

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НОВОГО СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ УКЛОННОГО БЛОКА НЕФТЯНОЙ ШАХТЫ

А.В. Николаев¹, П.В. Максимов¹, Г.З. Файнбург¹, Д.А. Конотоп¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия, e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Аннотация: Рассмотрено применение результатов математического моделирования структуры вентиляционных потоков в уклонном блоке нефтяной шахты для обоснования решений и организации нового способа проветривания, идея которого состоит в раздельном проветривании постоянно нагревающейся от высокотемпературного горного массива (нефтяного пласта) части рабочей зоны (горячая зона) и остальной части выработки, более холодной. Такое разделение может быть выполнено с помощью продольной воздухо непроницаемой и теплоизолирующей перегородки на протяжении всей буровой галереи. При этом сброс нагретого воздуха производится не в общую вентиляционную сеть горных выработок нефтешахты, а по вертикальной вентиляционной скважине на поверхность. Математическая модель описывает трехмерное стационарное турбулентное движение и теплоперенос дифференциальными уравнениями в частных производных полуэмпирической модели типа SST $k-\omega$, поставленная задача решается силами вычислительного пакета ANSYS Fluent с использованием метода двусторонней стенки (предназначен для моделирования обособленных процессов движения воздуха с обеих сторон перегородки). Результаты численного моделирования полностью подтвердили работоспособность и перспективность рассматриваемого способа проветривания: в буровой галерее поддерживаются допустимые условия для работы (соответствующий микроклимат), а нагретый воздух, обычно ухудшающий микроклиматические условия труда, удаляется через вентиляционную скважину на поверхность. Возникающая при этом естественная тяга способствует интенсивному удалению нагретого воздуха и, тем самым, улучшает проветривание уклонного блока и нефтешахты в целом.

Ключевые слова: нефтяная шахта, буровая галерея, условия труда, способ проветривания, энергоэффективность, естественная тяга, математическое моделирование, численные методы.

Благодарность: Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы деятельности Пермского научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование».

Для цитирования: Николаев А. В., Максимов П. В., Файнбург Г. З., Конотоп Д. А. Анализ эффективности работы нового способа проветривания уклонного блока нефтяной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 83–98. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_83.

Efficiency of a new ventilation method for a tilted block in an oil mine

A.V. Nikolaev¹, P.V. Maksimov¹, G.Z. Fajnburg¹, D.A. Konotop¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Abstract: The article discusses the mathematical modeling results on the structure of ventilation flows in a tilted block in an oil mine to design and justify a new ventilation method. This method consists in separate ventilation of a work zone (hot zone), heated incessantly by high-temperature rock mass (oil reservoir), and the rest, colder portion of the underground opening. The separation is achieved by means of setting an airtight and insulating partition lengthwise the whole drilling gallery. The heated air is let out not to the common ventilation network of the oil mine but via a vertical ventilation well and to ground surface. The mathematical model describes the 3D stationary turbulence and heat transfer by differential equations with partial derivatives of a semi-empirical model of the type of SST $k-\omega$. The problem is solved in ANSYS Fluent using the method of double-sided wall (meant for modeling detached air flows on both sides of the partition). The numerical modeling results have fully proved the efficiency and the prospects of the proposed ventilation method: the drilling gallery provides admissible operating environment (microclimate), and heated air which can worsen the microclimate is removed via the ventilation well to ground surface. The generated natural draught contributes to fast removal of heated air, which improves ventilation of the tilted block and the whole oil mine.

Key words: oil mine, drilling gallery, work environment, ventilation method, energy efficiency, natural draught, mathematical modeling, numerical methods.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the Perm Global-Level Science and Education Center's Efficient Subsoil Management Program.

For citation: Nikolaev A. V., Maksimov P. V., Fajnburg G. Z., Konotop D. A. Efficiency of a new ventilation method for a tilted block in an oil mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5):83-98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_83.

Введение

Одним из способов добычи высоковязкой нефти является термошахтный, при котором из горных выработок в продуктивной нефтяной пласт закачивается перегретый пар [1–3], что позволяет резко снизить вязкость нефти и повысить ее подвижность для увеличения дебита эксплуатационных скважин. Подобный способ добычи высоковязкой нефти применяется на Ярегском месторождении (ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»).

Однако при таком способе добычи нефти в буровой галерее, других выработках уклонного блока температура

воздуха становится недопустимо высокой [4–6]. Попытки решить эту проблему путем теплоизоляции горного массива [7, 8], изменения способа добычи нефти [9–12], закрытого сбора нефти [13, 14], подачи холодного воздуха [15] не дают требуемого эффекта и очень трудоемки и затратны. Например, процесс охлаждения воздуха для нормализации температурного режима в буровой галерее требует затрат электроэнергии, соизмеримых с затратами на проветривание всей нефтешахты [16, 17]. При этом видимого и значимого снижения температуры таким способом достичь не

удается [18]. Такое суперзатратное проветривание противоречит современным концепциям green mining, бережливого производства и декарбонизации.

Ранее одним из авторов данной работы был предложен нетрадиционный способ организации проветривания уклонного блока, позволяющий нормализовать условия труда горнорабочих в уклонном блоке и в нефтешахте в целом при минимизации дополнительных затрат на проветривание [17].

Основной целью настоящей работы является установление работоспособности предложенного способа проветривания уклонного блока.

В силу сложности процесса проветривания и многофакторности формирования условий труда в уклонном блоке оценку работоспособности и эффективности предложенного способа может дать либо натурный шахтный эксперимент (чрезвычайно трудоемкий и довольно затратный), либо, в духе современной цифровизации производственных процессов (см., например, [19]) — численный эксперимент, сочетающий математическое моделирование вентиляционных процессов и его реализацию численными методами на современных компьютерах. В настоящее время имеется большое количество положительных примеров применения подобного подхода в рудничной вентиляции и не только. Так, например, в работе [20] исследуется опасность перегрева среды как одна из серьезных проблем, без решения которой невозможно безопасное и эффективное использование природных ресурсов и эксплуатация оборудования; исходя из анализа процессов теплопередачи проводится прогнозирование температур и проектирование вентиляции; показано, что тепло, выделяемое от рабочего забоя, оказывает решающее влияние на температуру воздушного потока в выработке; предложенная связанная модель

учитывает конвективный теплоперенос между окружающей горной породой и воздушным потоком, нестационарный теплоперенос в горных породах.

На основе трехмерного моделирования в работе [21] исследуется распределение воздушного потока в туннеле с арочным сечением, а в [22] представлены модели, включающие ключевые характеристики оборудования для работы в длинных забоях и непосредственно в зоне выработки. Результаты моделирования подтверждены натурными экспериментами. В работах [23, 24] исследуются процессы тепломассопереноса газозвушной смеси с учетом движения в шахте добычного комбайна; поток газозвушной смеси рассчитывается с использованием метода конечных объемов, а также с использованием моделей турбулентности $k-\omega$ SST и SAS; обсуждаются вопросы использования разных типов сеток для дискретизации расчетной области.

В работе [25] на основе верифицированной по экспериментальным данным математической модели и коммерческого программного обеспечения исследуются несколько сценариев вентиляции в подземной угольной шахте, а в [26] на реальном примере подземной угольной шахты проводится оптимизация параметров вентиляции с использованием подхода моделирования вычислительной гидродинамики. В работе [27] приведено описание методического подхода, разработанного для создания виртуальных аналогов объектов вентиляции угольных шахт, позволяющего исследовать аэрогазодинамические системы и на этой основе производить выбор технических решений и параметров систем проветривания.

В статье [28] представлен обзор приложений вычислительной гидродинамики (CFD — Computational Fluid Dynamics) в горном деле с особым внима-

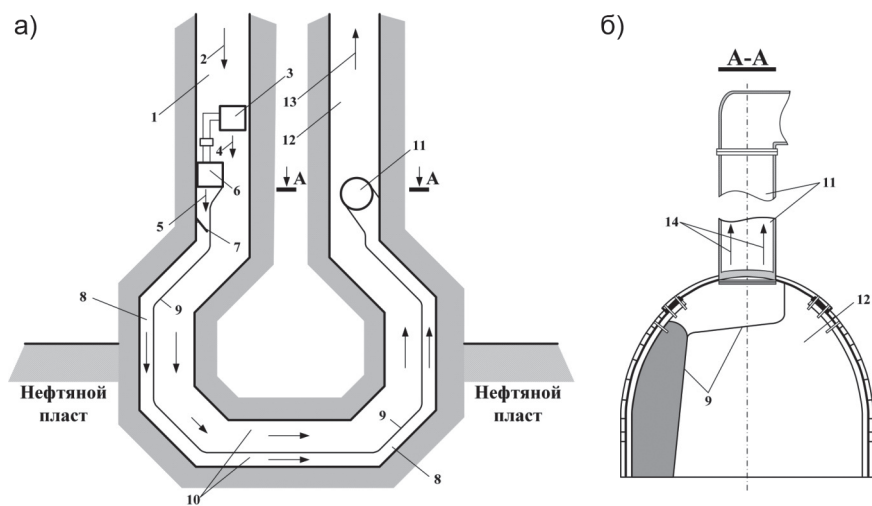
нием к проблемам потока, связанным с вентиляцией шахт, представлены основные принципы численного моделирования, используемые модели турбулентности, рассмотрены приложения CFD в области исследований и проектирования в горнодобывающей промышленности, которые иллюстрируют успех CFD и подчеркивают сложные проблемы. В статье [29] основное внимание уделяется анализу современного состояния с точки зрения применения вычислительной гидродинамики в исследованиях безопасности вентиляции при подземной добыче каменного угля; представленные результаты систематизируют знания о применении CFD в исследованиях вентиляции в горнодобывающей промышленности; указаны потенциальные направления дальнейших исследований в области возможных приложений вычис-

лительной гидродинамики для повышения безопасности рассматриваемого процесса.

Приведенные примеры и выполненный на их основе анализ показывают, что в настоящее время численный эксперимент является уже сложившимся, широко применяемым подходом для проверки предлагаемых технических решений, особенно в тех случаях, когда проведение натурального эксперимента, да еще и в условиях реально работающей шахты, сильно затруднено.

Постановка проблемы

В работе рассматривается инновационный способ проветривания уклонного блока нефтешахты, техническая реализация которого состоит в разделении рабочей зоны на две подзоны — «горячую» (и практически безлюдную)



- 1 – воздухоподающая выработка уклонного блока (уклон); 2 – свежий воздух;
- 3 – испаритель системы кондиционирования воздуха (СКВ); 4 – охлажденный воздух;
- 5 – нагретый воздух; 6 – конденсатор СКВ; 7 – управляемая шлюзовая заслонка;
- 8 – участок между нефтяным пластом и теплоизолирующей перегородкой;
- 9 – теплоизоляционная перегородка; 10 – буровая галерея; 11 – вентиляционная скважина;
- 12 – воздуховыдающая выработка (ходок); 13 – исходящий воздух;
- 14 – исходящий по скважине 11 нагретый воздух

Рис. 1. Предлагаемый способ проветривания уклонного блока нефтешахты: уклонный блок (вид сверху) (а); разрез по вентиляционной скважине (б)

Fig. 1. Proposed ventilation method for tilted block in oil mine: tilted block (top view) (a); cross-section along ventilation well (b)

и «нормальную» с формированием двух автономных потоков горячего и обычного воздуха. Такое решение позволяет локализовать основную проблему — повышение температуры воздуха в рабочей зоне, в исходящих из буровой галереи горных выработках, и, тем самым, произвести элиминацию нагретого воздуха из нее путем удаления через вентиляционную скважину. В этом случае из двух главных процессов проветривания: перемешивания и переноса, эффективно задействован второй, что ведет к его доминированию над первым. Воздух в рабочей зоне не успевает прогреться из-за перемешивания и «съема» тепла с перегородки движущимся потоком. Тем самым нагрева воздуха от разогретого паром массива практически удается избежать путем выноса нагретого воздуха на поверхность. Таким образом, физически способ основан на подавлении процессов перемешивания более нагретых и менее нагретых объемов воздуха и стимулировании выноса высоконагретых элементов воздушной среды за пределы рабочей зоны и нефтешахты в целом.

Схема такого способа проветривания уклонного блока представлена на рис. 1.

Открытое пространство буровой галереи уклонного блока после бурения скважин и подведения к ним паропроводов разделяется при помощи продольной воздухонепроницаемой теплоизоляционной перегородки. Тем самым поступающий в уклон свежий воздух разделяется на два потока: один с помощью вентиляционного оборудования (локальный охладитель воздуха (при необходимости) — испаритель системы кондиционирования воздуха) идет между продольной перегородкой и разогретым массивом, а второй под действием общешахтной депрессии поступает в рабочую зону буровой галереи. Перегородка устанавливается как можно ближе к го-

рячей стенке галереи для максимального уменьшения влияния нагретой зоны нефтяного пласта на тепловую обстановку в буровой галерее, однако при этом должны приниматься во внимание расположение используемого оборудования, характер работ, связанных с его обслуживанием, характер работ, проводимых персоналом в «горячей» зоне, безопасность возведения перегородки.

Нагретый от нефтяного пласта воздух удаляется по вентиляционной скважине на поверхность, а исходящий из рабочей зоны воздух удаляется в обычном порядке в соответствии с организацией проветривания нефтешахты.

Более того, поскольку при нагреве воздух становится более легким, то при удалении его через вертикальную вентиляционную скважину на поверхность возникает естественная тяга [30—32], действующая на всю вентиляционную сеть горных выработок нефтешахты, что позволяет снизить затраты на электроэнергию, расходуемую как вентилятором системы кондиционирования воздуха (СКВ), так и главной вентиляторной установкой (ГВУ) [33—35].

Регулирование потоков воздуха в буровой галерее достигается пассивным регулятором в виде шлюзовой заслонки, препятствующей удалению всего поступающего в уклонную галерею свежего воздуха через вентиляционную скважину.

Такая организация проветривания с доминированием переноса (выноса) тепла над его перемешиванием позволяет даже при существенном нагреве пласта и воздуха на участке между нефтяным пластом и теплоизоляционной перегородкой использовать СКВ небольшой мощности. При этом охлажденный воздух (из испарителя СКВ) будет поступать в рабочую зону буровой галереи, а нагретый (из конденсатора СКВ) — в участок между перегородкой и нефтяным пластом, то есть в область, из ко-

торой нагретый воздух удаляется на поверхность.

Заметим, что тем самым затраты на проветривание и нормализацию микроклиматических параметров рабочей зоны будут существенно ниже, чем в традиционно используемых в настоящее время способах.

Реальная картина проветривания в уклонном блоке с вышеописанным оборудованием чрезвычайно сложна в силу многофакторности воздействий на воздушную среду горных выработок уклонного блока, наличия сил плавучести, турбулентности, пульсирования потока, действия естественной тяги, многосвязности системы потоков и горных выработок, отсутствия пространственной ректангулярности поверхности горных выработок и др. Для ее описания могут быть применены математические модели различной сложности в классической и сетевой постановке [18].

Наиболее интересна и эвристически полезна для рассматриваемого способа проветривания трехмерная постановка задачи.

Математическая модель для компьютерного моделирования — численного эксперимента была выбрана из соображений учета основных процессов, характерных для рассматриваемой задачи.

Рассматривается стационарное турбулентное движение неоднородной по плотности и температуре воздушной среды.

В уравнениях движения учтена неразрывность потока, изменение плотности из-за теплового расширения и атмосферного давления, непроницаемость твердых поверхностей и продольной перегородки.

Осреднение уравнения Навье-Стокса, уравнения энергии (теплопереноса) и уравнения неразрывности ведется по всему статистическому ансамблю всех возможных состояний пульсирующего

турбулентного потока, что позволяет рассматривать задачу в стационарной (самой важной для устойчивого обеспечения нормальных и нормативных условий труда) постановке.

Результирующие уравнения, в том числе:

- уравнение неразрывности для рассматриваемого стационарного течения воздуха:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

- уравнения сохранения количества движения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

- уравнение сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad (4)$$

где u_i — компонента вектора средней скорости; ρ — плотность среды; p — давление; ρg — сила тяжести; μ — коэффициент молекулярной вязкости; δ_{ij} — символ Кронекера; E — полная энергия; k — коэффициент теплопроводности; c_p — теплоемкость; μ_t — турбулентная вязкость; Pr_t — число Прандтля; T — температура.

Представленные уравнения замыкаются в рамках полуэмпирической модели турбулентности SST $k-\omega$, подробно описанной [19, 36, 37].

В компьютерной модели уклонного блока формулируются граничные усло-

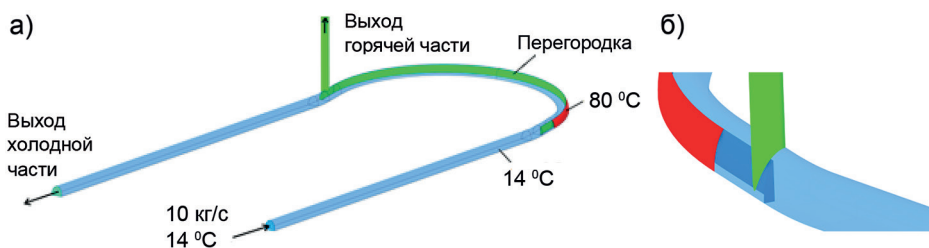


Рис. 2. Вид расчетной области и граничные условия: общий вид расчетной области (а); примыкание вентиляционной скважины к буровой галерее (б)

Fig. 2. Computational domain and boundary conditions: general layout of computational domain (a); juncture of ventilation well and drilling gallery (b)

вия, характерные для нефтешахт рассматриваемого типа. Основной целью работы является подтверждение при помощи вычислительного эксперимента работоспособности нового метода проветривания уклонного блока. Очевидно, что в силу физических принципов, на которых основан новый метод проветривания, становится потенциально возможным регулирование процесса проветривания в достаточно широких пределах. Установление основных закономерностей в характере проветривания в зависимости от вариации граничных условий и иных управляющих параметров должно стать задачей последующих исследований, лежащих в основе создаваемой автоматизированной системы управления проветриванием уклонного блока нефтешахты. В представленной работе численные решения получены с использованием типового для рассматриваемого объекта исследования набора граничных условий.

На входе в уклонный блок — расчетную область — задается массовый расход воздуха — 10 кг/с. Температура подаваемого воздуха — 14 °С. На выходе ставятся мягкие граничные условия постоянства потоков.

Для расчетов использовались реальные параметры горных выработок добычного участка Т-2 нефтяной шахты № 1 Нефтешахтного управления (НШУ) «Яреганефть» ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»

[17]: сечение наклонных выработок (воздухоподающей и воздуховыдающей) — 5,1 м², буровой галереи — 8 м². Сечение вентиляционной выработки принято равным 1,57 м².

Для упрощения расчетов сопряженная задача о распределении поля температур в окружающем буровую галерею горном массиве, включая нефтяной пласт, разогреваемый за счет подачи в него перегретого пара, не ставится и не решается.

С разумной для практики точностью принимается, что нефтяной пласт в зоне расположения добычных скважин (внешняя красная граница на рис. 2) нагрет до температуры 80 °С и не охлаждается в процессе передачи тепла набегающему потоку воздуха в горячей части буровой галереи.

Предполагается также, что окружающий остальные стенки уклонного блока и вентиляционной скважины пласт не нагрет, а имеет постоянную температуру 14 °С.

Описанные условия учитываются в математической модели при помощи граничных условий третьего рода вида (5):

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_{\text{стенки}}), \quad (5)$$

где T — температура среды; $T_{\text{стенки}}$ — температура стенки выработки λ — коэффициент теплопроводности; α — коэффициент теплоотдачи; n — нормаль к поверхности.

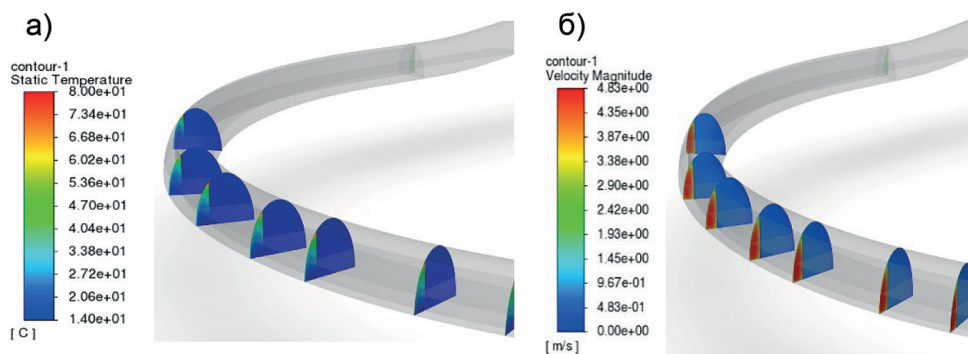


Рис. 3. Распределение температуры и скоростей в сечениях буровой галереи: распределение температур (а); распределение скоростей по сечению (б)

Fig. 3. Cross-sectional patterns of temperatures and velocities in drilling gallery: temperatures (a); velocities (b)

Задаваемые в модели граничные условия представлены на рис. 3.

Поставленная математическая задача решается численно с использованием метода конечных объемов, реализованного в прикладном программном пакете ANSYS Fluent.

Учет наличия воздухонепроницаемой теплоизолирующей продольной перегородки и моделирования процессов теплопередачи через перегородку между горячей и нормальной частями буровой галереи используется реализованная в ANSYS Fluent технология двухсторонних стенок. В рамках этой технологии сама стенка как физический объект не вводится в расчетную область, что позволяет не решать для нее трехмерные уравнения теплопроводности и свести трехзонную расчетную область (горячая часть, перегородка, нормальная (холодная) часть) к однозонной. Это позволяет значительно снизить степень дискретизации расчетной области.

При этом для уже существующей расчетной сетки решения задачи аэродинамики теплопередача рассчитывается непосредственно из решения в соседних ячейках, причем в расчетных формулах учитывается тип материала, толщина перегородки, скорость тепловыделения и т.п. для расчета термического сопротивления тонких стенок и пр.

Граничные условия, задаваемые на сторонах стенки, относящихся к горячей и нормальной (холодной) частям, аналогичны соотношению (5).

Обсуждение

Наиболее характерные распределения температур и скоростей в разных сечениях, перпендикулярных продольному направлению буровой галереи (и воздушного потока), представлены на рис. 3.

Хорошо видно (рис 3, а), что в процессе проветривания передача тепла от горячей части вблизи нагретого нефтеносного горного массива через воздухонепроницаемую теплоизолирующую перегородку к основной части выработки, проветриваемой в штатном режиме, не происходит.

Более наглядно распределение температур и скоростей отражено на рис. 4, где приведены результаты моделирования для сечения, расположенного в середине дугообразной части буровой галереи.

С целью наглядной демонстрации количественных характеристик температурного поля в зависимости от высоты на рис. 3, а отмечены значения температуры на высоте 1 м от почвы (уровень живота работника) и на расстоянии 1,7 м от почвы (уровень головы работника). Результаты моделирования показывают,

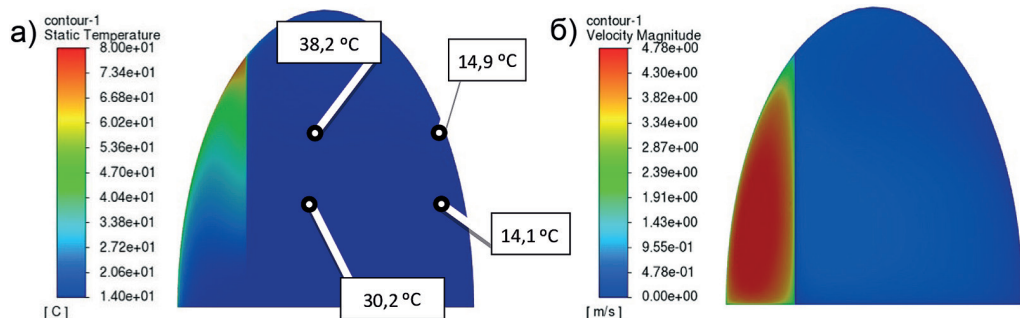


Рис. 4. Распределение температуры и скоростей в сечении, расположенном в середине буровой галереи: распределение температур (а); распределение скоростей по сечению (б)

Fig. 4. Patterns of temperatures and velocities in middle cross-section of drilling gallery: temperatures (a); velocities (b)

что в горячей части буровой галереи наблюдается температурная стратификация воздуха, однако большая часть объема выработки, отделенной стенкой от основной галереи, находится в условиях, не препятствующих нахождению в этом пространстве горнорабочих и выполнению ими работ по обслуживанию шахтного оборудования.

Распределение скоростей, приведенное на рис. 4, б, свидетельствует о значительной разнице в скоростях движения воздушной среды в горячей и холодной частях буровой галереи. Однако значения скоростей не превышают нормативно допустимых и, более того, свидетельствуют о возможности проветривания горячей части галереи за счет возникновения

естественной тяги без использования дополнительных приточных и вытяжных вентиляторов или иных активных средств проветривания.

Наблюдается ожидаемое повышение температуры воздушной смеси по мере ее движения от начала буровой галереи до вентиляционной скважины (рис. 5). Это следует из одномерного уравнения теплопереноса для осредненной по сечению потока температуры, в котором продольная теплопроводность мала по сравнению с адвективным переносом и поперечным теплотокотом от перегородки. В трехмерном течении температурная стратификация нарастает, хотя на определенной высоте от почвы эти изменения не столь наглядно видны.

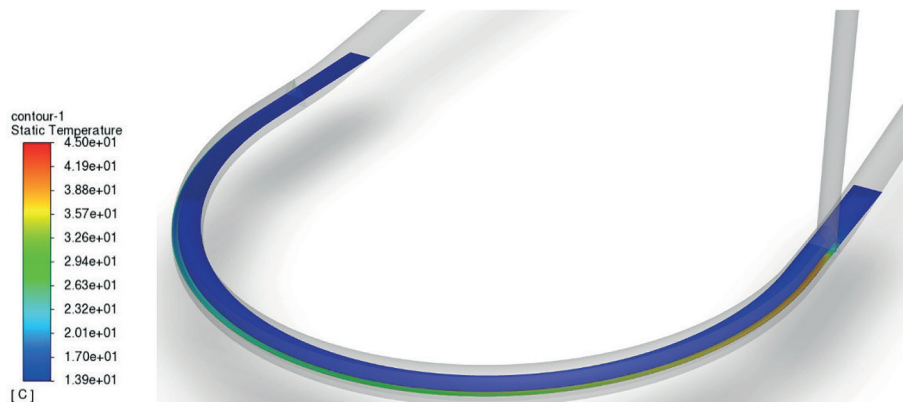


Рис. 5. Распределение температур по длине буровой галереи в сечении на высоте 1,5 м от почвы
Fig. 5. Temperature pattern lengthwise drilling gallery in cross-section 1.5 m high from its floor

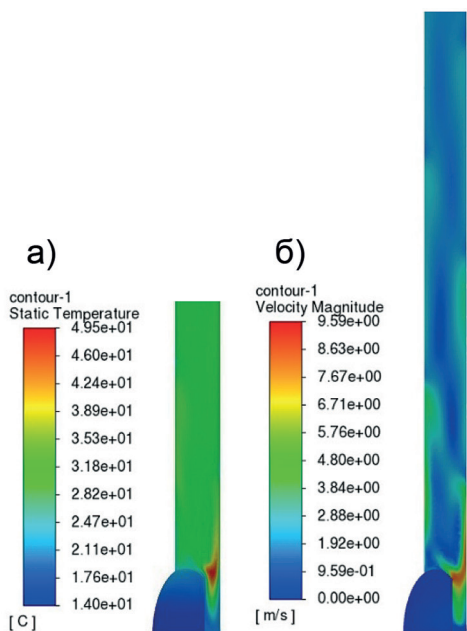


Рис. 6. Распределение температуры и скоростей воздушной среды по высоте вентиляционной скважины: распределение температур (а); распределение скоростей (б)

Fig. 6. Air temperature and velocity patterns height-wise ventilation well: temperatures (a); velocities (b)

На рис. 6, а, б представлены распределения полей температуры и скоростей в сечении выходящей на поверхность вентиляционной скважины, обеспечивающей удаление из шахты нагретого воздуха. При этом конструктивное исполнение места примыкания вентиляционной скважины к буровой галерее не предполагает последующее смешивание воздушных потоков из горячей и холодной частей. Хорошо видно, что в вентиляционной системе обеспечивается требуемое проветривание с устойчи-

вым движением исходящего воздуха из шахты наружу, а обратного противотока (даже части) воздушного потока не наблюдается.

Массовые расходы на входе и выходе различных зон (горячей и нормально холодной), а также осредненные по соответствующим сечениям потоков температуры представлены в таблице.

В процессе движения воздушной среды в горячей части буровой галереи средняя температура среды при заданных условиях повышается незначительно, разница между средней температурой на выходе из горячей части и средней температурой на входе составляет 4–5 °С. Средняя температура воздушной среды в холодной части галереи за счет передачи тепла через стенку повышается всего на 1 °С.

Для рассмотрения вопроса о влиянии материала перегородки был выполнен случай, когда продольная теплоизоляционная перегородка сделана из материала, теплофизические свойства которого близки к свойствам древесины. Определено, что средние температуры на выходе холодной и горячей части незначительно отличаются от случая использования металлической стенки. При этом разница в результатах двух расчетных случаев практически не выходила за пределы значений порядка 1 °С.

Следовательно, использованная в работе математическая модель описывает основные процессы проветривания, хотя и достаточно схематична в способе задания граничных условий, учете продольной перегородки и отказе от реше-

Характерные показатели проветривания уклонного блока нефтешахты Characteristic determinants of tilted block ventilation in oil mine

Массовый расход на входе, кг/с	Массовый расход на выходе горячей части, кг/с	Массовый расход на выходе холодной части, кг/с	Температура на входе, °С	Средняя температура на выходе горячей части, °С	Средняя температура на выходе холодной части, °С	Средняя температура в объеме горячей части, °С
10	5,92	4,08	14	18,24	15,05	25,14

ния сопряженной задачи теплопроводности в горном массиве, включая нефтяной пласт, окружающем уклонный блок.

Вместе с тем результаты численного моделирования позволяют оценить функциональность рассматриваемого технического решения и свидетельствуют о том, что данный нестандартный способ проветривания буровой галереи нефтешахты, при котором горячая часть галереи с добычными скважинами отделена от основного объема выработки с рабочими зонами воздухопроницаемой стенкой, за счет чего объемы нагретого воздуха не смешиваются с основным, более холодным потоком, а удаляются на поверхность за счет дополнительной вертикальной вентиляционной скважины, действительно работоспособен.

Определено, что при рассмотренных типичных параметрах проветривания в уклонном блоке устанавливаются режимы движения воздушной среды и микроклимат, соответствующие нормативным требованиям и не представляющие вреда для здоровья горнорабочих.

Более того, в горячей части буровой галереи обеспечивается устойчивое проветривание за счет естественной тяги без применения дополнительных приточных и вытяжных вентиляторов.

Весь требуемый объем нагретого до высоких температур воздуха выводится наружу, а на практике может регулироваться управляемой шлюзовой заслонкой.

В процессе проведения серии вычислительных экспериментов существенной зависимости результатов проветривания от материала теплоизолирующей перегородки не наблюдалось.

Следует отметить, что созданная параметризованная математическая модель проветривания уклонного блока позволяет проводить многовариантные вычислительные эксперименты, в том числе исследовать режимы проветривания в случае частичного или даже полного

закрытия управляемой шлюзовой заслонки, выполнять оценку параметров проветривания в летнее и зимнее время, исследования зависимости режимов проветривания от параметров воздушного потока на входе в воздухоподающую выработку уклонного блока и пр.

Хотя представленные в работе результаты отражают закономерности установившегося движения воздушной среды, разработанная математическая модель позволяет проводить вычислительный эксперимент в нестационарной постановке, что будет востребовано при анализе переходных динамических процессов, а также при решении задачи управления режимами проветривания уклонного блока с целью обеспечения безопасности работ и повышения энергоэффективности добычи нефти шахтным способом.

Заключение


Таким образом, описанное выше применение математического моделирования структуры вентиляционных потоков в уклонном блоке нефтяной шахты применительно к новому способу проветривания с отдельным проветриванием постоянно нагреваемой от высокотемпературного горного массива (нефтяного пласта) части рабочей зоны (горячая зона) и остальной части выработки, более холодной, позволило выявить работоспособность такого способа и уточнить ряд деталей, важных на практике.

Кроме того, показано, что математические модели, описывающие трехмерное стационарное турбулентное движение и теплоперенос дифференциальными уравнениями в частных производных полуэмпирической модели типа SST $k-\omega$ в рамках вычислительного пакета ANSYS Fluent, можно успешно применять для задач рудничного проветривания в пространственно сложной многофакторной задаче с продольной перегородкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коноплев Ю. П., Буслаев В. Ф., Ягубов З. Х., Цхадая Н. Д. Термощахтная разработка нефтяных месторождений. — М.: Недра-Бизнесцентр, 2006. — 288 с.
2. Chertenkov M. V., Mulyak V. V., Konoplev Y. P. The Yarega heavy oil field — history, experience, and future // Journal of Petroleum Technology. 2012, vol. 64, no. 4, pp. 158–160. DOI: 10.2118/0412-0153-JPT.
3. Тюнькин Б. А., Коноплев Ю. П. Опыт подземной разработки нефтяных месторождений и основные направления развития термощахтного способа добычи нефти. — Ухта: ПечорНИПИнефть, 1996. — 160 с.
4. Фомин А. И., Грунсковой Т. В. Улучшение условий труда шахтеров-нефтяников при переходе от термощахтного способа добычи высоковязкой нефти на модульно-шахтный способ разработки Ярегского месторождения // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 12. — С. 58–65. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-58-65.
5. Afanasjeva I. V., Fathutdinov R. I. Improving procedures of training employees by implementing guidance cards safe methods and techniques of work // Machines. Technologies. Materials. 2016, vol. 10, no. 10, pp. 10–12.
6. Климова И. В. Инструктивные карты безопасных методов и приемов труда для отдельных видов работ, проводимых в нефтешахте // Записки Горного института. — 2017. — Т. 225. — С. 354–359.
7. Бойко В. А., Бойко А. В. Способ ускоренного формирования теплоуравняющей рубашки горной выработки глубокой шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 10. — С. 86–90.
8. Мартынов А. А., Яковенко А. К., Король В. И. К вопросу уменьшения риска тепловых поражений горнорабочих в выработках глубоких шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 5. — С. 268–271.
9. Коноплев Ю. П., Гуляев В. Э. Внедрение новых методов термощахтной разработки на Ярегском месторождении высоковязкой нефти // Нефтяное хозяйство. — 2011. — № 2. — С. 89–91.
10. Круглов Ю. В. Методы борьбы с повышенными температурами шахтной атмосферы в рабочих зонах нефтяных шахт Ярегского нефтяного месторождения / Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: труды VI Международной конференции. — Екатеринбург: УГГУ, 2019. — С. 284–293.
11. Цхадая Н. Д., Жуйков А. Е., Ягубов З. Х. Критерий оценки оптимальных условий труда в горных выработках нефтяных шахт // Нефтегазовое дело. — 2012. — № 5. — С. 318–326.
12. Муминов Р. О., Райханова Г. Е., Кузиев Д. А. Повышение надежности и долговечности буровых станков за счет понижения динамических нагрузок // Уголь. — 2021. — № 5. — С. 32–36. DOI: 10.18796/0041-5790-2021- 5-32-36.
13. Гендлер С. Г., Фазылов И. Р. Оценка эффективности использования закрытой системы сбора нефти для нормализации микроклимата в эксплуатационных галереях нефтяных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 65–78. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_94.
14. Рудаков М. Л., Коробицына М. А. О возможности нормализации температуры воздуха в буровых галереях нефтяных шахт // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 8. — С. 66–71.
15. Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Шалимов А. В. Проектирование систем кондиционирования воздуха для нефтяных шахт Ярегского месторождения // Горное эхо. — 2012. — № 1(47). — С. 22–23.
16. Николаев А. В. Способ проветривания уклонных блоков нефтешахт, повышающий энергоэффективность подземной добычи нефти // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 11. — С. 133–136.

17. Nikolaev A. V., Klishin V. I. Use of natural draught for improvement of airing efficiency in the oil mine production unit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 823, no. 1, article 012047. DOI: 10.1088/1755-1315/823/1/012047.
18. Jianwei Cheng, Yan Wu, Haiming Xu, Jin Liu, Yekang Yang, Huangjun Deng, Yi Wang Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model // Tunneling and Underground Space Technology. 2015, vol. 45, pp. 166 – 180. DOI: 10.1016/j.tust.2014.09.004.
19. Файнбург Г. З. Цифровизация процессов проветривания калийных рудников: Монография. — Пермь-Екатеринбург, 2020. — 422 с.
20. Yu Xu, Zijun Li, Huasen Liu, Mintao Jia, Qiaoli Wang, Mengsheng Zhang, Yuanyuan Xu Modeling of the dynamic behaviors of heat transfer during the construction of roadway using moving mesh // Case Studies in Thermal Engineering. 2021, vol. 26, article 100958. DOI: 10.1016/j.csite.2021.100958.
21. Ding C., He X., Nie B. Numerical simulation of airflow distribution in mine tunnels // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 663 – 667. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.017.
22. Wang Z., Ren T., Ma L., Zhang J. Investigations of ventilation airflow characteristics on a longwall face – a computational approach // Energies. 2018, vol. 11, no. 6, article 1564. DOI: 10.3390/en11061564.
23. Krawczyk J. A preliminary study on selected methods of modeling the effect of shearer operation on methane propagation and ventilation at longwalls // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, vol. 30, no. 5, pp. 675 – 682. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.04.007.
24. Павленко М. В., Хайдина М. П., Кузиев Д. А., Пихторинский Д., Муратов А. З. Факторы воздействия комбайна при добыче угля на увеличение метаноотдачи массива в рабочее пространство лавы // Уголь. — 2019. — № 4. — С. 8 – 11. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11.
25. Sasmito A. P., Birgersson E., Ly H. C., Mujumdar A. S. Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment. A computational fluid dynamic study // Tunneling and Underground Space Technology. 2013, vol. 34, pp. 82 – 95. DOI: 10.1016/j.tust.2012.09.006.
26. Jianwei Cheng, Siyuan Li, Fuxi Zhang, Changchun Zhao, Shengqiang Yang, Apurna Ghosh CFD modelling of ventilation optimization for improving mine safety in longwall working faces // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016, vol. 40, pp. 285 – 297. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.004.
27. Каледина Н. О., Кобылкин С. С. Системное проектирование вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № S1. — С. 282 – 293.
28. Guang Xu, Kray D. Luxbacher, Saad Ragab, Jialin Xu, Xuhan Ding Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017, vol. 31, no. 4, pp. 251 – 275.
29. Brodny J., Tutak M. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining. A systematic literature review // Process Safety and Environmental Protection. 2021, vol. 151, no. 1, pp. 373 – 400. DOI: 10.1016/j.psep.2021.05.029.
30. Мохирев Н. Н., Радько В. В. Инженерные расчеты вентиляции шахт // Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. — М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. — 324 с.
31. Aitao Z., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation // Journal of Mining Science. 2018, vol. 54, no. 12, pp. 111 – 119.
32. Krainov A. V., Pashkov E. N., Ponomaryov A. V. Conjugate heat transfer in the interaction of the viscous liquid with technological elements of energy systems in conditions of their internal contour moving // Advanced Materials Research. 2014, vol. 1040, pp. 876 – 880.
33. Nikolaev A. V., Alymenko N. I., Kamenskih A. A., Nikolaev V. A. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts // E3S Web of Conferences. 2017, vol. 15, article 02004. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502004.

34. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020, article 9111995. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995.
35. Gendler S. G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface // Eurasian Mining. 2016, no. 2, pp. 41 – 44.
36. Menter F. R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective // International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2009, vol. 23, no. 4, pp. 305 – 316.
37. Versteeg H., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method, 2nd edition. Prentice Hall, 2007. 520 p. 

REFERENCES

1. Konoplev Yu. P., Buslaev V. F., Yagubov Z. Kh., Tskhadaya N. D. *Termoshakhtnaya razrabotka neftnyanykh mestorozhdeniy* [Thermal mine development of oil fields], Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2006, 288 p.
2. Chertenkov M. V., Mulyak V. V., Konoplev Y. P. The Yarega heavy oil field – history, experience, and future. *Journal of Petroleum Technology*. 2012, vol. 64, no. 4, pp. 158 – 160. DOI: 10.2118/0412-0153-JPT.
3. Tyun'kin B. A., Konoplev Yu. P. *Opyt podzemnoy razrabotki neftnyanykh mestorozhdeniy i osnovnye napravleniya razvitiya termoshakhtnogo sposoba dobychi nefi* [Experience of underground development of oil fields and the main directions of development of the thermal mining method of oil production], Ukhta, PechorNIPIneft', 1996, 160 p.
4. Fomin A. I., Grunskoy T. V. Improving the working conditions of oil miners during the transition from the thermal pit method of extracting high-viscosity oil to the modular pit method of developing the Yaregskoye field. *Occupational Safety in Industry*. 2020, no. 12, pp. 58 – 65. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-58-65.
5. Afanasjeva I. V., Fathutdinov R. I. Improving procedures of training employees by implementing guidance cards safe methods and techniques of work. *Machines. Technologies. Materials*. 2016, vol. 10, no. 10, pp. 10 – 12.
6. Klimova I. V. Instructional maps of safe methods and labor practices for certain types of work carried out in the oil mine. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 225, pp. 354 – 359. [In Russ].
7. Boyko V. A., Boyko A. B. Method for accelerated formation of a heat-equalizing jacket in a mine working in a deep mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2004, no. 10, pp. 86 – 90. [In Russ].
8. Martynov A. A., Yakovenko A. K., Korol V. I. On the issue of reducing the risk of thermal injuries of miners in the workings of deep mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2004, no. 5, pp. 268 – 271. [In Russ].
9. Konoplev Yu. P., Gulyaev V. E. Implementation of new methods of thermal mining at the Yaregskoye high-viscosity oil field. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2011, no. 2, pp. 89 – 91. [In Russ].
10. Kruglov Yu. V. Methods for combating elevated temperatures of the mine atmosphere in the working areas of oil mines of the Yaregskoye oil field. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya kompleksov podzemnykh sooruzheniy: trudy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Design, construction and operation of underground facilities complexes: Proceedings of the VI International Conference], Ekaterinburg, UGGU, 2019, pp. 284 – 293. [In Russ].
11. Tskhadaya N. D., Zhuykov A. E., Yagubov Z. Kh. Criteria for assessing optimal working conditions in the mine workings of oil mines. *Neftegazovoe delo*. 2012, no. 5, pp. 318 – 326. [In Russ].
12. Muminov R. O., Rayhanova G. E., Kuziev D. A. Experimental research and analysis of a quarry drilling rig. *Ugol'*. 2021, no. 5, pp. 32 – 36. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-32-36.
13. Gendler S. G., Fazylov I. R. Application efficiency of closed gathering system toward microclimate normalization in operating galleries in oil mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 65 – 78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_95.

14. Rudakov M. L., Korobitsyna M. A. On the possibility of normalizing the air temperature in the drilling galleries of oil mines. *Occupational Safety in Industry*. 2019, no. 8, pp. 66 – 71. [In Russ].
15. Kazakov B. P., Levin L. Yu., Shalimov A. V. Design of air conditioning systems for oil mines of the Yaregskoye field. *Gornoe ekho*. 2012, no. 1(47), pp. 22 – 23. [In Russ].
16. Nikolaev A. V. A method for ventilating sloping blocks of oil mines, which increases the energy efficiency of underground oil production. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2016, no. 11, pp. 133 – 136. [In Russ].
17. Nikolaev A. V., Klishin V. I. Use of natural draught for improvement of airing efficiency in the oil mine production unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 823, no. 1, article 012047. DOI: 10.1088/1755-1315/823/1/012047.
18. Jianwei Cheng, Yan Wu, Haiming Xu, Jin Liu, Yekang Yang, Huangjun Deng, Yi Wang Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 45, pp. 166 – 180. DOI: 10.1016/j.tust.2014.09.004.
19. Faynburg G. Z. *Tsifrovizatsiya protsessov provetrivaniya kaliynnykh rudnikov: Monografiya* [Digitization of ventilation processes in potash mines], Perm-Ekaterinburg, 2020, 422 p.
20. Yu Xu, Zijun Li, Huasen Liu, Mintao Jia, Qiaoli Wang, Mengsheng Zhang, Yuanyuan Xu Modeling of the dynamic behaviors of heat transfer during the construction of roadway using moving mesh. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021, vol. 26, article 100958. DOI: 10.1016/j.csite.2021.100958.
21. Ding C., He X., Nie B. Numerical simulation of airflow distribution in mine tunnels. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 663 – 667. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.017.
22. Wang Z., Ren T., Ma L., Zhang J. Investigations of ventilation airflow characteristics on a longwall face – a computational approach. *Energies*. 2018, vol. 11, no. 6, article 1564. DOI: 10.3390/en11061564.
23. Krawczyk J. A preliminary study on selected methods of modeling the effect of shearer operation on methane propagation and ventilation at longwalls. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 5, pp. 675 – 682. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.04.007.
24. Pavlenko M. V., Khaidina M. P., Kuziev D. A., Pihtorinskiy D., Muratov A. Z. Impacts of the combine harvester in the production of coal to increase methane recovery array in the work-space lava. *Ugol'*. 2019, no. 4, pp. 8 – 11. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11.
25. Sasmito A. P., Birgersson E., Ly H. C., Mujumdar A. S. 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. DOI: 10.1016/j.tust.2012.09.006.
26. Jianwei Cheng, Siyuan Li, Fuxi Zhang, Changchun Zhao, Shengqiang Yang, Apurna Ghosh CFD modelling of ventilation optimization for improving mine safety in longwall working faces. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016, vol. 40, pp. 285 – 297. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.004.
27. Kaledina N. O., Kobylkin S. S. System design of mine ventilation based on volumetric modeling of aerodynamic systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. S1, pp. 282 – 293. [In Russ].
28. Guang Xu, Kray D. Luxbacher, Saad Ragab, Jialin Xu, Xuhan Ding Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2017, vol. 31, no. 4, pp. 251 – 275.
29. Brodny J., Tutak M. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining. A systematic literature review. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021, vol. 151, no. 1, pp. 373 – 400. DOI: 10.1016/j.psep.2021.05.029.
30. Mokhirev N. N., Rad'ko V. V. *Inzhenernye raschety ventilyatsii shakht. Stroitel'stvo. Rekonstruktsiya. Ekspluatatsiya* [Engineering calculations of mine ventilation. Building. Reconstruction. Exploitation], Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2007, 324 p.
31. Aitao Z., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation. *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 54, no. 12, pp. 111 – 119.

32. Krainov A. V., Pashkov E. N., Ponomaryov A. V. Conjugate heat transfer in the interaction of the viscous liquid with technological elements of energy systems in conditions of their internal contour moving. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1040, pp. 876 – 880.

33. Nikolaev A. V., Alymenko N. I., Kamenskih A. A., Nikolaev V. A. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts. *E3S Web of Conferences*. 2017, vol. 15, article 02004. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502004.

34. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020, article 9111995. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995.

35. Gendler S. G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface. *Eurasian Mining*. 2016, no. 2, pp. 41 – 44.

36. Menter F. R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2009, vol. 23, no. 4, pp. 305 – 316.

37. Versteeg H., Malalasekera W. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*, 2nd edition. Prentice Hall, 2007. 520 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николаев Александр Викторович¹ — д-р техн. наук,
доцент, e-mail: nikolaev0811@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4601-5780,

Максимов Петр Викторович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: pvmperm@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3617-5617,

Файнбург Григорий Захарович¹ — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: faynburg@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8004-1969,

Конотоп Данил Алексеевич¹ — аспирант,

e-mail: konotopda@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-8004-1969,

¹ Пермский национальный исследовательский
политехнический университет.

Для контактов: Николаев А.В., e-mail: nikolaev0811@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A. V. Nikolaev¹, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: nikolaev0811@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4601-5780,

P. V. Maksimov¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: pvmperm@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3617-5617,

G. Z. Fajnburg¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: faynburg@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8004-1969,

D. A. Konotop¹, Graduate Student,

e-mail: konotopda@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-8004-1969,

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russia.

Corresponding author: A. V. Nikolaev, e-mail: nikolaev0811@mail.ru.

Получена редакцией 28.01.2022; получена после рецензии 13.02.2023; принята к печати 10.03.2023.

Received by the editors 28.01.2022; received after the review 13.02.2023; accepted for printing 10.03.2023.