

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.42, 535.54

DOI:10.7242/echo.2022.1.19

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КАРЬЕРАХ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ПРОВЕТРИВАНИИ

С.А. Бублик, М.А. Семин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Проводится анализ существующих подходов к математическому моделированию тепло- и воздухораспределения в карьерах. Представлены как наиболее ранние работы, так и современные исследования с применением CFD моделирования. Помимо анализа существующих исследований представлена собственная постановка задачи о естественном проветривании карьера глубиной 1000 м в инженерном программном комплексе ANSYS Fluent. Задача рассматривается в двумерной и нестационарной постановке с учетом естественной конвекции и турбулентного движения воздуха. Не учитывается теплообмен с горным массивом и влияние солнечной радиации. Представлены результаты для трех случаев проветривания: температура окружающего воздуха выше температуры воздуха в карьере; температура окружающего воздуха ниже температуры воздуха в карьере; полное тепловое равновесие.

Ключевые слова: карьеры, проветривание карьеров, естественное проветривание, численное моделирование, тепло- и массоперенос, метод конечных объемов.

Введение

Неизменно растущий спрос на добычу полезных ископаемых приводит к тому, что горнодобывающие предприятия должны постоянно наращивать свои производственные мощности. Для этого при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом возникает потребность в увеличении глубины карьеров.

С увеличением глубины карьеров острее встает вопрос их проветривания. Одним из основных способов проветривания карьеров является проветривание за счет естественного воздухообмена карьерного воздуха с воздухом внешней среды (естественное проветривание) [1-3]. В этом случае основными факторами, влияющими на проветривание карьеров, являются рельеф, метеорологические условия и радиационный режим района расположения карьера [4].

Увеличение глубины карьера приводит к снижению ветровой активности и уменьшению притока солнечной радиации к нижним уступам. Оба этих фактора приводят к снижению воздухообмена с внешней средой и создают условия для формирования температурной инверсии [4]. Температурная инверсия возникает при отрицательном значении вертикального температурного градиента на поверхности бортов карьеров. В этом случае более холодные поверхности бортов охлаждают прилегающий воздух, который начинает опускаться ко дну карьера, вытесняя из него теплый воздух. Это приводит к образованию и застою у дна карьера более холодных слоев над менее холодными и вследствие этого установлению температурной инверсии [1, 2, 4].

Возникновение температурной инверсии может приводить к накоплению вредных примесей у дна карьера вследствие их переноса с бортов карьера вместе с опускающимися холодными слоями воздуха. Кроме того, наличие температурной инверсии приводит к образованию локальных рециркуляционных или застойных зон, из которых вредные примеси не выносятся на поверхность.

В связи с тем, что метеорологические и тепловые факторы могут оказывать существенное влияние на проветривание карьеров, необходимо проводить количественную оценку значимости данных факторов на формирование аэрологической и температурной обстановки в карьерах. В этой работе проводится анализ существующих подходов к моделированию температурного режима и массопереносу воздушных масс внутри карьеров. Помимо анализа существующих подходов, в данной работе авторы приводят собственную постановку модели тепло- и воздухораспределения внутри карьера в инженерном программном комплексе ANSYS.

Анализ существующих подходов моделирования тепло- и воздухораспределения внутри карьеров

К наиболее ранним исследованиям вопроса численного моделирования процессов проветривания карьеров можно отнести работы [5-7] 1980-х годов за авторством Бакланова А.А. В данных работах рассматриваются как двухмерные, так и трехмерные модели воздухораспределения. Для расчета тепло- и массопереноса решаются классические уравнения гидро- и термодинамики с использованием метода конечных разностей, метода расщепления по физическим процессам и метода фиктивных областей. Турбулентные течения моделируются с использованием моделей Прандтля и Смагоринского. Позднее в работе [8] на основе работ [5, 6] и других авторов проводится двумерное моделирование естественной конвекции с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности и решением уравнений с помощью метода контрольных объемов.

В дальнейшем вместе с развитием вычислительной техники и CFD моделирования усложняются и уточняются математические модели проветривания карьеров. Особый интерес появляется к использованию инженерных программных продуктов для численного моделирования (ANSYS, COMSOL и т.д.). Это подтолкнуло исследователей рассматривать более сложные условия и процессы, возникающие при моделировании проветривания карьеров.

В работе [9] авторы с помощью программы COMSOL рассчитывают в двумерном случае скоростные поля и процессы конвективно-диффузионного переноса вредных примесей в карьерах глубиной до 600 м и моделируют возможность нормализации атмосферы с помощью вентиляционных восстающих.

В работах [10-12] при помощи CFD моделирования проводится исследование условий формирования температурных инверсий и их влияние на проветривание в трехмерном случае.

Автор работы [13] рассматривал для двумерного случая возможность проветривания пылегазового облака при его различном расположении и скорости ветра.

С помощью программного комплекса ANSYS Fluent авторы работы [14] исследовали влияния рельефа местности на проветривание карьера, спроектировав детальную трехмерную геометрию карьера и ближайший к нему рельеф местности.

Помимо CFD моделирования можно найти также попытки анализа проветривания с помощью аналитических подходов. Например, в работе [15] автор с помощью метода интегральных соотношений Кармана разработал метод расчета проветривания карьеров по рециркуляционной схеме с учетом глубины и ширины дна карьера, углов наклона бортов и их конфигурации.

Проведя анализ отмеченных выше работ по математическому моделированию проветривания карьеров, можно отметить следующую общую проблему: несмотря на то, что имеющиеся готовые инженерные программные продукты позволяют проводить комплексное численное моделирование, учитывающее большое многообразие физиче-

ских процессов, исследователи стараются сосредоточиться лишь на некоторой ограниченной части. Например, исследовать влияние температурных инверсий на проветривание, но не рассматривать задачу с переносом примесей, рассматривать формирование ветрового режима только в изотермическом случае или моделировать геометрию карьера в очень упрощенном виде. Это можно связать с ограничением вычислительных мощностей, либо со сложностью в численной сходимости при учете множества физических процессов одновременно. Также немалую роль может играть отсутствие исходных данных.

Стоит также отметить, что большинство работ по моделированию карьеров не рассматривают в явном виде влияние солнечной радиации, теплообмен воздуха с горным массивом и карьеры глубиной 1000 м и более.

Постановка задачи тепло- и воздухораспределения при естественном проветривании карьеров

На основе проведенного анализа существующих исследований по проветриванию карьеров, авторами данной работы проведено численное моделирование карьера глубиной 1000 м в инженерном программном комплексе ANSYS Fluent.

Геометрически модель представляет собой двумерную область (см. рис. 1). Размеры расчетной области окружающей среды вокруг карьера подбирались таким образом, чтобы исключить влияние граничных условий на рассчитываемые параметры внутри карьера.

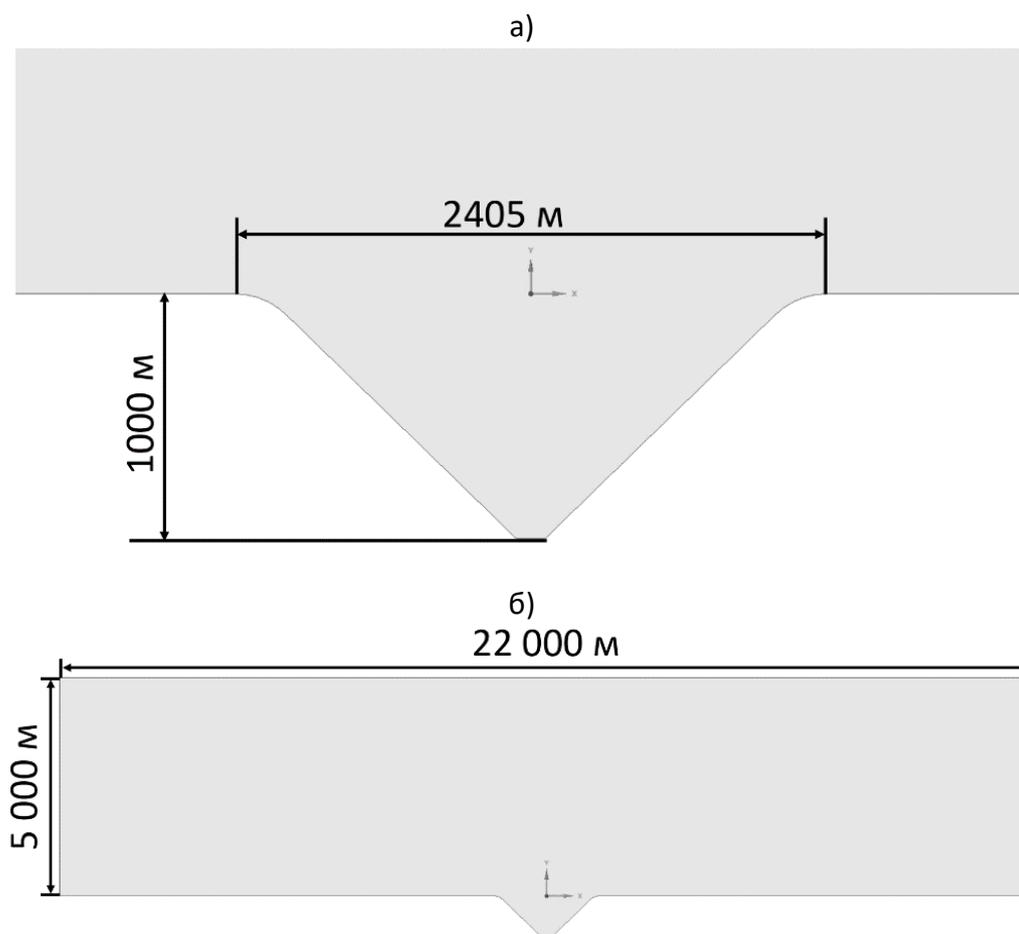


Рис. 1. Геометрия расчетной области:
а) параметры карьера; б) параметры окружающей среды вокруг карьера

Задача решалась в нестационарной и неизотермической постановках. Рассматривались только тепло- и воздухораспределение без учета переноса вредных примесей в карьере. Граничные условия представлены на рис. 2. Данные условия можно интерпретировать следующим образом: в расчетную область с левой границы поступает воздух со скоростью V_a и температурой T_a окружающей среды вне карьера. На нижней границе (почве) задается граничное условие типа «непроницаемой стенки» (нулевая величина скорости) и отсутствие теплового потока. На верхней границе задается условие симметрии. На правой границе задается граничное условие типа «выход», в рамках которого градиенты всех переменных величин по нормали к поверхности считаются нулевыми, фиксируется определенное статическое давление. При проведении расчетов не учитывается теплообмен воздуха в карьере с горным массивом.

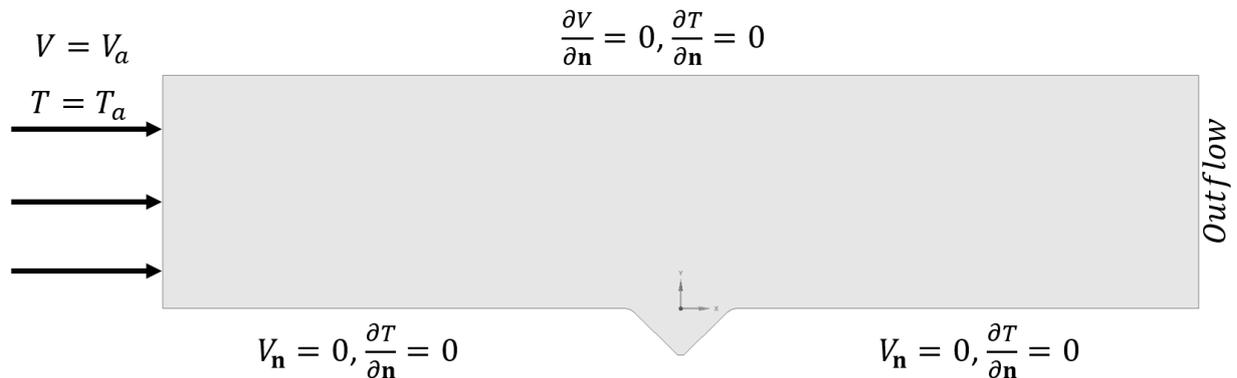


Рис. 2. Граничные условия

В качестве модели турбулентности используется $k-\varepsilon$ модель [16]. Для моделирования естественной конвекции используется модель Буссинеска [17].

Численные значения физических величин, начальных и граничных условий указано в табл. 1.

Таблица 1

Физические величины и начальные условия

Параметр	Размерность	Значение
Физические величины		
Плотность воздуха (при отсутствии конвекции)	кг/м ³	1,3
Теплоемкость воздуха	Дж / (кг · °С)	1006,4
Теплопроводность воздуха	Вт / (м · °С)	0,024
Динамическая вязкость воздуха	Па · с	0,000018
Коэффициент линейного расширения воздуха	1 / °С	0,0035
Начальные и граничные условия		
Начальная температура воздуха окружающей среды	°С	10 (случай 1)
Температура окружающего воздуха на границе T_a		-10 (случай 2)
		5 (случай 3)
Начальная температура воздуха в карьере		5
Скорость окружающего воздуха V_a	м/с	2

При решении задачи рассматривалось три случая: 1) температура окружающего воздуха выше температуры воздуха в карьере; 2) температура окружающего воздуха ниже температуры воздуха в карьере; 3) полное тепловое равновесие.

Результаты расчета тепло- и воздухораспределения при естественном проветривании карьера

Нестационарный расчет проводился для 8 часов расчетного времени. На рис. 3-5 представлены результаты трех вариантов расчета при различной температуре окружающего воздуха для конечного момента расчетного времени.

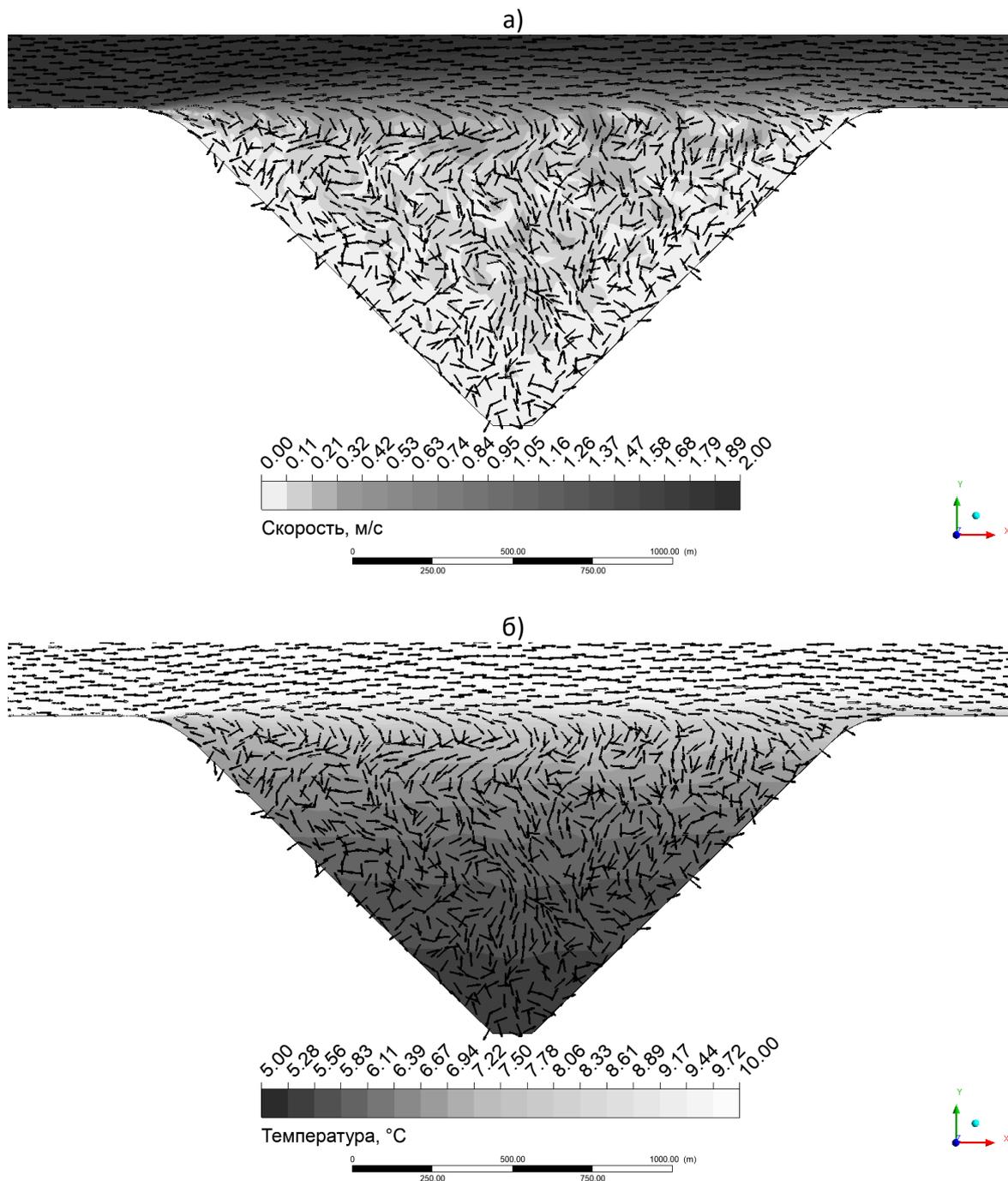


Рис. 3. Поле скорости (а) и температуры (б) при температуре окружающего воздуха выше температуры воздуха в карьере

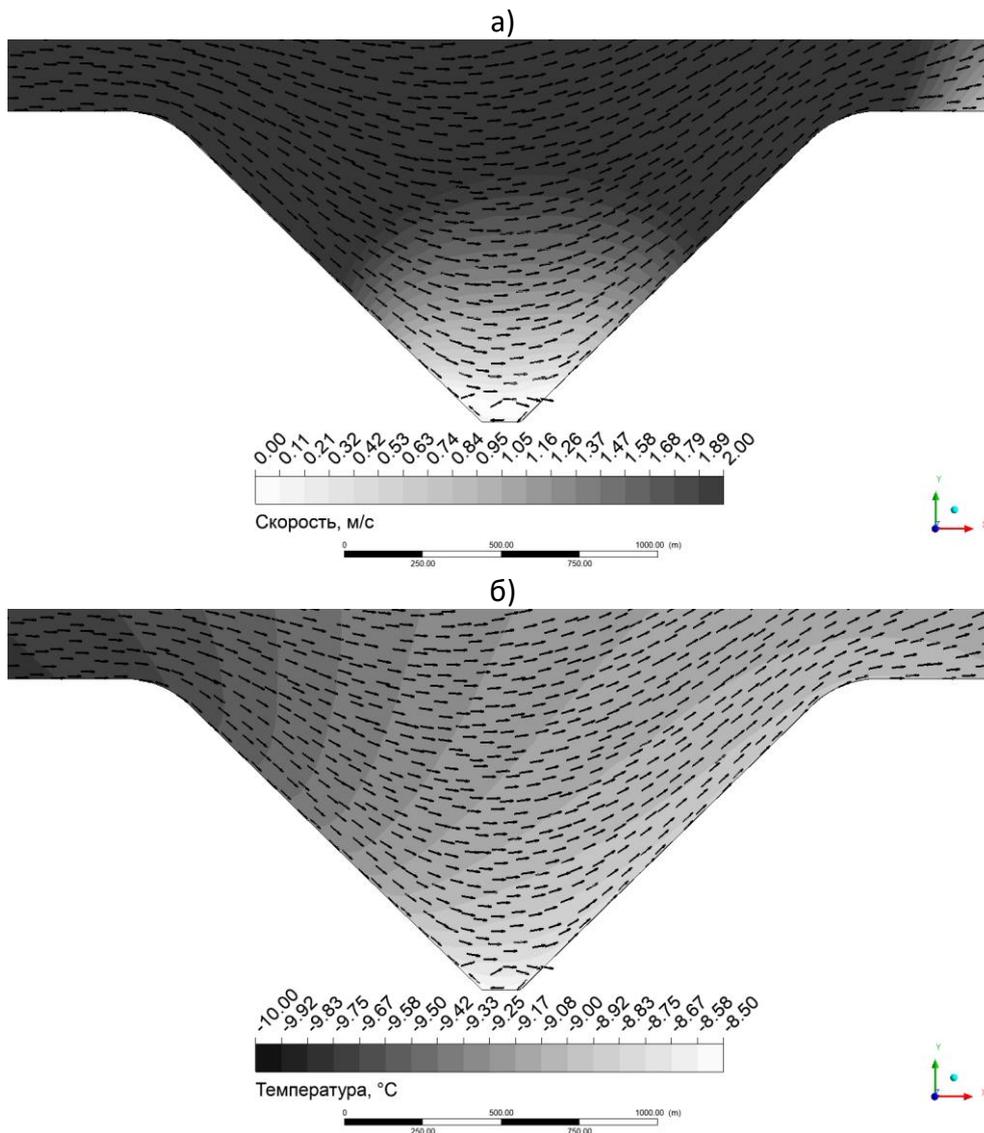


Рис. 4. Поле скорости (а) и температуры (б) при температуре окружающего воздуха ниже температуры воздуха в карьере

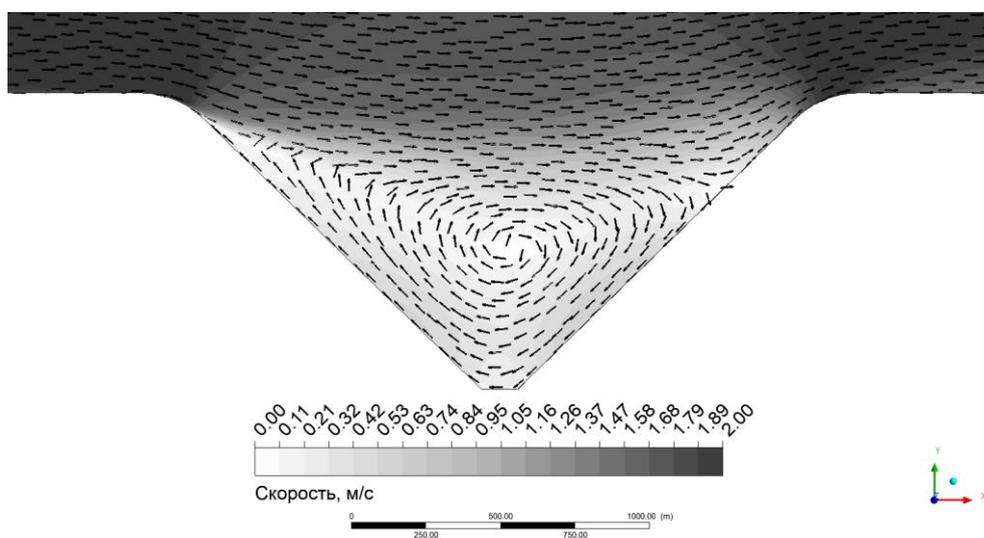


Рис. 5. Поле скорости при полном тепловом равновесии

При анализе рис. 3 установлено, что при температуре окружающего воздуха выше температуры воздуха в карьере не наблюдается проветривания за счет ветровой энергии, поскольку скорость воздуха в карьере практически нулевая. Это происходит из-за того, что холодный воздух в карьере не позволяет поступать в карьер менее теплым слоям окружающего воздуха и, соответственно, окружающий воздух протекает лишь у поверхности карьера. Однако в силу теплопроводности температура окружающего воздуха и воздуха в карьере постепенно уравниваются (см. рис. 3б), и когда они уравниваются, то устанавливается воздухораспределение, аналогичное рис. 5.

Если температура окружающего воздуха ниже температуры воздуха в карьере (рис. 4), то можно наблюдать интенсивное замещение теплых слоев воздуха в карьере холодными слоями окружающего воздуха. Это, в отличие от ситуации на рис. 4, приводит к активному выносу карьерного воздуха на поверхность за счет ветровой энергии. Таким образом, данная ситуация при отсутствии других тепловых факторов оказывается наиболее благоприятной для проветривания карьера естественным способом. Также стоит отметить, что при уравнивании со временем температуры окружающего воздуха и воздуха в карьере мы также приходим к ситуации на рис. 5.

Ситуация на рис. 5 представляется наиболее идеализированной в том плане, что в ней рассматривается случай полного теплового равновесия. В этом случае можно наблюдать в карьере образование единого устойчивого рециркуляционного вихря. Возникновение такой ситуации может приводить лишь к частичному выносу вредных веществ из карьера, часть из них может продолжать циркулировать по всему карьере в течение длительного промежутка времени.

Выводы

Проведен анализ существующих моделей тепло- и воздухораспределения в карьерах. Рассмотрены как модели прошлого века, так и более современные, использующие достижения CFD моделирования. Отмечены общие недостатки рассмотренных моделей.

Приведена собственная постановка задачи тепло- и воздухораспределения в инженерном программном комплексе ANSYS Fluent. Проведен анализ ситуаций, когда температура окружающего воздуха может быть выше или ниже температуры в карьере, а также ситуации при полном тепловом равновесии. По рассмотренным случаям сложно в целом делать выводы об эффективности проветривания в зависимости от разницы температур окружающего и карьерного воздуха, т.к. представленная модель имеет довольно упрощенную постановку и не учитывает влияния многих тепловых факторов (теплообмен с горным массивом, явное влияние солнечное радиации, сезонные колебания температуры окружающего воздуха и т.д.). Ввиду этого полученных результатов пока недостаточно для количественной оценки длительности проветривания карьера в условиях неблагоприятных климатических ситуаций.

Представленная модель является первым шагом в исследовании формирования теплового режима и воздухораспределения в глубоких карьерах. В дальнейшем планируется доработка модели путем учета дополнительных тепловых факторов, явного переноса вредных примесей, рельефа местности и реальных геометрий карьеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000396-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимофеева Ю.В., Суксова С.А., Долган А.А., Попов Е.В. Способы проветривания карьеров // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 6. – С. 58.
2. Морин А.С., Борисов Ф.И., Корзухин И.В., Борисов Д.Ф. О тепловой подготовке приточного воздуха и применении двухканальных воздухопроводов при трубопроводном проветривании карьеров // Горная промышленность. – 2016. – №. 1 (125). – С. 40-46.
3. Иванов И.И. Геотермический режим и естественный воздухообмен карьеров – М.: Недра. – 1982. – 173 с.: ил.
4. Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф., Павлов А.И. Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2010. – 439 с.: ил.
5. Бакланов А.А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. – Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1988. – 197 с.: ил.
6. Бакланов А.А. Определение распространения примесей в атмосфере карьера на основе математического моделирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1984. – №. 5. – С. 73-79.
7. Алоян А.Е., Бакланов А.А., Пененко В.В. Применение метода фиктивных областей в задачах численного моделирования вентиляции карьеров // Метеорология и гидрология. – 1982. – №. 7. — С. 42-49.
8. Fomin A.A. Modeling of natural convection in an open pit // Fluid Dynamics. – 1996. – V. 31. – №. 4. – P. 490-496. – DOI: 10.1007/BF02031753.
9. Козырев С.А., Амосов П.В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17, №. 2. – С. 231-237.
10. Tukkaraja P., Keerthipati M., French A. Simulating temperature inversions in surface mines using computational fluid dynamics // Proceedings of the South Dakota Academy of Science. – 2016. – V. 95. – P. 119-124.
11. Raj K.V., Fochesatto G.J., Bandopadhyay S. Air Temperature Inversions and its Impact on Natural Ventilation in Open pit Mines // Proceedings of the 15th North American Mine Ventilation Symposium. – Virginia, 2015. – P. 269-279.
12. Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2021. – №. 4. – С. 59-75. – DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75.
13. Amosov P.V. Numerical modeling of open pit ventilation when varying the location of the dust and gas cloud // Изв. вузов. Горн. журн. – 2021. – №. 7. – С. 5-15.
14. Козырев С.А., Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Амосов П.В., Массан В.В. 3D компьютерное моделирование характера распределения воздушных потоков на поверхности и в карьерном пространстве глубоких карьеров с учетом реального рельефа местности и масштаба карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. S56. – С. 399-403.
15. Versteeg H.K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. – 2nd ed. – Harlow, England; New York: Pearson education Ltd, 2007. – 520 p.
16. Grandi D., Passerini A. On the Oberbeck–Boussinesq approximation for gases // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2021. — V. 134. – Номер статьи 103738.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2022.1.20

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ВСАСЫВАЮЩЕГО СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ

А.Г. Исаевич

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе описываются проблемы высокой запыленности атмосферы калийных рудников. Обосновывается неэффективность применения нагнетательного способа проветривания тупикового забоя для нормализации пылевой обстановки. Приводятся результаты численного эксперимента, показывающие, что всасывающий способ проветривания позволяет эффективно локализовать пылевое облако у груди забоя и тем самым снизить концентрацию пыли в локальной области кабины машиниста комбайна.