выработанное пространство и т.д. Иссле-

довательский проект [24–26] включал отбор новых трассирующих газов для вентиляции шахт, разработку методологии использования трассирующих газов и CFD-моделирование для анализа, прогнозирования и подтверждения состояния рудничной вентиляции, а также локализации нарушения вентиляции и, наконец, проверку разработанной методологии в лаборатории и в шахтных условиях. Результаты моделирования могут предоставить информацию для определения некоторых ключевых экспериментальных параметров, таких как скорость, длительность и места выброса трассирующего газа, ожидаемое распределение его концентрации. После оптимизации этих параметров в модели CFD процесс проб и ошибок можно сократить, а желаемые результаты можно получить существенно быстрее. Также было доказано, что использование CFD-моделей и методов трассировки газа может быть успешно использовано для анализа систем подземной вентиляции во время аварийных ситуаций. Применение трассирующих газов в шахтах включает анализ режимов вентиляции, определение мест утечек воздуха и их количественное измерение, расчет методов контроля пыли [27] и оценку системы вентиляции после аварий [25, 26]. Также трассирующие газы иногда используются для проверки CFD-моделей. В [28] в качестве трассирующего газа для определения эффективности бесканального вентилятора, задействованного для вспомогательной вентиляции, был использован CO_2 , и затем результаты измерений сравнивались с результатами CFD-моделирования. Авторы [29] использовали SF_6 в качестве трассирующего газа для проверки модели CFD при изучении структуры воздушного потока в длинном очистном забое.

Визуальное сравнение результатов экспериментов и CFD расчета также

является эффективным средством проверки CFD [30]. Существует три основных метода визуализации: добавление инородной жидкости (газа) в основной поток, оптические методы и добавление тепла и энергии в поток. Для визуализации воздушного потока и проверки CFD-модели в исследовании [31] использовался дым. В исследовании [32] использовался метод анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry – PIV) для визуализации моделей воздушного потока в лабораторной модели шахты и для проверки CFD-модели. PIV – это оптический метод визуализации двумерных векторных полей скорости потоков газа путем цифровой обработки изображений введенных в поток сильно отражающих трассировочных частиц.

Экспериментальные результаты из имеющихся литературных источников также могут быть использованы для проверки CFD-модели.

Обзор CFD-исследований

CFD-моделирование используется в качестве инструмента исследований и проектирования в рудничной вентиляции для повышения эффективности вентиляции с точки зрения безопасности и здоровья горнорабочих, а также энергосбережения [33, 34]. Применение CFD-моделирования в рудничной вентиляции наиболее эффективно не при анализе крупномасштабных вентиляционных сетей, состоящих из сотен и тысяч выработок, а при исследовании особенностей поведения воздушных потоков в локальных областях [10, 35–38]. Для расчета вентиляционных сетей шахт целиком CFD-моделирование в настоящее время неприменимо из-за того, что такой расчет требует колоссальных вычислительных и временных затрат.

Далее представлены результаты исследований, связанных с рудничной вен-

тиляцией, в которых было использовано CFD-моделирование. Разделение по категориям достаточно условно, поскольку многие явления в различных категориях часто взаимосвязаны.

Исследования структуры вентиляционных потоков

CFD-моделирование широко применяется для изучения структуры вентиляционных потоков с целью улучшения качества вентиляции и ее контроля. В [39] была проведена серия лабораторных исследований, направленных на проверку CFD-моделей путем сравнения результатов CFD-моделирования с результатами экспериментальных замеров. Авторы использовали различные модели турбулентности для описания динамики воздушного потока и распределения метана. Были представлены результаты моделирования с использованием модели SST $k-\omega$ и модели SA в сравнении с результатами лабораторного эксперимента. Обе модели удовлетворительно спрогнозировали концентрации метана и распределение воздушного потока в лабораторной установке. В работе [10] разработана расчетная модель, описывающая процесс проветривания рабочей зоны тупиковой камерообразной выработки. Проведенная верификация расчетной модели показала, что результаты расчетов дают хорошее совпадение с натурным экспериментом при использовании моделей турбулентности SST $k-\omega$ и standard $k-\epsilon$.

В [40] был проведен лабораторный эксперимент и CFD-моделирование для изучения влияния местных сопротивлений при раздвоении и объединении потоков на T-образном сопряжении. Результаты показали, что CFD-модели хорошо подтверждаются экспериментальными данными при расчете коэффициентов местного сопротивления. Полученные в результате CFD-моделирования коэффи-

циенты местного сопротивления сравнивались с предыдущими исследованиями в литературе, и авторы установили, что существующие методы определения коэффициентов местного сопротивления недооценивают их более чем на 50% при объединении двух потоков и на 20% при поворотах потока.

Исследованию изменения величины местных сопротивлений при реверсировании воздушного потока на основе CFD-моделирования посвящена работа [41]. В ней рассчитаны коэффициенты аэродинамических сопротивлений типовых элементов вентиляционных сетей шахт и рудников.

В статье [42] была получена оценка возможности реализации в шахтных условиях подпора воздуха для уменьшения распространения ядовитых газов из выработанного пространства. Метод, первоначально разработанный для обеспечения безопасного пути эвакуации при пожарах в зданиях, был применен в тупиковой выработке большого сечения (8 м × 7 м) известняковой шахты. Примерно в середине выработки, длина которой 180 м, устанавливались 2 вентилятора (мощность одного 37 кВт, другого — 15 кВт) без перемычки, создающие избыточное давление, не позволяющее вредным газам поступать из выработанного пространства. В случае работы обоих вентиляторов на нагнетание перепад давления между входящей и исходящей струями составил от 22 до 33 Па, что фиксировалось 40 датчиками, установленными вдоль выработки. В CFD-модели перепад составил 29 Па. При использовании вентилятора мощностью 37 кВт в режиме нагнетания, а вентилятора мощностью 15 кВт в режиме всасывания наблюдался перепад давления 15–18 Па, что сопоставимо с результатами CFD-моделирования 16 Па. В работе использовалась стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности, а ядовитые газы зада-

вались в качестве источника с постоянной скоростью выделения CO.

В работе [43] исследовалась глубина проветривания тупиковой выработки за счет турбулентной диффузии. На основе CFD-моделирования с использованием реализуемой $k-\varepsilon$ модели турбулентности было показано, что для выработки длиной 20 м, шириной 6,6 м и высотой 3 м максимальная глубина проветривания 12 м достигалась при скорости воздуха в сквозной выработке 1,35 м/с. Результаты исследования согласуются с данными эксперимента, проведенного ранее другими исследователями [44].

Авторы [21] применили модель турбулентности SA при изучении эффективности проветривания тупиковой горной выработки нагнетательным, всасывающим и смешанным способами. В модели достигнуто согласование поля скорости воздуха по сравнению с шахтным экспериментом. В CFD-исследованиях [45–48] моделировалась нагнетательная схема проветривания тупиковой выработки. Например, в [45] исследовалась вентиляция при различных расстояниях между забоем и концом вентиляционного трубопровода (2, 5 и 8 м), а также при различных скоростях воздуха на выходе из трубопровода (от 5 до 15 м/с). Использовалась стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности, а верификация модели достигалась сравнением с экспериментальными данными, представленными в работе [21].

Для оценки качества и эффективности систем рудничной вентиляции обычно исследуются такие параметры, как скорость воздуха и концентрация загрязняющих веществ. Однако существует еще один параметр — локальный средний возраст воздуха, — который обычно используется для оценки качества вентиляции в помещениях жилых и общественных зданий и характеризует среднюю продолжительность времени, в течение

которого воздух находился в конкретной зоне здания. В работе [21] использовалась верифицированная CFD-модель для оценки эффективности вентиляции тупиковой выработки шахты с использованием трех способов: всасывающего, нагнетательного и комбинированного. Применялась модель турбулентности SA. В [49] использовалось понятие локального среднего возраста воздуха для изучения эффективности комбинированного способа вентиляции тупиковой выработки. CFD-моделирование использовалось в качестве инструмента для выбора эффективного расположения всасывающего трубопровода. После изучения процента застойных зон и среднего возраста воздуха для четырех разных положений трубопроводов был сделан вывод, что после определения положения конца нагнетательного воздухопровода существует оптимальное положение для всасывающего воздухопровода для достижения максимальной эффективности проветривания. В работе [50] также использовался данный параметр для изучения эффективности проветривания тупиковой проходческой выработки с помощью нагнетательного трубопровода. Применялась реализуемая $k-\varepsilon$ модель турбулентности, а для автоматического расчета локального среднего возраста воздуха в программном пакете Ansys Fluent была разработана специальная функция.

В исследовании [51] предлагается и оценивается стратегия импульсной вентиляции с целью экономии энергопотребления при одновременном поддержании уровня метана ниже допустимого значения в проходческой выработке угольной шахты. Воздух в выработке представлен в виде смеси кислорода, азота, метана и водяных паров. Для описания турбулентности была выбрана модель standard $k-\varepsilon$ со стандартной пристеночной функцией. Важным выводом является то, что путем проведения мно-

гопараметрического CFD-исследования можно определить такие факторы, как значения скорости на выходе из вентиляционного става и период изменения скорости, чтобы получить сбалансированный результат между энергосбережением и эффективностью удаления метана.

В исследовании [52] CFD-моделирование использовалось для изучения различных способов местного проветривания для удаления выхлопных газов от машин с дизельным двигателем в тупиковой проходческой выработке шахты. Применялась стандартная модель $k-\varepsilon$, а скорость выброса газа была задана в качестве предварительно рассчитанного граничного условия. Работа [53] посвящена CFD-исследованию эффективности вентиляции тупиковой выработки при работе в ней погрузочно-доставочной машины с точки зрения выноса вредных примесей и охлаждения выработки. В работе применялась модель турбулентности *standard k-ε*, на стенках выработки задавалось граничное условие 3-го рода с коэффициентом теплоотдачи $4,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и постоянной температурой стенок, соответствующей температуре непо потревоженного массива на данной глубине. Погрузочно-доставочная машина в модели является источником тепловыделения с постоянной мощностью 27 кВт .

В [54] исследовалось 6 способов проветривания тупиковой проходческой выработки при работе в ней комбайна. В различных комбинациях исследовалось влияние нагнетательного трубопровода, всасывающего трубопровода и продольной перегородки на проветривание выработки. При этом в работе сравнивались 4 модели турбулентности: SA, $k-\omega$, *standard k-ε* и RSM. В итоге была выбрана стандартная модель $k-\varepsilon$, потому что она дала результаты, дающие наилучшее совпадение с экспериментом. Результа-

ты показали, что использование продольной перегородки может обеспечить контроль над пылью. В работах [55–57] было проведено многопараметрическое CFD-моделирование проветривания тупиковой выработки с помощью продольной перегородки без использования вентиляторов местного проветривания. В работах использовалась реализуемая модель $k-\varepsilon$. В [58] исследовалась эффективность проветривания тупиковой выработки при одновременном использовании продольной перегородки и всасывающего вентилятора с трубопроводом, сбрасывающего воздух на исходящую струю через перемычку. Расчет производился в стационарной постановке в приближении несжимаемого газа, а для моделирования турбулентности использовалась модель *standard k-ε* со стандартной пристеночной функцией. Однако следует отметить, что на практике использование продольных перегородок сложно реализуемо по ряду причин и в первую очередь в связи с тем, что их наличие в выработке мешает движению технологического транспорта.

Моделирование работы вентиляторов

CFD также используется для моделирования работы вентиляторов [28, 59–63]. Существует несколько способов задать граничное условие типа «вентилятор». Наиболее сложным способом моделирования вращения является использование так называемого подхода «множественной системы отсчета» (*multiple reference frame*, или MRF), который преобразует компоненты скорости в определенной области вокруг вращающихся элементов во вращающуюся систему отсчета. В этом случае вентилятор с движущимися элементами на этапе задания геометрии модели строится явно. Такой подход использовался в работе [60], в которой исследовалось взаимовлияние

двух главных вентиляторных установок, работающих в параллели. На основании CFD-моделирования с использованием реализуемой модели $k-\varepsilon$ была разработана конструкция вентиляционного канала, а также получены рабочие точки, гарантирующие стабильную работу обоих вентиляторов: как существующего, так и планируемого к установке.

Другой способ моделирования работы вентилятора представлен в работе [61], в которой проведено CFD-исследование возможности проветривания тупиковых камер большого сечения (132 м^2) длиной 50 м с использованием установленных в транспортном штреке эжекторных установок, работающих без переключки. Для моделирования турбулентности была выбрана модель $standard\ k-\varepsilon$, а для моделирования работы вентилятора использовался следующий подход. Вентилятор задавался цилиндром, а интерфейсное граничное условие представляет собой зависимость перепада давления между двумя поверхностями цилиндра и расхода воздуха через них, т.е. задается напорная характеристика.

Стоит отметить, что для моделирования работы вентиляторов в CFD-пакетах Fluent и SolidWorks можно использовать встроенную возможность задания граничного условия типа fan (вентилятор) либо задавать массовую силу внутри вентилятора для разгона потока. При этом в обоих случаях строгая геометрия вентиляторов с лопатками не требуется.

В [62] использовались двумерные CFD-модели для моделирования шести различных сечений аэродинамического профиля и изучалось влияние изменения угла наклона лопаток на аэродинамику шахтного вентилятора. Для моделирования турбулентности использовалась модель $RNG\ k-\varepsilon$ без пристеночной функции, а расчетная сетка была подобрана таким образом, что параметр Y^+ не превышал 0,2. На основании результа-

тов моделей CFD была выбрана наиболее эффективная конструкция лопаток. Трехмерная CFD-модель использовалась в исследовании [63], посвященном улучшению рабочих параметров вентилятора местного проветривания путем модификации лопаток рабочего колеса, а также исследованию их характеристик при различных углах атаки. Для моделирования набегающего потока использовалась модель турбулентности $standard\ k-\varepsilon$.

Динамика газа в выработанном пространстве и длинном очистном забое

Для улучшения вентиляции длинных очистных забоев необходимо понимать механику потока газа внутри обрушенного выработанного пространства. Однако измерение воздушных и газовых потоков внутри выработанного пространства крайне затруднительно, поскольку большая часть этой области недоступна. Таким образом, CFD-моделирование является порой единственно возможным способом исследования вентиляции в обрушенном выработанном пространстве [64]. Ключевым элементом модели движения газа в выработанном пространстве — это распределение пористости и проницаемости. В работе [65] для расчета изменений проницаемости разработана CFD-модель и промоделированы утечки воздуха в выработанное пространство, а также распределение метана. Изменения проницаемости были определены с использованием программы численного моделирования FLAC3D. Результаты моделирования соответствуют экспериментальным данным, представленным в литературе. Аналогичное исследование было проведено в работе [66]. Течение газа в выработанном пространстве моделировалось как ламинарный поток через пористую среду, а в выработках использовалась модель турбулентности $standard\ k-\varepsilon$. Данные по проницаемости

выработанного пространства были получены на основе результатов геотехнического моделирования. В исследовании также обсуждалось предполагаемое расположение зон критической скорости, при которой возможно самовозгорание угля. В работе [67] использовалась CFD-модель для исследования проблем с высоким уровнем метана в исходящей струе из выработанного пространства. В выработанном пространстве моделировалось ламинарное движение газа в пористой среде, а турбулентное движение газо-воздушной смеси в горных выработках воссоздавалось с помощью стандартной модели $k-\varepsilon$.

В угольных шахтах со схемой разработки длинными очистными забоями колебания атмосферного давления могут нарушать баланс давления между выработанным пространством и проветриваемой рабочей зоной, что приводит к явлению, известному как «дыхание выработанного пространства» («*gob breathing*»). Оно проявляется в том, что через выработанное пространство начинают проникать потоки газа в рабочие зоны, и это может привести к дефициту кислорода или концентрации метана выше допустимых значений в воздухе рабочей зоны. В работе [68] было проведено CFD-моделирование для анализа этого явления и его влияния на развитие взрывоопасной смеси в вентиляционной сети шахты. Распределение пористости выработанного пространства рассчитывалось в программе FLAC3D, а проницаемость выявлена с использованием уравнения Козени-Кармана. Результаты моделирования указывают на то, что в местах, где метановые зоны связываются с воздухом шахты, могут образовываться полосы взрывоопасных зон вдоль поверхности забоя и в вентиляционном штреке.

В работе [69] исследовалось накопление CO_2 в сопряжении лавы и вентиля-

ционного штрека. Для этого была разработана и верифицирована CFD-модель. Был предложен и оценен вариант газового дренажа с использованием скважины в сопряжении лавы и вентиляционного штрека. Выработанное пространство моделировалось пористой средой с проницаемостью, заданной во Fluent с помощью специальной функции на основе геомеханических моделей.

Метан при подземной добыче угля и калия является одной из основных проблем безопасности ведения горных работ. Метан взрывоопасен при определенной концентрации и требует постоянного мониторинга и контроля для поддержания безопасных условий труда. CFD-моделирование можно использовать для лучшего понимания динамики потоков метана и разработки методов вентиляции для снижения рисков, связанных с метаном. В статье [70] представлено параметрическое CFD-исследование для определения влияния количества подаваемого воздуха на концентрацию метана в вентиляционном штреке и образование зон взрывоопасных газов в выработанном пространстве. Для моделирования турбулентности использовалась модель RNG $k-\varepsilon$ со стандартной пристеночной функцией. Для исследования динамики метана, азота и кислорода использовалась модель переноса компонентов (*species transport model*), а выработанное пространство задавалось в качестве пористой среды с пористостью и проницаемостью, вычисленными в программном пакете FLAC3D. В [71] разработана CFD-модель, прогнозирующая динамику концентрации метана в лавах угольных шахт, откалиброванная на основе дискретных измерений концентрации метана и расходов воздуха в воздухоподающей и вентиляционной выработках. В работах [72, 73] приведены CFD-исследования расслоения и динамики метана в вентиляционном штреке уголь-

ной шахты с использованием различных моделей турбулентности, при этом модель *standard k-ε* показала наилучшее совпадение с результатами экспериментов.

В исследовании [20] был проведен CFD-анализ динамики метана в рабочей зоне угольной шахты. Традиционный метод рассчитывает среднюю концентрацию метана без учета различного содержания метана в разных зонах. Исследование же направлено на анализ эволюции вентиляционного потока в различных сечениях и направлениях выработки. Была разработана CFD-модель и проведены шахтные эксперименты для изучения застойных зон, рециркуляции воздушного потока и распределения метана. В исследовании сравнивались четыре различные модели турбулентности: SA, *k-ω*, *k-ε* и SST *k-ω*. В итоге была выбрана модель *k-ε*, поскольку она наилучшим образом согласуется с полевыми измерениями.

В [74] было проведено CFD-исследование с целью изучения влияния установки для удаления пыли и газов при проветривании длинного очистного забоя на вентиляционный поток и распределение метана во время процесса добычи угля. В работе использовалась модель турбулентности SST *k-ω*.

Шахтные пожары

Ряд исследований связан с изучением пожаров в шахтах и рудниках с применением CFD-моделирования. В работе [75] проведены полевые испытания и CFD-исследование для изучения температурных характеристик пожара в шахтах. Были проведены два огневых испытания: одно на основе угольного материала, а другое — из смеси угля и дерева. Численная модель была построена с использованием CFD-пакета «Симулятор динамики огня» (Fire Dynamics Simulator, или FDS), которая использует метод LES для описания турбулентных течений.

Моделируемые максимальные температуры поверхности были очень близки к результатам измерений, однако модель переоценила среднюю скорость распространения пламени, что также может быть связано с использованием модели сплошной среды, тогда как в эксперименте среда являлась дискретной и состояла из упакованных кусков угля.

В исследовании [76] были представлены результаты натурального эксперимента и вычислительная модель в FDS для определения критической скорости воздушного потока, необходимой для предотвращения опрокидывания воздушной струи при пожарах. Эксперименты проводились с различной интенсивностью пожара, и было установлено, что критическая скорость для предотвращения опрокидывания воздушной струи пропорциональна мощности пожара в степени 0,3, что согласуется с теорией, опубликованной другими исследователями [77].

В работе [78] с использованием FDS моделировался пожар в шахтном гараже и работа противопожарной вентиляции на основе работы эжекторных установок. В исследовании [79] в FDS были промоделированы пожары в шахте, вызванные различными источниками огня. Было установлено, что скорость распространения пламени является линейной функцией от скорости воздушного потока.

В работе [80] на основе разработанной в FDS CFD-модели исследовалось распределение температуры и скорости газа в выработках при возникновении пожара в шахте. Были обнаружены несоответствия полученных данных с результатами эксперимента вследствие некоторых принятых модельных упрощений. Был сделан вывод о необходимости уточнения экспериментальных данных для калибровки и улучшения качества модели.

В [81] была проведена серия CFD-исследований для изучения распространения огня и дыма. Была построена модель распространения продуктов горения от экспериментальных пожаров, проведенных в лаборатории с целью анализа условий возникновения обратного потока дыма. В работе применялась модель турбулентности *standard k-ε*, а выделение продуктов горения задавалось в качестве граничного условия. При использовании C_3H_8 в качестве топлива результаты расчета концентрации CO согласуются с измеренными данными с небольшим опережением, которое является результатом наличия времени отклика датчика и переходного процесса увеличения мощности пожара в экспериментах. Для пожаров в случае наличия воздушного потока на входе были проанализированы условия изменения направления потока дыма. Предсказанные CFD-моделью значения критических скоростей были ниже, чем рассчитанные по модели Фруда, которая успешно предсказала измеренную инверсию потока дыма. Аналогичное исследование было представлено в [82], в котором пожар в туннеле моделировался диффузным пламенем пропана. Рассчитанные профили скорости и температуры вдоль поперечного сечения туннеля были аналогичны имеющимся экспериментальным результатам. Исследование также подтвердило корреляцию длины ячейки инверсионного потока с числом Фруда.

Одной из причин пожаров в угольных шахтах может быть самовозгорание углей в обрушенном выработанном пространстве, где его трудно обнаружить, локализовать и погасить. Проводить масштабные эксперименты по изучению самопроизвольного нагрева и самовозгорания в шахтных условиях сложно и небезопасно, поэтому CFD-моделирование в данном случае является хорошей альтернативой.

В работах [83–86] была проведена серия крупномасштабных CFD-исследований по численному моделированию самовозгорания угля в выработанном пространстве типичного длинного очистного забоя. В качестве исходных данных для CFD-модели были использованы профили проницаемости и пористости выработанного пространства из геомеханической модели. Для оценки изменений проницаемости выработанного пространства было выбрано уравнение Козени-Кармана. Движение воздуха в выработанном пространстве принималось ламинарным, а в вентиляционных выработках — турбулентным с использованием модели турбулентности *standard k-ε*. Исследования показали характер потока внутри выработанного пространства и влияние других критических факторов на самовозгорание.

В [87] представлены результаты как шахтных испытаний, так и численного моделирования, целью которых было определение зоны с особенно высоким риском эндогенных пожаров в выработанном пространстве лав угольных шахт. Численная модель, разработанная на основе геометрии реального длинного очистного забоя, позволила определить распределение скорости воздуха и концентрации кислорода в выработанном пространстве. В работе использовалась стандартная модель *k-ε*.

Эндогенные пожары в угольных шахтах являются одной из причин взрывов, которые в свою очередь могут явиться причиной обрушения горных пород и экзогенных пожаров. В работе [88] на основе CFD-моделирования в нестационарной постановке задачи определены параметры распределения ударно-воздушных волн в объеме горных выработок и в выработанном пространстве, определена величина избыточного давления, а также учтены отражение и интерференция ударных волн в местах со-

пряжений горных выработок. В этой же работе описан способ инженерных расчетов для выбора оптимальной тактики аварийно-спасательных работ в угольных шахтах и рудниках.

Динамика пыли

Пыль, образующаяся во время добычи, является еще одной серьезной проблемой. Пыль может вызывать респираторные заболевания, повышать риск подземного взрыва и снижать производительность труда [89]. Движение потоков воздуха и рассеивание пыли в шахтных условиях очень сложны, и стандартного анализа шахтной вентиляционной сети недостаточно для прогнозирования динамики пыли. В этих условиях CFD-моделирование является хорошим и доступным инструментом для разработки и оценки методов контроля пыли.

В настоящее время для описания динамики потоков пыли в газовой среде используются различные подходы. В зависимости от физических параметров среды, режимов и геометрии потока, а также целей исследования пылевые аэрозоли моделируют как однофазными многокомпонентными средами, так и гетерогенными многофазными.

При моделировании пылевой аэрозоля в виде многокомпонентной среды предполагается, что ее составляющие, или компоненты, перемешаны и взаимодействуют на молекулярном или атомарном уровне. При этом скорости их относительного движения малы, и их нужно учитывать лишь в связи с определением концентраций компонент. В то же время можно пренебречь динамическими и инерционными эффектами, вызванными относительным движением компонент. Поэтому для математического описания такой среды уравнения баланса несущей фазы дополняют уравнением сохранения массы для каждого компонента. Применение этого подхода

ограничено в основном малыми размерами частиц пыли (менее 10 мкм), чтобы обеспечить значительно большее время оседания по сравнению с характерным временем исследуемого процесса. Такой подход к моделированию рудничной атмосферы применяется в основном для исследования распределения газовых примесей [39, 90–93] и при изучении динамики шлейфа частиц дизельного топлива, создаваемых техникой с двигателем внутреннего сгорания [94, 95].

При теоретическом описании потоков многофазных жидкостей в зависимости от концентрации и дисперсности частиц пыли используются в основном два подхода.

Первый подход основан на Лагранжевом (траекторном) описании дисперсной фазы, т.е. решению уравнений движения и энергии вдоль траекторий отдельных частиц пыли по заранее рассчитанным из уравнений баланса параметрам основного потока, рассматриваемого в качестве несущей непрерывной среды. По завершении расчета динамики частиц пыли происходит вычисление значений дополнительных (добавочных) источников членов, которые вносят поправки в уравнения движения газовой фазы, связанных с влиянием примеси на поток. Лагранжев подход в сочетании с методами DNS или LES позволяет получать детальную информацию о взаимодействии частиц с турбулентными вихрями, со стенками и друг с другом, однако требует очень больших затрат времени и вычислительных ресурсов. Данный подход применялся при исследовании способов вентиляции длинных очистных забоев [96–98]; тупиковых горных выработок при работе в них комбайнов [99–104], а также при изучении динамики твердых частиц выхлопных газов от работающей в тупиковых выработках техники с двигателем

внутреннего сгорания [105, 106]. При этом несущая газоздушная среда отдельно рассматривалась в качестве многокомпонентной жидкости с выделением в ней различных фракций, например, воздуха, воды, метана и т.д., и использованием для ее описания уравнений для многокомпонентных сред.

Второй подход (Эйлеров, континуальный) основан на введении понятия многоскоростной многотемпературной взаимопроникающей сплошной среды, т.е. среды, в каждой точке которой имеется столько скоростей и температур, сколько фаз в среде. Пылевой аэрозоль при этом рассматривается как совокупность двух взаимопроникающих континуумов — газа и частиц, имеющего собственные значения скорости, температуры, «плотности» (концентрации частиц), но не имеющего давления. Фазы рассматриваются отдельно, и для каждой решается набор уравнений сохранения. Связь между фазами достигается за счет совместного давления и коэффициентов межфазного обмена. В дополнение к обычным уравнениям сохранения для каждой фазы также решается уравнение переноса для объемной доли, при этом сумма объемных долей должна быть равна единице. Применение данного подхода к моделированию рудничной атмосферы приведено в работе [107].

В целом Лагранжев и Эйлеров подходы дополняют друг друга, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки и, следовательно, свои области применения. Лагранжев метод применим для существенно неравновесных течений (крупные инерционные частицы, разреженные дисперсные среды), а Эйлеров метод справедлив в условиях, близких к равновесным (мелкие малоинерционные частицы, концентрированные дисперсные среды).

В работе [108] представлен упрощенный эмпирический CFD-код симуляции

взрыва пыли DESC (Dust Explosion Simulation Code). Был использован эмпирический подход, поскольку такие механизмы подъема пыли, как сила Магнуса, сила Саффмана и столкновения частиц, не могут быть реально промоделированы. Предполагается, что частицы пыли находятся в динамическом и тепловом равновесии с флюидом. Такие явления, как оседание пыли или отрыв потока в изгибах, не могут быть промоделированы из-за того, что скорость проскальзывания не включена в код. В исследовании моделировалась динамика концентрации пыли для экспериментальной аэродинамической трубы, а также ряд экспериментов по взрыву пыли, описанных в литературе.

Авторы работы [20] использовали стандартную модель $k-\varepsilon$ в исследовании взрывов угольной пыли, и результаты моделирования подтвердились в ходе испытаний на испытательной установке. В работах [109, 110] проведена серия всесторонних исследований с использованием CFD для моделирования взрывов угольной пыли и эффективности активных взрывобезопасных барьеров. Модели были откалиброваны в соответствии с результатами эксперимента. Позднее они были уточнены с учетом модели столкновения частиц и модели распыления, что дало приемлемое согласие с экспериментальными данными.

Заключение

В работе представлен обзор исследований в области применения CFD-моделирования в рудничной вентиляции. Можно сделать вывод, что масштабы и уровень сложности исследований с использованием CFD-моделирования в рудничной вентиляции возрастают, в особенности в связи с достижениями в области вычислительной мощности компьютеров. Однако использование CFD-моделирования в рудничной вентиляции

эффективно не при анализе вентиляционных сетей шахт и рудников в целом, а при исследовании особенностей поведения воздушных и газовых потоков в локальных областях. В частности, CFD-моделирование применяется при рассмотрении движения воздушных потоков, пыли, горючих и ядовитых газов в тупиковых выработках, в выработанном пространстве шахт и рудников, при исследовании процессов самонагревания и самовозгорания угля, развития пожаров, в том числе эндогенных, а также при расчетах эффективности и устойчивости вентиляции. Следует также отметить, что очень мало работ посвящено CFD-моделированию динамики воздушных потоков в шахтных стволах глубоких шахт и рудников, что связано в первую очередь со сложностью получения экспериментальных данных в стволах для верификации моделей.

Приемлемость получаемых решений зависит от качества разработанной численной модели. При разработке CFD-моделей особое внимание следует уделять исследованию сеточной сходимости, т.е. поиску такой расчетной сетки, при которой дальнейшее измельчение не повлияет на получаемое решение, а также необходимо учитывать достаточность измельчения сетки вблизи твердых стенок для удовлетворения ограничений, накладываемых на безразмерный параметр Y^+ в зависимости от выбранной модели турбулентности (высокорейнольдсовой или низкорейнольдсовой).

Аналогично следует тщательно выбирать временной шаг. Было замечено, что во многих статьях, посвященных CFD-моделированию, авторы зачастую не заботятся о качестве расчетной сетки. При этом в тех работах, где приводится процедура сеточной сходимости, исследованию параметра Y^+ и выбору временного шага практически не уделяется внимание.

При выборе модели турбулентности следует понимать, что не существует явно превосходящей модели турбулентности, которая бы хорошо работала во всех исследуемых случаях. Необходимо учитывать также ограниченность вычислительных ресурсов при выборе той или иной модели турбулентности. Например, модель LES требует для расчета существенно больших вычислительных мощностей по сравнению с моделями RANS. Но и среди моделей RANS однопараметрические модели менее затратны, чем модели с двумя и более дифференциальными уравнениями переноса. При этом не всегда улучшенная высокоуровневая модель дает более качественную картину. Для обычных инженерных расчетов простых турбулентных течений рекомендуется начать со стандартной модели $k-\epsilon$ и стационарного расчета или с модели SST $k-\omega$, если требуется получение более точного решения в пристеночных областях при исследовании нестационарных процессов, а также процессов теплообмена и массообмена. Для струйных течений и течений с разделением или умеренным завихрением наиболее подходящими являются реализуемая модель $k-\epsilon$. Для течений с сильными завихрениями рекомендуется использовать RSM. Другие модели следует использовать только в том случае, если в литературе имеются доказательства того, что именно они наилучшим образом подходят для рассматриваемой проблемы.

Основываясь на проведенном анализе литературы, можно сделать следующие выводы. Для моделирования динамики воздуха в тупиковых горных выработках, например, при исследовании эффективности местного проветривания, в большинстве случаев можно применять стандартную или реализуемую модель $k-\epsilon$ со стандартной пристеночной функцией.

Для моделирования работы источников тяги существует несколько подходов в зависимости от степени детализации работы вентилятора. Наиболее полное описание — это детальное построение геометрии вентилятора и использование подхода множественной системы отсчета (multiple reference frame). Однако данный подход поддерживается не всеми CFD-пакетами. Можно привести другие подходы, не требующие детальной прорисовки вентилятора. В некоторых CFD-пакетах, например, во Fluent и Solid Works, есть встроенная возможность задать граничное условие типа «вентилятор» (fan), либо можно задать массовую силу внутри условного вентилятора (цилиндра) для разгона потока. Также в некоторых CFD-пакетах, например, во Fluent, граничное условие типа «вентилятор» можно задать в виде напорной характеристики, т.е. зависимости перепада давления между двумя поверхностями условного вентилятора и расхода воздуха через них.

При моделировании динамики газов в обрушенном выработанном пространстве необходимо прежде всего рассчитать его проницаемость и пористость на основе геомеханических моделей или расчетных формул. Движение газа в выработанном пространстве из-за малой скорости в большинстве случаев можно рассматривать как ламинарный поток.

Для моделирования динамики пыли и твердых частиц в газовой среде существует три основных подхода: однофазная многокомпонентная модель, двухфазная модель Эйлера-Эйлера и двухфазная модель Эйлера-Лагранжа. Более затратным с точки зрения вычислительных и временных ресурсов, но более точным является подход Эйлера-Лагранжа. В этом подходе несущая газоздушная фаза обычно описывается с использованием уравнений Рейнольдса в подходе

Эйлера с использованием стандартной или реализуемой модели $k-\varepsilon$, а фаза твердых частиц отслеживается в поле газоздушного потока с помощью подхода Лагранжа.

Для исследования шахтных пожаров в настоящее время разработан пакет численного моделирования «Симулятор динамики огня» (Fire Dynamics Simulator), использующий метод моделирования крупных вихрей (LES) для описания турбулентности.

Следует отметить, что для более полного понимания структуры турбулентных потоков в рудничной вентиляции перспективным подходом является применение методов LES и DES.

Поскольку в CFD-моделях используются приближенные подходы и некоторые допущения, необходима проверка CFD-исследования, чтобы убедиться, что промоделированные результаты находятся в пределах приемлемого уровня точности. Проверочные, или калибровочные, исследования обычно проводятся путем сравнения результатов, полученных в лабораторных или натурных экспериментах, с результатами CFD-моделирования.

Примеры, обсуждаемые в статье, и многочисленные исследования, найденные в литературе, показали, что с помощью CFD-методов возможно проведение вычислительных экспериментов для более глубокого понимания физических процессов, происходящих в рудничных вентиляционных сетях, при этом возможно исследование таких участков вентиляционной сети, где натурные исследования неприменимы или совсем невозможны. На основе полученных результатов можно оптимизировать конструкцию вентиляционного оборудования, улучшить качество и контроль вентиляции и тем самым повысить безопасность и производительность труда горнорабочих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Снегирев А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 143 с.
3. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. — М.: Физматлит, 2008. — 368 с.
10. Колесов Е. В., Накаряков Е. В. Выбор модели турбулентности при моделировании проветривания протяженных тупиковых очистных камер // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* — 2019. — Т. 6. — № 3. — С. 82–89.
17. Лугин И. В., Алферова Е. Л. Теплотери при движении поезда по подземному тоннелю при различных условиях эксплуатации // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 181–185.
34. Левин Л. Ю., Зайцев А. В., Колесов Е. В., Бутаков С. В. Оценка опасности применения фреоновых холодильных машин в подземных системах кондиционирования воздуха // *Безопасность труда в промышленности.* — 2017. — № 8. — С. 28–32. DOI:10.24000/0409-2961-2017-8-28-32.
35. Колесов Е. В., Казаков Б. П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* — 2020. — Т. 331. — № 7. — С. 15–23.
38. Каледина Н. О., Кобылкин С. С. О выборе способа проветривания тупиковых горных выработок газообильных угольных шахт // *Горный журнал.* — 2014. — № 12. — С. 99–103.
41. Павлов А. С. Об изменении аэродинамического сопротивления вентиляционной сети шахты при реверсировании воздушного потока // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 207–211.
61. Мальцев С. В., Казаков Б. П., Исаевич А. Г., Семин М. А. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2020. — № 2. — С. 46–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57.
88. Кобылкин С. С., Кобылкин А. С. Трехмерное моделирование при проведении инженерных расчетов по тактике горноспасательных работ // *Горный журнал.* — 2018. — № 5. — С. 82–85.
89. Файнбург Г. З., Исаевич А. Г. Анализ микроциркуляционных потоков между микрозонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2020. — № 3. — С. 58–73. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.
90. Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Костеренко В. Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты // *Компьютерные исследования и моделирование.* — 2011. — Т. 3. — № 2. — С. 155–163. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Blazek J. *Computational fluid dynamics: principles and applications*. 3d ed. Elsevier Science, San Diego, CA. 2015. 466 p.
2. Snegirev A. Yu. *Vysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoy fizike. Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techeniy: Uchebnoe posobie* [High-performance computing in technical physics. Numerical modeling of turbulent flows: Tutorial], Saint-Petersburg, Izd-vo Politekhn. un-ta. 2009, 143 p.
3. Volkov K. N., Emel'yanov V. N. *Modelirovanie krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy* [Modeling of large eddies in calculations of turbulent flows], Moscow, Fizmatlit, 2008, 368 p.

4. Pope S. B. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, New York, 2000, 771 p.
5. Gosman A. D. Developments in CFD for industrial and environmental applications in wind engineering. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 1999, no. 81, pp. 21–39.
6. Sorensen D. N., Nielsen P. V. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. *Indoor Air*. 2003, no. 13, pp. 2–17.
7. *Ansys fluent. Theory Guide. Release 18.0*. Ansys, Inc. 2017. 1034 p.
8. Spalart P., Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *Recherche Aerospatiale*. 1994, vol. 439, no. 1, pp. 5–21.
9. Mohammadi B., Pironneau O. *Analysis of the K-Epsilon turbulence model*. New York: Wiley, 1994, 194 p.
10. Kolesov E. V., Nakaryakov E. V. Selection of turbulence model in modeling of long blind drifts ventilation. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 82–89. [In Russ].
11. Marshall E. M., Bakker A. *Computational fluid mixing*. Fluid Dynamics Fluent Incorporated, 2001, 154 p.
12. Yakhot V., Orszag S. A., Thangam S., Gatski T. B., Speziale C. G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: fluid dynamics*. 1992, 4, pp. 1510–1520.
13. Bakker A. *The colorful fluid mixing gallery*. 2008. Available at: <http://www.bakker.org/cfm> (accessed 23 June 2020).
14. Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California: DCW Industries Inc. 1998. 477 p.
15. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
16. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*. 2003, no. 4, pp. 625–632.
17. Lugin I. V., Alferova E. L. Heat losses during train movement in an underground tunnel under various operating conditions. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 181–185. [In Russ].
18. Gilmore R., Marts J., Brune J., Saki S., Bogin G., Grubb J. Simplifying CFD modeling of longwall gobs with a modular meshing approach. *Mining Engineering*. 2015, vol. 67, no. 3, pp. 68–72.
19. Branny M., Karch M., Wodziak W., Jaszczur M., Nowak R., Szmyd J. S. An experimental validation of a turbulence model for air flow in a mining chamber. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014, vol. 530, article 012029.
20. Toraco J., Torno S., Menendez M., Gent M., Velasco J. Models of methane behaviour in auxiliary ventilation of underground coal mining. *International Journal of Coal Geology*. 2009, vol. 80, pp. 35–43.
21. Parra M., Villafruela J., Castro F., Mendez C. Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines. *Building and Environment*. 2006, vol. 41, pp. 87–93.
22. Dick J. B. Measurement of ventilation using tracer gas. *Heating, piping, and air conditioning*. 1950, vol. 22, no. 5, pp. 131–137.
23. Thimons E. D., Kissell F. N. *Tracer gas as an aid in mine ventilation analysis*. U.S. Bureau of Mines, Washington, DC. 1974. 17 p.
24. Xu G., Jong E., Luxbacher K., Ragab S. Computational fluid dynamics study of tracer gas dispersion in a mine after different ventilation damage scenarios. *SME Annual Meeting Seattle, WA*. 2012, pp. 248–252.
25. Xu G., Luxbacher K. D., Ragab S., Schafrik S. Development of a remote analysis method for underground ventilation systems using tracer gas and CFD in a simplified laboratory apparatus. *Tunnelling Underground Space Technology*. 2012, no. 33, pp. 1–11.

26. Xu G., Jong E. C., Luxbacher K. D., Ragab S. A., Karmis M. E. Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine. *Safety Science*. 2015, vol. 74, pp. 140–149.
27. Timko R. J., Thimons E. D. *Sulfur hexafluoride as a mine ventilation research tool – recent field applications*. U.S. Bureau of Mines, Washington, DC. 1982. 15 p.
28. Konduri I. M., McPherson M. J., Topuz E. Experimental and numerical modeling of jet fans for auxiliary ventilation in mines. *Proceeding 6th International Mine Ventilation Symposium*, Pittsburgh, PA, USA. 1997, pp. 505–510.
29. Krog R. B., Schatzel S. J., Dougherty H. N. Airflow distribution patterns at a longwall mine depicted by CFD analysis and calibrated by a tracer gas field study. *SME Annual Meeting*, Denver, CO. 2011, pp. 384–389.
30. Post F. H., T. van Walsum. Fluid flow visualization. *Focus on Scientific Visualization*. 1993, no. 40, pp. 1–37.
31. Ndenguma D. D. *Computational fluid dynamics model for controlling dust and methane in underground coalmine*: Dissertation (MSc), University of Pretoria, 2010, 212 p.
32. Wala A., Turner D., Jacob J. Experimental study of mine face ventilation system for validation of numerical models. *Proceeding 9th North American/U.S. Mine Ventilation Symposium*, Kingston, Canada. 2002, pp. 191–196.
33. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines. *Eurasian Mining*. 2015, no. 2, pp. 3–6.
34. Levin L. Yu., Zaitsev A. V., Kolesov E. V., Butakov S. V. Assessment of danger to use freon machines in the underground air conditioning systems. *Occupational Safety in Industry*. 2017, no. 8, pp. 28–32. [In Russ]. DOI:10.24000/0409-2961-2017-8-28-32.
35. Kolesov E. V., Kazakov B. P. Ventilation efficiency of dead-end development headings after blasting operations. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2020, vol. 331, no. 7, pp. 15–23. [In Russ].
36. Kaledina N. O., Kobylkin S. S., Kobylkin A. S. The calculation method to ensure safe parameters of ventilation conditions of goaf in coal mines. *Eurasian Mining*. 2016, no. 1, pp. 41–44.
37. Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Ventilation of blind roadways in coal mines: Problems and solutions. *Eurasian Mining*. 2015, no. 2, pp. 26–30.
38. Kaledina N.O., Kobylkin S.S. Ventilation of dead-end headings in coal mines with high gas content. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 12, pp. 99–103. [In Russ].
39. Wala A. M., Vytla S., Taylor C. D., Huang G. Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation. *Minerals Engineering*. 2007, no. 59, pp. 49–55.
40. Jade R. K., Sastry B. S. An experimental and numerical study of two-way splits and junctions in mine airways. *12th North American/U.S. Mine Ventilation Symposium*, Reno, NV, USA. 2008, pp. 293–298.
41. Pavlov S. A. About changes in aerodynamic resistance of mine ventilation network when reversing the air flow. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 207–211. [In Russ].
42. Nguyen V.-D., Heo W.-H., Kubuya R., Lee C.-W. Pressurization ventilation technique for controlling gas leakage and dispersion at backfilled working faces in large-opening underground mines: CFD analysis and experimental tests. *Sustainability*. 2019, vol. 11, no. 12, article 3313.
43. Feroze T. An initial investigation of room and pillar ventilation using CFD. *24th international mining congress and exhibition of Turkey*, Antalya, Turkey. 2015, pp. 1–8.
44. Meyer C. F. *The effect of last through road air velocities on unventilated headings*. Project CC8E10, COMRO. 1989. 15 p.
45. Park J., Jo Y., Park G. Flow characteristics of fresh air discharged from a ventilation duct for mine ventilation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018, vol. 32, no. 3, pp. 1187–1194.

46. Tutak M., Brodny J., Navickas K. Studying the impact of the location of air-duct lines on methane distribution and concentration in dog headings. *Acta Montanistica Slovaca*. 2019, vol. 24, no. 4, pp. 285–295.
47. Tutak M., Brodny J. Analysis of the effects of the position of the air duct supplying fresh air to the working face of the mined dog heading on methane concentration levels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 362, article 012036.
48. Park J., Park S., Lee D.-K. CFD modeling of ventilation ducts for improvement of air quality in closed mines. *Geosystem Engineering*. 2016, vol. 19, no. 4, pp. 177–187.
49. Zhang X., Zhang Y., Tien J. C. The efficiency study of the push-pull ventilation system in underground mine. *Underground Coal Operators Conference*, Wollongong, NSW, Australia. 2011, pp. 225–230.
50. Adjiski V., Mirakovski D., Despodov Z., Mijalkovski S. Method for determining the air change effectiveness of the auxiliary forcing ventilation system in underground mines using CFD software. *Mining Science*. 2018, vol. 25, pp. 175–192.
51. Liu H., Mao S., Li M. A case study of an optimized intermittent ventilation strategy based on CFD modeling and the concept of FCT. *Energies*. 2019, vol. 12, no. 4, article 721.
52. Kurnia J. C., Sasmito A. P., Wong W. Y., Mujumdar A. S. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines. *Science of the Total Environment*. 2014, vol. 481, pp. 317–334.
53. Wang W., Zhang C., Yang W., Xu H., Li S., Li C., Ma H., Qi G. In situ measurements and CFD numerical simulations of thermal environment in blind headings of underground mines. *Processes*. 2019, vol. 7, no. 5, article 313.
54. Kurnia J. C., Sasmito A. P., Mujumdar A. S. Dust dispersion and management in underground mining faces. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014, vol. 24, no. 1, pp. 39–44.
55. Feroze T., Genc B. A CFD model to evaluate variables of the line brattice ventilation system in an empty heading. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017, vol. 117, no. 2, pp. 97–108.
56. Feroze T., Genc B. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 253–259.
57. Feroze T., Genc B. Estimating the effects of line brattice ventilation system variables in an empty heading in room and pillar mining using CFD. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016, vol. 116, no. 12, pp. 1143–1152.
58. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S. M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 89, pp. 68–77.
59. Ray R. E., Gilbey M. J., Kumar P. The application of vertically-mounted jet fans in ventilation shafts for a rail overbuild. *12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*, Reno, NV. 2008, pp. 415–424.
60. Hurtado J. P., Acuña E. I. CFD analysis of 58 Adit main fans parallel installation for the 2015–2019 underground developments of the new level mine project. *Applied Thermal Engineering*. 2015, vol. 90, pp. 1109–1118.
61. Maltsev S. V., Kazakov B. P., Isaevich A. G., Semin M. A. Air exchange dynamics in the system of large cross-section blind roadways. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 46–57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57.
62. Panigrahi D. C., Mishra D. P. CFD simulations for the selection of an appropriate blade profile for improving energy efficiency in axial flow mine ventilation fans. *Journal of Sustainable Mining*. 2014, vol. 13, no. 1, pp. 15–21.
63. Drwięga A., Szelka M., Turewicz A. Improvement of auxiliary ventilation efficiency in underground workings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 261, article 012007.

64. Kaledina N. O., Kobylkin S. S., Kobylkin A. S. The calculation method to ensure safe parameters of ventilation conditions of goaf in coal mines. *Eurasian Mining*. 2016, no. 1, pp. 41 – 44.
65. Esterhuizen G., Karacan C. A methodology for determining gob permeability distributions and its application to reservoir modeling of coal mine longwalls. *SME Annual Meeting*, Denver, CO. 2007.
66. Yuan L., Smith A. C., Brune J. F. Computational fluid dynamics study on ventilation flow paths in longwall gobs. *11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*. State College, PA. 2006, pp. 591–598.
67. Tanguturi K., Balusu R. CFD modeling of methane gas distribution and control strategies in a gassy coal mine. *Journal of Computational Multiphase Flows*. 2014, no. 6, pp. 65–77.
68. Lolon S. A., Brune J. F., Bogin G. E., Grubb J. W., Saki S. A., Juganda A. Computational fluid dynamics simulation on the longwall gob breathing. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 185–189.
69. Ren T., Wang Z., Liang Y., Zhang J. Numerical investigation of CO₂ fringe behaviour on a longwall face and its control. *International Journal of Coal Geology*. 2018, vol. 186, pp. 80–96.
70. Saki S. A., Brune J. F., Bogin Jr. G. E., Grubb J. W., Emad M. Z., Gilmore R. C. CFD study of the effect of face ventilation on CH₄ in returns and explosive gas zones in progressively sealed longwall gobs. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017, vol. 117, no. 3, pp. 257 – 262.
71. Brodny J., Tutak M. Forecasting the distribution of methane concentration levels in mine headings by means of model-based tests and in-situ measurements. *Archives of Control Sciences*. 2019, vol. 29 (LXV), no. 1, pp. 25–39.
72. Mishra D. P., Kumar P., Panigrahi D. C. Dispersion of methane in tailgate of a retreat-ing longwall mine: a computational fluid dynamics study. *Environmental Earth Sciences*. 2016, vol. 75, no. 6, pp. 1 – 10.
73. Kumar P., Mishra D. P., Panigrahi D. C., Sahu P. Numerical studies of ventilation effect on methane layering behaviour in underground coal mines. *Current science*. 2017, vol. 112, no. 9, pp. 1873 – 1881.
74. Wala A. M., Vytla S., Huang G., Taylor C. D. Study on the effects of scrubber operation on the face ventilation. *12th North American/U.S. Mine Ventilation Symposium*, Reno, NV, USA. 2008, pp. 281 – 286.
75. Trevits M. A., Yuan L., Teacoach K., Valoski M. P., Urosek J. E. Understanding mine fires by determining the characteristics of deep-seated fires. *NIOSH Document*, Denver, CO, USA, preprint 2009, pp. 09 – 150.
76. Edwards J. C., Franks R. A., Friel G. F., Yuan L. Experimental and modeling investigation of the effect of ventilation on smoke rollback in a mine entry. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2006, vol. 58, pp. 53–58.
77. Luchian S. F., Bendelius A. G. West Virginia memorial tunnel fire ventilation test program. *International Conference on Fires in Tunnels*. Boston, MA. 1994.
78. Kmecová M., Krajčík M., Straková Z. Designing Jet Fan Ventilation for an Underground Car Park by CFD Simulations. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2018, vol. 63, no. 1, pp. 39–43.
79. Edwards J. C., Hwang C. C. CFD modeling of fire spread along combustibles in a mine entry. *SME Annual Meeting Littleton, CO*, preprint 2006, pp. 06–027.
80. Hansen R. Modelling temperature distributions and flow conditions of fires in an under-ground mine drift. *Geosystem Engineering*. 2018, pp. 1–16.
81. Edwards J. C., Hwang C. C. CFD analysis of mine fire smoke spread and reverse flow conditions. *8th U.S. Mine Ventilation Symposium, NIOSH Document*, Rolla, MO, USA. 1999. pp. 417–422.
82. Hwang C. C., Edwards J. C. CFD modeling of smoke reversal. *Proceeding International Conference Eng. Fire Prot. Des. NIOSH Document*, Bethesda, MD. 2001, pp. 376–387.

83. Yuan L., Smith A. C. Computational fluid dynamics modeling of spontaneous heating in longwall gob areas. *SME Annual Meeting*, Denver, CO, Preprint. 2007, pp. 07–101.

84. Yuan L., Smith A. C. Modeling the effect of barometric pressure changes on spontaneous heating in bleederless longwall panels. *SME Annual Meeting*, Denver, CO, Preprint 2007, pp. 07–101.

85. Yuan L., Smith A. C. Numerical study on effects of coal properties on spontaneous heating in longwall gob areas. *Fuel*. 2008, vol. 87, pp. 3409–3419.

86. Yuan L., Smith A. C. Effects of ventilation and gob characteristics on spontaneous heating in longwall gob areas. *12th US/North American Mine Ventilation Symposium*, Reno, NV. 2008, pp. 141–147.

87. Brodny J., Tutak M. Determination of the zone with a particularly high risk of endogenous fires in the goaves of a longwall with caving. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018, vol. 11, no. 3, pp. 545–553.

88. Kobylkin S.S., Kobylkin A.S. 3D modeling in engineering design of mine rescue work tactics. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 5, pp. 82 – 85. [In Russ].

89. Fainburg G.Z., Isaevich A.G. Analysis of microcirculation flows between microzones in face areas of blind shear stopes in potash mines with different ventilation methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 58 – 73. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.

90. Vasenin I. M., Shragr E. R., Kraynov A. Yu., Paleev D. Yu., Lukashev O. Yu., Kosterenko V. N. Mathematical simulation of non-stationary ventilation processes of coal mining. *Computer Research and Modeling*. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 155 – 163. [In Russ].

91. Kurnia J., Sasmito A. P., Mujumdar A. Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014, vol. 42, pp. 206 – 215.

92. Sasmito A., Birgersson E., Ly H., Mujumdar A. Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment . A computational fluid dynamic study. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013, vol. 34, pp. 82 – 95.

93. Zheng Y, Reed W. R., Shahan M. R., Rider J. P. Evaluation of roof bolter canopy air curtain effects on airflow and dust dispersion in an entry using blowing curtain ventilation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019, vol. 36, no. 9, pp. 1 – 12.

94. Zheng Y., Tien J. DPM dispersion study using CFD for underground metal/nonmetal mines. *12th U.S. /North American Mine Ventilation Symposium*. Wallace (ed), 2008, pp. 487 – 494.

95. Zheng Y., Lan H., Thiruvengadam M., Tien J. C., Li Y. Effect of single dead end entry inclination on DPM plume dispersion. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 3, pp. 401 – 406.

96. Zhang Q., Zhou G., Qian X., Yuan M., Sun Y., Wang D. Diffuse pollution characteristics of respirable dust in fully mechanized mining face under various velocities based on CFD investigation. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 184, pp. 239 – 250.

97. Cai P., Nie W., Hua Y., Wei W., Jin H. Diffusion and pollution of multi-source dusts in a fully mechanized coal face. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018, vol. 118, pp. 93 – 105.

98. Ren T., Wang Z., Zhang J. Improved dust management at a longwall top coal caving (LTCC) face – A CFD modelling approach. *Advanced Powder Technology*. 2018, vol. 29, no. 10, pp. 2368–2379.

99. 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*, vol. 2018, article 8928120. DOI: 10.1155/2018/8928120.

100. Toraco J., Torno S., Menendez M., Gent M. Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: Validated CFD modelling of dust behaviour. *Tunnelling Underground Space Technology*. 2011, vol. 26, pp. 201–210.

101. Yuezhe L., Akhtar S., Sasmito A. P., Kurnia J. C. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 657–662.
102. Li Y., Wang P., Liu R., Gao R. Optimization of structural parameters and installation position of the wall-mounted air cylinder in the fully mechanized excavation face based on CFD and orthogonal design. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019, vol. 130, pp. 344–358.
103. Geng F., Luo G., Wang Y., Peng Z., Hu S., Zhang T., Chai H. Dust dispersion in a coal roadway driven by a hybrid ventilation system: a numerical study. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017, vol. 113, pp. 1–46.
104. Liu H., Wu X., Mao S, Li M, Yue J. A time varying ventilation and dust control strategy based on the temporospatial characteristics of dust dispersion. *Minerals*. 2017, vol. 7, no. 4, pp. 59.
105. Chang P., Xu G., Zhou F., Mullins B., Abishek S., Chalmers D. Minimizing DPM pollution in an underground mine by optimizing auxiliary ventilation systems using CFD. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 87, pp. 112–121.
106. Xu G., Chang P., Mullins B., Zhou F., Hu S. Numerical study of diesel particulate matter distribution in an underground mine isolated zone. *Powder Technology*. 2018, vol. 339, pp. 947–957.
107. Wang Y., Luo G., Geng F., Li Y., Li Y. Numerical study on dust movement and dust distribution for hybrid ventilation system in a laneway of coal mine. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015, vol. 36, pp. 146–157.
108. Skjold T., Eckhoff R. K., Arntzen B. J., Lebecki K., Dyduch Z., Klemens R., Zydak P. Simplified modelling of explosion propagation by dust lifting in coal mines. *Proceeding 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, UK. 2007, pp. 23–27.
109. Proud D., Collecutt G., Humphreys D. Computational fluid dynamics modelling of coal dust explosions and suppression systems. *3rd Australian Mine Ventilation Conference, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, Sydney, Australia. 2015, pp. 309–313.
110. Collecutt G., Humphreys D., Proud D. CFD simulation of underground coal dust explosions and active explosion barriers. *7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. CSIRO Australia, Melbourne, Australia. 2009, pp. 1–6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Казakov Борис Петрович¹ — д-р техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Колесов Евгений Викторович¹ — младший научный сотрудник,
e-mail: kolesovev@gmail.com
Накаряков Евгений Вадимович¹ — инженер,
Исаевич Алексей Геннадьевич¹ — канд. техн. наук, зав. сектором,
¹ Горный институт УрО РАН.

Для контактов: Колесов Е.В., e-mail: kolesovev@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

B.P. Kazakov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher,
E.V. Kolesov¹, Junior Researcher, e-mail: kolesovev@gmail.com,
E.V. Nakariakov¹, Engineer,
A.G. Isaevich¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector,

¹ Mining Institute, Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
614007, Perm, Russia.

Corresponding author: E.V. Kolesov, e-mail: kolesovev@gmail.com.

Получена редакцией 06.08.2020; получена после рецензии 10.09.2020; принята к печати 10.05.2021.
Received by the editors 06.08.2020; received after the review 10.09.2020; accepted for printing 10.05.2021.