

УДК 622.4

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРО- И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ОРГАНИЗАЦИИ СКВОЗНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ РУДНИКА

Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин, Е.В. Накаряков

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

STUDY OF AERO- AND THERMODYNAMIC PROCESSES OCCURRING ON THE FIRST STAGE OF THE CROSS-VENTILATION CREATION IN MINE

L.Iu. Levin, M.A. Semin, Iu.A. Kliukin, E.V. Nakariakov

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya str., Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 10.06.2016. Принята / Accepted: 27.10.2016. Опубликовано / Published: 02.12.2016

Ключевые слова:

строительство рудника, межстволовая сбойка, рудничная вентиляция, законы Кирхгофа, проходческий вентилятор, естественная тяга, математическая модель, переходные процессы, инерционность воздуха, устойчивость воздухораспределения, конвективное расслоение, численное моделирование, модель идеального вытеснения, диффузия, модель турбулентности.

Представлено исследование переходных процессов, возникающих в вентиляционной сети рудника Усольского калийного комбината, на этапе строительства околоствольного двора после завершения проходки межстволовой сбойки в холодный период года. Определены параметры аэро- и термодинамических процессов, оказывающих влияние на организацию сквозной струи при строительстве рудника с центральной схемой проветривания. В рамках одномерной постановки на базе законов Кирхгофа построена математическая модель течения воздуха с учетом переменного во времени влияния естественной тяги, в которой учтена инерционность воздуха. Проведено сопоставление данных, полученных в одномерной постановке, с результатами численного трехмерного моделирования течения воздуха с различными термодинамическими параметрами в программном комплексе ANSYS. Численный расчет произведен в рамках модели совершенного газа, *k-ε*-модели турбулентности с пристеночными функциями, имеющими дополнительное слагаемое для учета шероховатости стенок. В результате сравнительного анализа выявлено соответствие решения задачи в одномерной постановке и трехмерного численного моделирования для начального промежутка времени и после установления стационарного воздухораспределения. Во временном промежутке, характеризующемся переходом от пиковых расходов воздуха к их стационарным значениям, наблюдается существенное рассогласование исследуемых величин во времени. Прогнозирование времени протекания переходных процессов в вентиляционной сети рудника после завершения проходки межстволовой сбойки необходимо осуществлять на основе расчетов, выполненных с использованием методов вычислительной динамики жидкости и газа. Расчет пиковых и стационарных значений параметров аэро- и термодинамических процессов для разработки технических решений по организации проектной схемы проветривания можно осуществлять в рамках одномерной постановки.

Keywords:

mine construction, cross slit between shafts, mine ventilation, Kirchhoff's laws, tunneling fan, natural draft, mathematical model, transient processes, air inertia, air distribution stability, convective separation, numerical simulation, ideal displacement model, diffusion, turbulence model.

This article presents the study of transient processes occurring in the mine ventilation network of Usolskii potash plant during pit bottom's construction after completion of sinking cross slit between shafts in the cold season. Parameters of aero- and thermodynamic processes that influence the organization of through stream in the construction of the mine with the central ventilation scheme are determined. Within the one-dimensional formulation based on Kirchhoff's laws a mathematical model of air flow based on time-varying effect of natural draft was constructed taking into account the inertia of the air. A comparison of data obtained in the one-dimensional formulation was conducted with the results of numerical modeling of three-dimensional air flow with different thermodynamic parameters in complex software ANSYS. The numerical calculation was made using the model of a perfect gas, *k-ε*-turbulence model with wall functions which had an additional term to account for the roughness of the walls. The comparative analysis showed solutions compliance in one-dimensional formulation and three-dimensional numerical simulation for an initial period of time and after the establishment of stationary air distribution. In the period of time characterized by the transition from the peak airflow to its steady-state value, there is a significant mismatch of studied variables over time. Predicting the time of transient processes in mine ventilation system after sinking cross slit between shafts should be implemented on the base of calculations carried out using methods of computational fluid and gas dynamics. Calculation of peak values and stationary parameters of aero- and thermodynamic processes for development of technical solutions for the organization of ventilation's design schemes may be carried out in the framework of one-dimensional setting.

Левин Лев Юрьевич (Author ID in Scopus: 16407072500) – доктор технических наук, заведующий отделом аэрологии и теплофизики (тел.: +007 342 216 09 69, e-mail: aerolog_lev@mail.ru).

Семин Михаил Александрович – научный сотрудник, кандидат технических наук (тел.: +007 342 216 54 92, e-mail: mishkasemin@gmail.com). Контактное лицо для переписки.

Клюкин Юрий Андреевич – ведущий инженер (тел.: +007 342 216 54 92, e-mail: aeroyuri@gmail.com).

Накаряков Евгений Вадимович – инженер (тел.: +007 342 216 54 92, e-mail: nakariakov.ev@gmail.com).

Lev Iu. Levin (Author ID in Scopus: 16407072500) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Aerology and Thermal Physics (tel.: +007 342 216 09 69, e-mail: aerolog_lev@mail.ru).

Mikhail A. Semin – Researcher, PhD of Technical Sciences (tel.: +007 342 216 54 92, e-mail: mishkasemin@gmail.com). The contact person for correspondence.

Iurii A. Klukin – Leading Design Engineer (tel.: +007 342 216 54 92, e-mail: aeroyuri@gmail.com).

Evgenii V. Nakariakov – Engineer (tel.: +007 342 216 54 92, e-mail: nakariakov.ev@gmail.com).

Введение

Строительство и ввод производственных мощностей рудника Усольского калийного комбината осуществляется на Палашерском и части Балахонцевского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Вскрытие шахтного поля рудника на первом этапе осуществляется двумя стволами, расположенными в центре шахтного поля.

На первоначальном этапе строительства околоствольного двора происходит проходка межстволовой сбойки, обеспечивающей сквозное проветривание рудника за счет работы главной вентиляторной установки.

Согласно календарному графику ведения горных работ завершение проходки межстволовой сбойки приходится на период отрицательных температур наружного воздуха, когда атмосферные условия обуславливают существенное влияние естественной тяги на воздухораспределение [1]. При этом прогнозируемая естественная тяга будет направлена против движения воздуха, предусмотренного временной схемой проветривания рудника, и может оказать существенное негативное влияние на формирование устойчивого режима проветривания.

Проведенное исследование переходных процессов, возникающих в вентиляционной сети рудника непосредственно после проходки межстволовой сбойки в холодный период года, позволяет разработать технические решения по организации устойчивого режима проветривания на первоначальном этапе строительства околоствольного двора.

Постановка задачи

Рассматривается вентиляционная сеть рудника Усольского калийного комбината в период проходки межстволовой сбойки, схематично представленная на рис. 1.

Вентиляционная сеть состоит из скипового и клетевых стволов, межстволовой сбойки и металлического вентиляционного трубопровода, подающего свежий воздух с промплощадки клетевых стволов в межстволовую сбойку. Вентиляционный трубопровод имеет диаметр 900 мм. Расход воздуха обеспечивается проходческим вентилятором ВЦП-16М, установленным на промплощадке клетевых стволов. При построении модели принимается, что искусственное проветривание скипового ствола до проходки межстволовой сбойки отсутствует.

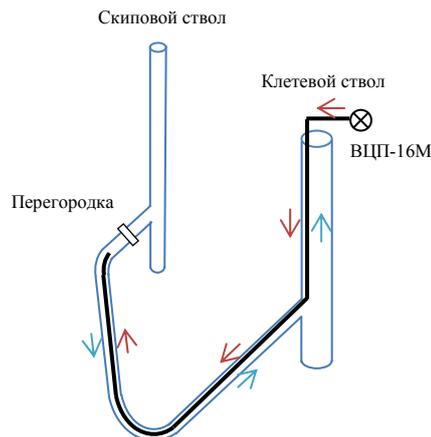


Рис. 1. Схема расчетной модели

В начальный момент времени удаляется перегородка, разделяющая транспортный штрек на два объема (см. рис. 1), что соответствует моменту завершения проходки межстволовой сбойки. Далее начинается взаимодействие воздушных масс во всем рассматриваемом объеме модели рудничной вентиляционной сети.

Анализируется наименее благоприятный случай – температура воздуха на поверхности равна температуре наиболее холодной пятидневки для данного региона по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» [2] и составляет $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Поскольку на момент проходки сбойки в скиповом стволе не ведутся работы и отсутствует искусственная вентиляция, температура воздуха в нем в начальный момент времени принята всюду равной температуре воздуха на поверхности. Выбор данного начального условия обосновывается отсутствием герметизации скипового ствола, что приводит к погружению более холодных воздушных масс с поверхности в ствол посредством механизма конвективного перемешивания [3]. Температура свежего воздуха, поступающего в рудник из вентиляционного трубопровода, принята равной $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расход воздуха, подаваемого в рудник по вентиляционному трубопроводу за счет работы проходческого вентилятора ВЦП-16М, составляет $21,3\text{ м}^3/\text{с}$.

Цель и структура исследования

Целью проведенного в работе исследования является определение аэро- и термодинамических параметров переходных процессов, протекающих в вентиляционной сети рудника после завершения проходки межстволовой сбойки.

Предметом исследования является влияние естественной тяги на формирование вентиляционного режима в руднике. Предполагается, что в наименее благоприятном случае после завершения проходки межстволовой сбойки в холодный период года естественная тяга будет являться определяющим фактором распределения воздушных потоков.

Исследование воздухораспределения в вентиляционной сети рудника выполнено в несколько этапов. На первом этапе проведен анализ переходных аэро- и термодинамических процессов в вентиляционной сети рудника в рамках одномерного подхода. На втором этапе выполнено численное трехмерное моделирование аэро- и термодинамических процессов, протекающих в руднике, с использованием средств программно-вычислительного комплекса ANSYS. На третьем этапе исследования выполнен сравнительный анализ результатов одномерного аналитического моделирования и трехмерного численного моделирования. Определены параметры протекающих аэрологических процессов, позволяющие выполнить разработку технических решений по организации схемы вентиляции рудника с учетом влияния естественной тяги, возникающей в холодный период года.

Математическая модель вентиляционной сети

В рамках одномерного подхода вентиляционная сеть рудника Усольского калийного комбината, изображенная на рис. 1, может быть представлена в виде графа [4], состоящего из трех ребер – вентиляционного трубопровода, скипового и клетевых стволов в объединении с межстволовой сбойкой (рис. 2).

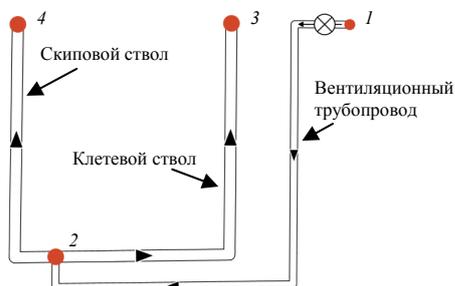


Рис. 2. Графовое представление вентиляционной сети рудника: 1–4 – вершины графа

Для данного графа вентиляционной сети записывается следующая система уравнений Кирхгофа 1-го и 2-го рода [5]:

$$R_b Q_b |Q_b| + R_k Q_k |Q_k| + \frac{\rho L_b}{S_b} \frac{\partial Q_b}{\partial t} + \left(\frac{\rho L_k}{S_k} + \frac{\rho L_{mc}}{S_{mc}} \right) \frac{\partial Q_k}{\partial t} = H, \quad (1)$$

$$R_b Q_b |Q_b| + R_c Q_c |Q_c| + \frac{\rho L_b}{S_b} \frac{\partial Q_b}{\partial t} + \frac{\rho L_c}{S_c} \frac{\partial Q_c}{\partial t} = H, \quad (2)$$

$$Q_c + Q_k = Q_b. \quad (3)$$

Здесь Q_b , Q_c , Q_k – расход воздуха в вентиляционном трубопроводе, скиповом и клетевом стволах соответственно, m^3/c ; R_b , R_c , R_k – аэродинамическое сопротивление трубопровода, скипового ствола, а также клетевых стволов и межстволовой сбойки, $H \cdot c^2/m^8$; L_b , L_c , L_k , – длина вентиляционного трубопровода, скипового и клетевых стволов, м; L_{mc} – длина межстволовой сбойки, м; S_b , S_c , S_k , S_{mc} – площадь поперечного сечения вентиляционного трубопровода, скипового и клетевых стволов, а также межстволовой сбойки, м; ρ – плотность воздуха, kg/m^3 ; H – напор вентилятора ВЦП-16М, Па.

Для записи уравнений Кирхгофа 2-го рода (1) и (2), формулируемых обычно относительно замкнутых контуров сети [3, 5–7], принимается, что вершины 1, 4 и 3 соединены ребрами с нулевыми сопротивлением и инерцией, моделирующими атмосферу [8].

Инерционные слагаемые в (1) и (2) введены на основании исследований [8, 9].

В начальный момент времени принимается

$$Q_c = 0, \quad (4)$$

$$Q_k = Q_b = 1277 \text{ м}^3/\text{мин} = 21,3 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5)$$

В систему (1)–(5) требуется также добавить влияние естественной тяги. В случае, когда величина естественной тяги H_e не превышает депрессию скипового ствола,

$$H_e = gh(\rho_c - \rho_k) < H - R_b Q_b^2, \quad (6)$$

после открытия межстволовой сбойки воздух, поступающий из вентиляционного трубопровода, начинает постепенно вытеснять холодный воздух в скиповом стволе, а естественная тяга в вентиляционном контуре, образованном скиповым и клетевыми стволами, уменьшается по закону

$$H_e(t) = gh(\rho_c - \rho_k) \left(1 - \frac{1}{L_c S_c} \int_0^t Q_c(\tau) d\tau \right). \quad (7)$$

Формула (7) получена в предположении действия механизма идеального вытеснения [10] и справедлива до момента времени t' , когда весь скиповый ствол наполнится теплым воздухом:

$$\frac{1}{L_c S_c} \int_0^{t'} Q_c(\tau) d\tau = 1. \quad (8)$$

Плотности воздуха ρ_c , ρ_k в (7) рассчитываются для момента времени $t = 0$ и не меняются в процессе счета. Изменение средней плотности воздуха $\rho_c(t)$ в скиповом стволе с ростом температуры и ее приближение к значению плотности воздуха ρ_k в клетевом стволе учитывается посредством множителя с интегралом: он равен единице в начальный момент времени, когда естественная тяга максимальна, и нулю по прошествии времени t' , когда в скиповом стволе теплый воздух полностью вытеснит холодный и естественная тяга будет равна нулю.

По прошествии времени t' температура воздуха всюду в вентиляционной сети рудника будет равна $+4$ °С, а модельная величина естественной тяги – нулю. Здесь не учитывается гидростатический нагрев воздуха при опускании с поверхности до межстволовой сбойки.

Если величина естественной тяги превышает депрессию скипового ствола, после открытия межстволовой сбойки скиповый ствол станет воздухоподающим, а естественная тяга до момента времени t^* , когда холодная струя поступит через межстволовую сбойку в клетевой ствол, будет постоянна и равна

$$H_e = gh(\rho_c - \rho_k). \quad (9)$$

Как и ранее, плотности воздуха ρ_c , ρ_k , ρ_b в (9) рассчитываются для момента времени $t = 0$ и не меняются в процессе счета. Естественная тяга (9) определена для вентиляционного контура, образованного скиповым и клетевым стволами.

Далее по прошествии времени t^* естественная тяга начнет уменьшаться по закону, аналогичному (7):

$$H_e = gh(\rho_c - \rho_k) + \frac{gh}{L_k S_k} \left(\rho_k - \frac{\rho_c Q_c + \rho_b Q_b}{Q_c + Q_b} \right) \int_{t^*}^t Q_k(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Формула (10) справедлива до момента времени t^{**} , когда весь клетевой ствол и межстволовая сбойка наполнятся холодным воздухом:

$$\frac{1}{L_k S_k} \int_{t^*}^{t^{**}} Q_k(\tau) d\tau = 1. \quad (11)$$

Температуры воздуха в скиповом и клетевом стволах будут в этом случае всегда различаться, так как холодный воздух, поступающий из скипового ствола, смешивается в межстволовой сбойке с теплым воздухом из вентиляционного става, далее смешавшаяся воздушная струя поступает в клетевой ствол. Поэтому в момент времени t^{**} , когда весь клетевой ствол и межстволовая сбойка наполнятся холодным воздухом, величина естественной тяги станет равной

$$H_e = gh \left(\rho_c - \frac{\rho_c Q_c + \rho_b Q_b}{Q_c + Q_b} \right). \quad (12)$$

Естественная тяга, рассчитанная для вентиляционного контура, образованного вентиляционным ставом и клетевым стволом, на промежутке времени $[0, t^{**}]$ равна

$$H_e = \theta(t - t^*) \frac{gh}{L_k S_k} \left(\rho_b - \frac{\rho_c Q_c + \rho_b Q_b}{Q_c + Q_b} \right) \int_{t^*}^t Q_k(\tau) d\tau, \quad (13)$$

где θ – функция Хэвисайда.

Естественная тяга, рассчитанная для вентиляционного контура, образованного вентиляционным ставом и скиповым стволом, на промежутке времени $[0, t^{**}]$ постоянна и равна

$$H_e = gh(\rho_c - \rho_k). \quad (14)$$

В рассматриваемой задаче прогнозируемая естественная тяга (около 800 Па) превышает депрессию скипового ствола (около 10 Па) в начальный момент времени. Поэтому система уравнений (1)–(3), решаемая на промежутке времени $[0, t^{**}]$, должна быть пополнена слагаемым, учитывающим естественную тягу, вида (13)

$$R_b Q_b^2 + R_k Q_k^2 + \frac{\rho_b L_b}{S_b} \frac{\partial Q_b}{\partial t} + \left(\frac{\rho L_k}{S_k} + \frac{\rho L_{mc}}{S_{mc}} \right) \frac{\partial Q_k}{\partial t} = H + \theta(t - t^*) \frac{gh}{L_k S_k} \left(\rho_b - \frac{\rho_c Q_c + \rho_b Q_b}{Q_c + Q_b} \right) \int_{t^*}^t Q_k(\tau) d\tau. \quad (15)$$

$$R_B Q_B^2 + R_C Q_C^2 + \frac{\rho L_B}{S_B} \frac{\partial Q_B}{\partial t} + \frac{\rho L_C}{S_C} \frac{\partial Q_C}{\partial t} = H - gh(\rho_c - \rho_B), \quad (16)$$

$$Q_C + Q_K = Q_B. \quad (17)$$

В (15)–(17) также учтены направления расходов воздуха при $t \in [0, t^*]$.

Точное аналитическое решение системы интегродифференциальных уравнений Вольтерры 2-го рода (15)–(17) с начальными условиями (4)–(5) не может быть получено. Поэтому для решения данной задачи введено предположение о несущественности изменения расхода воздуха в вентиляционном трубопроводе после открытия межстволовой сбойки. Введение такого допущения обусловлено тем фактом, что депрессия вентиляционного трубопровода составляет ~ 8000 Па, что на порядок выше прогнозируемой величины естественной тяги.

$$Q_B(t) = Q_B^{(0)}, \quad (18)$$

где $Q_B^{(0)}$ – расход воздуха в вентиляционном трубопроводе в начальный момент времени, $\text{м}^3/\text{с}$.

Аналитическое исследование нестационарного распределения воздуха

Рассмотрим систему уравнений (15)–(17) при $t \in [0, t^*]$.

В этом случае количество неизвестных сокращается с 3 до 2, а система уравнений (15)–(17) сводится к следующей системе двух уравнений:

$$R_C Q_C^2 + R_K Q_K^2 + \frac{\rho L_C}{S_C} \frac{\partial Q_C}{\partial t} + \left(\frac{\rho L_K}{S_K} + \frac{\rho L_{MC}}{S_{MC}} \right) \frac{\partial Q_K}{\partial t} = gh(\rho_c - \rho_K). \quad (19)$$

$$Q_C + Q_B^{(0)} = Q_K. \quad (20)$$

В результате решения системы уравнений (19)–(20) получаем следующие выражения для нестационарных расходов воздуха в вентиляционной сети рудника при $t \in [0, t^*]$:

$$Q_K(t) = \frac{Q_B^{(0)} R_C}{R_K + R_C} + \frac{b}{R_K + R_C} \tanh \left[\frac{bt}{a} - \operatorname{arctanh} \left(\frac{Q_B^{(0)} R_K}{b} \right) \right], \quad (21)$$

$$Q_C(t) = -\frac{Q_B^{(0)} R_K}{R_K + R_C} + \frac{b}{R_K + R_C} \tanh \left[\frac{bt}{a} - \operatorname{arctanh} \left(\frac{Q_B^{(0)} R_K}{b} \right) \right], \quad (22)$$

$$a = \frac{\rho_c L_C}{S_C} + \frac{\rho_K L_K}{S_K} + \frac{\rho_{MC} L_{MC}}{S_{MC}},$$

$$b = \sqrt{gh(\rho_c - \rho_K)(R_C + R_K) - R_C R_K Q_B^{(0)2}},$$

$$Q_B = Q_B^{(0)}. \quad (23)$$

В момент времени t^* , определяемый из уравнения

$$1 = \frac{1}{L_{MC} S_{MC}} \int_0^{t^*} Q_K(\tau) d\tau = \frac{Q_B^{(0)} R_C t^*}{R_K + R_C} + \frac{a}{R_K + R_C} \ln \left\{ \cosh \left[\frac{bt^*}{a} - \operatorname{arctanh} \left(\frac{Q_B^{(0)} R_K}{b} \right) \right] \right\} - \frac{a}{R_K + R_C} \ln \left\{ \cosh \left[-\operatorname{arctanh} \left(\frac{Q_B^{(0)} R_K}{b} \right) \right] \right\}, \quad (24)$$

величины расходов воздуха послужат начальными условиями для решения системы интегродифференциальных уравнений (15)–(17) при $t \in [t^*, t^{**}]$.

Решение трансцендентного уравнения (24) относительно t^* позволяет определить момент времени, когда холодная струя воздуха попадает в клетевой ствол. Для параметров выработок вентиляционной сети исследуемого рудника Усольского калийного комбината (табл. 1) данное время составляет $t^* = 31,5$ с. Расходы воздуха в данный момент времени на основании выражений (21)–(23) равны $Q_K = 238,8 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_C = 217,5 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_B = 21,3 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 1

Геометрические и физические параметры выработок в модели вентиляционной сети

Характеристика	Значение			
	скиповой ствол	клетевой ствол	вентиляционный ствол	сбойка
Длина, м	428	428	720	300
Площадь, м^2	37	50	2,5	15,5
Аэродинамическое сопротивление, $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$	0,01	0,004	17,4	0,0065

Модельные аэродинамические сопротивления стволов рассчитаны на основании результатов исследований [11, 12].

На рис. 3 представлены зависимости расходов воздуха в клетевом и скиповом стволах от времени для временного промежутка $t \in [0, t^*]$.

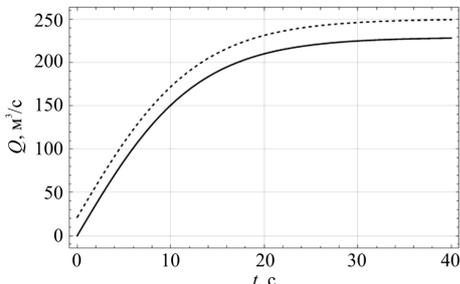


Рис. 3. Изменение расходов воздуха в клетевом (.....) и скиповом (—) стволах с течением времени

К моменту времени $t^* = 31,5$ с данные кривые находятся уже достаточно близко к своим асимптотам.

Система уравнений (15)–(17) для интервала времени $t \in [t^*, t^{**}]$ запишется в виде

$$R_c Q_c^2 + R_k Q_k^2 + \frac{\rho_c L_c}{S_c} \frac{\partial Q_c}{\partial t} + \left(\frac{\rho_k L_k}{S_k} + \frac{\rho_k L_{mc}}{S_{mc}} \right) \frac{\partial Q_k}{\partial t} = \quad (25)$$

$$= gh(\rho_c - \rho_k) \left(1 - \frac{1}{L_k S_k} \int_{t^*}^t Q_k(\tau) d\tau \right), \quad (26)$$

$$Q_c + Q_k^{(0)} = Q_k.$$

Получение точного решения системы (25)–(26) представляется затруднительным ввиду ее нелинейности. Для исследования асимптотики решения в окрестности времени t^* зафиксируем величины аэродинамических сопротивлений в уравнении (25). Тогда приближенное решение системы уравнений (25)–(26) для интервала времени $t \in [t^*, t^{**}]$ имеет вид

$$Q_k = Q_k(t^*) \cos(ct - ct^*), \quad (27)$$

$$Q_c = Q_c(t^*) \cos(ct - ct^*), \quad (28)$$

$$c = \sqrt{\frac{gh(\rho_c - \rho_k)}{L_k S_k a}},$$

$$a = \frac{\rho_c L_c}{S_c} + \frac{\rho_k L_k}{S_k} + \frac{\rho_{mc} L_{mc}}{S_{mc}},$$

$$Q_B = Q_B^{(0)}. \quad (29)$$

Таким образом, при $t \in [t^*, t^{**}]$ естественная тяга будет постепенно ослабевать, а расходы воздуха в стволах будут сначала непродолжительное время возрастать (под действием сил инерции), а затем убывать до значений, соответствующих стационарному режиму проветривания. В стационарном режиме проветривания температура воздуха в клетевом стволе, а следовательно, и естественная тяга будут определяться соотношением расходов воздуха в скиповом стволе и вентиляционном трубопроводе:

$$H_e = gh \left(\rho_c - \frac{\rho_c Q_c + \rho_B Q_B}{Q_c + Q_B} \right). \quad (30)$$

Расходы воздуха будут удовлетворять уравнениям

$$R_c Q_c^2 + R_k Q_k^2 = gh \left(\rho_c - \frac{\rho_c Q_c + \rho_B Q_B^{(0)}}{Q_c + Q_B^{(0)}} \right), \quad (31)$$

$$Q_c + Q_k = Q_B^{(0)}. \quad (32)$$

Для параметров рассматриваемой задачи получаем при времени $t \rightarrow \infty$ расходы воздуха: $Q_k = 115,7$ м³/с, $Q_c = 94,4$ м³/с.

На рис. 4 представлены зависимости расходов воздуха в клетевом и скиповом стволах от времени для временного промежутка $t \in [0, t^{**}]$, а также расходы воздуха в клетевом и скиповом стволах в пределе времени $t \rightarrow \infty$. Точками отмечены места сопряжения решений (21)–(22) и (27)–(29) для различных промежутков времени.

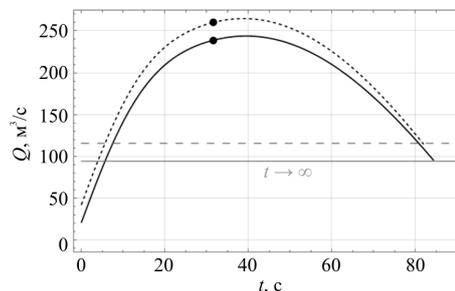


Рис. 4. Изменение расходов воздуха в клетевом (.....) и скиповом (—) стволах с течением времени; горизонтальными линиями отмечены стационарные расходы воздуха в пределе при времени $t \rightarrow \infty$

Полученные кривые для временного промежутка $t \in [t^*, t^{**}]$ позволяют достаточно точно проанализировать динамику воздухорас-

пределения в вентиляционной сети рудника только для времени не более 60 с. В дальнейшем расходы воздуха начинают сильно отличаться от расходов воздуха при $t^* = 31,5$ с, что приводит к росту погрешности (принятие гипотезы о фиксированных величинах аэродинамических сопротивлений в уравнении (25)). Об этом говорит и тот факт, что временные зависимости расходов (27)–(29) негладко сопрягаются с решением на бесконечности (см. рис. 4).

Расходы воздуха, получаемые из решения системы (31)–(32) при $t \rightarrow \infty$, зависят от температуры на дневной поверхности согласно кривой, представленной на рис. 5.

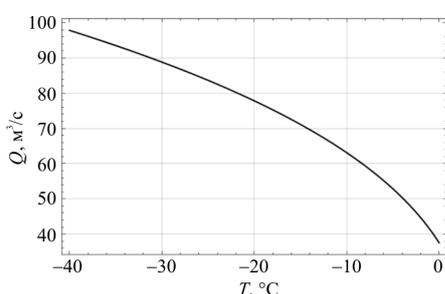


Рис. 5. Расход воздуха в клетевом стволе при $t \rightarrow \infty$ в зависимости от температуры на дневной поверхности

Одним из возможных мероприятий по уменьшению величины расходов воздуха в вентиляционной сети рудника и уменьшению эффекта от естественной тяги является перекрытие клетевого ствола [13]. Проведем анализ влияния аэродинамического сопротивления клетевого ствола на стационарное решение системы (31)–(32). На рис. 6 представлена зависимость расхода воздуха в клетевом стволе от аэродинамического сопротивления данного ствола.

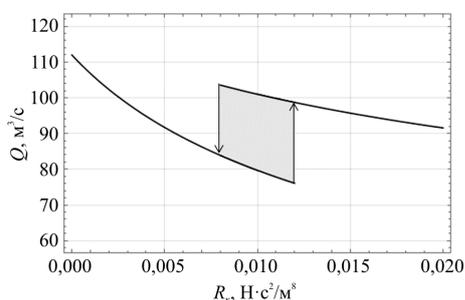


Рис. 6. Расход воздуха в клетевом стволе при $t \rightarrow \infty$ в зависимости от аэродинамического сопротивления ствола

При увеличении аэродинамического сопротивления в клетевом стволе происходит уменьшение расхода воздуха в вентиляционной

сети. Когда аэродинамическое сопротивление клетевого ствола начинает превышать аэродинамическое сопротивление скипового ствола

$$R_k > R_c = 0,01 \text{ H} \cdot \text{c}^2 / \text{m}^8, \quad (33)$$

воздухораспределение становится неустойчивым, «опрокидывается», а расход воздуха при этом «перескакивает» с одной кривой на другую. Неустойчивость обусловлена тем, что при росте аэродинамического сопротивления клетевого ствола движение воздуха в вентиляционной сети против часовой стрелки (выдача воздуха по клетевому стволу) становится более энергозатратным, чем по часовой стрелке (выдача воздуха по скиповому стволу), см. рис. 7.

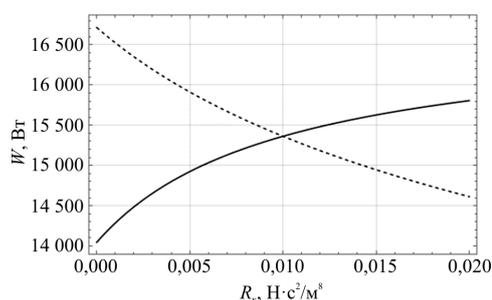


Рис. 7. Мощности, затрачиваемые на проветривание рудничной вентиляционной сети естественной тягой, для режима проветривания по часовой стрелке (..... – скиповый ствол является вентиляционным) и режима проветривания против часовой стрелки (— — скиповый ствол является воздухоподающим)

Следует отметить, что опрокидывание воздушной струи происходит не сразу после выполнения условия (33), а после того, как разница мощностей станет выше мощности естественной тяги $gh(\rho_c - \rho_k) \min(Q_c, Q_k)$. Поэтому функция расхода от сопротивления представлена в виде гистерезиса.

После закрытия клетевого ствола образуется устойчивый режим проветривания, который сохраняется таковым и после того, как клетевой ствол снова откроется. Получаемые при $t \rightarrow \infty$ расходы воздуха в скиповом стволе зависят от температуры на дневной поверхности.

На данной стадии строительства рудника реализация представленного мероприятия может осложняться невозможностью обеспечить требуемую герметичность устья клетевого ствола или его сопряжения с транспортным горизонтом. В этом случае уже установившийся режим проветривания рудника за счет влияния естественной тяги невозможно будет изменить имеющимися средствами отрицательного и положительного регулирования.

Далее, ввиду известных процессов конвективного расслоения воздушных потоков по периметру стволов [3, 8, 14], в представленной работе проверяется корректность применения одномерного подхода для исследования переходных процессов в вентиляционной сети рудника. Для этого используется трехмерное численное моделирование методами вычислительной динамики жидкости и газа.

Численное моделирование воздухораспределения в трехмерной постановке

Для проверки корректности одномерного подхода к моделированию переходных процессов в вентиляционной сети рудника Усольского калийного комбината в момент проходки межстволовой сбойки и уточнения распределения скоростей воздуха в объеме вентиляционной сети рудника проведена серия расчетов с помощью программно-вычислительного комплекса ANSYS, модуля Fluent. На рис. 8 представлена расчетная область вентиляционной сети рудника.

На представленной расчетной области построена неструктурированная конечно-элементная сетка с тетраэдрическими элементами во внутренней зоне и призматическими элементами на границе со стенками (пограничный слой). Для проверки независимости решения от способа конечно-элементного разбиения расчетной области построено несколько конечно-элементных сеток

с различным количеством и размером элементов. Исследована сходимость решения при измельчении конечно-элементной сетки.

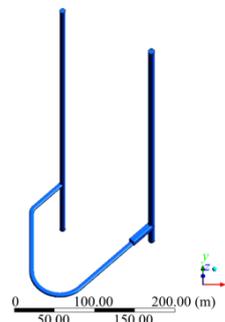


Рис. 8. Расчетная область вентиляционной сети рудника

Для расчета применен метод конечных объемов SIMPLE [15] с последовательной во времени коррекцией полей скоростей – давления [16]. Использована модель турбулентности standard k-epsilon с масштабируемыми пристеночными функциями [16, 17]. Шероховатость стенок горных выработок задана в виде дополнительного логарифмического слагаемого в пристеночной функции для безразмерной скорости воздуха [18].

При моделировании естественной тяги принято, что плотность воздуха зависит от температуры согласно уравнению Менделеева–Клайперона совершенного газа [19]. В рамках данного подхода плотность воздуха зависит от температуры и абсолютного давления.

Таблица 2

Распределение температуры и скорости воздуха в срединных сечениях скипового и клетового стволов и сбойки в различные моменты времени

Время, с	Распределение скоростей, м/с	Распределение температур, °С	Время, с	Распределение скоростей, м/с	Распределение температур, °С
0			20		
5			40		
10			60		

В табл. 2 представлено полученное в результате численного моделирования распределение температуры и скорости воздуха в срединных сечениях скипового и клетового стволов и сбойки в различные моменты времени после открытия межстволовой сбойки.

Из табл. 2 видно, что теплоперенос в трехмерной модели осуществляется преимущественно за счет процесса идеального вытеснения холодным воздухом теплого. Процесс тепловой диффузии потоков выражен слабо ввиду малости характерных поперечных размеров выработок по сравнению с их характерными длинами.

Сравнительный анализ результатов численного моделирования и аналитических расчетов

Из табл. 2 видно, что до момента времени $t = 40$ с расход воздуха, проходящего по вентиляционной сети, возрастает под действием естественной тяги и достигает своего пика, равного $284 \text{ м}^3/\text{с}$ для межстволовой сбойки и клетового ствола; $262 \text{ м}^3/\text{с}$ для скипового ствола. В момент времени $t = 30$ с холодная струя воздуха достигает клетового ствола. Данный факт хорошо согласуется с результатами одномерного теоретического анализа.

В дальнейшем холодная воздушная струя начинает подниматься по клетовому стволу вверх, в результате чего влияние естественной тяги ослабевает. Однако между ослабеванием влияния естественной тяги и уменьшением расхода воздуха в стволах имеется большая задержка по сравнению с результатами, полученными в рамках одномерной модели. Это связано с отсутствием учета сжимаемости воздуха в одномерном случае [20].

На рис. 9 представлены зависимости скорости воздуха в клетовом стволу, полученные в результате одномерного теоретического анализа и трехмерного численного моделирования.

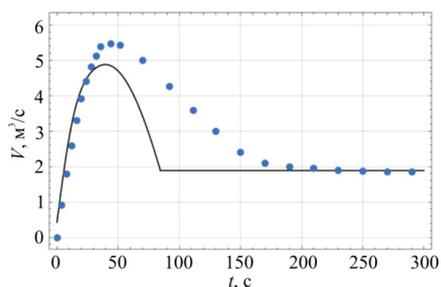


Рис. 9. Изменение скорости воздуха в клетовом стволу по результатам: — — теоретического анализа; ● — численного моделирования

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что результаты одномерного и трехмерного моделирования хорошо сходятся на промежутке $t \in [0, t^*]$ и при $t \rightarrow \infty$. Помимо этого, трехмерная модель позволяет определить время выхода на стационарный режим проветривания.

Заключение

В данной работе исследовано влияние естественной тяги на воздухораспределение в вентиляционной сети рудника Усольского калийного комбината после завершения проходки межстволовой сбойки в холодный период года. Построена одномерная математическая модель течения воздуха после проходки межстволовой сбойки с учетом переменного во времени влияния естественной тяги, а также с учетом инерционности воздуха. На основе математической модели получено приближенное аналитическое решение задачи нестационарного воздухораспределения.

Рассмотрено несколько сценариев неустойчивого проветривания рудника в зависимости от величины естественной тяги, определен механизм потери устойчивости воздушного потока и изменения режима проветривания после перекрытия нейтрального по проветриванию ствола.

Проведено сопоставление данных, полученных в одномерной постановке, с результатами численного трехмерного моделирования течения воздуха с различными термодинамическими параметрами в программном комплексе ANSYS. Выявлено соответствие результатов одномерного аналитического и трехмерного численного моделирования для начального промежутка времени и после установления стационарного воздухораспределения. Соответствие обеспечивается тем фактом, что теплоперенос в начальный промежуток времени в трехмерной модели осуществляется преимущественно за счет процесса идеального вытеснения холодным воздухом теплого, процесс тепловой диффузии потоков выражен слабо ввиду малости характерных поперечных размеров выработок по сравнению с их характерными длинами. Во временном промежутке, характеризующемся переходом от пиковых расходов воздуха к выходу их на стационарные значения, наблюдается существенное рассогласование данных, причиной которого является отсутствие учета сжимаемости воздуха при решении задачи в одномерной постановке.

Приведенное рассогласование влияет на прогнозируемое время протекания переходных процессов, но не меняет величину возникающих тепловых депрессий и соответствующих им

расходов воздуха, что позволяет применять одномерный подход для разработки технических решений по организации проектного вентиляционного режима.

Список литературы

1. Трушкова Н.А. Исследование возможности проветривания части шахтного поля без использования вентилятора главного проветривания // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. / Горный институт Уральского отделения РАН. – Пермь, 2011. – С. 241–243.
2. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 67 с.
3. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan shutdown // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 86. – P. 288–293. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.004.
4. Меренков А.П. Дифференциация методов расчета гидравлических цепей // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1973. – Т. 13, № 5. – С. 1237–1248.
5. Yun Sh., Hai-ning W. Study and application on simulation and optimization system for the mine ventilation network // *Procedia Engineering*. – 2011. – Vol. 26. – P. 236–242. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2163.
6. Applied research of U-shape ventilation network in underground mine / H. Zhang, L.S. Pera, V.S. Carla, Y. Zhao // *Archives of mining science*. – 2014. – Vol. 59, is. 2. – P. 381–394. DOI: 10.2478/amsc-2014-0027.
7. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Киряков А.С. Моделирование переходных процессов нестационарного воздухораспределения в руднике в аварийных режимах // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2010. – № 2. – С. 83–89.
8. Круглов Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: дис. ... д-р. техн. наук. – Пермь, 2012. – 341 с.
9. Шалимов А.В., Зайцев А.В., Гришин Е.Л. Учет инерционных сил движения воздуха при нестационарных расчетах воздухораспределения в вентиляционной сети // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 4. – С. 218–222.
10. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Моделирование нестационарных процессов движения воздуха и переноса тепла и примесей по выработкам рудничных вентиляционных сетей в программном комплексе «Аэросеть» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2010. – № 2. – С. 64–69.

11. Мальцев С.В. Определение аэродинамических параметров стволов глубоких рудников на основании данных воздушно-депресссионной съемки // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – 2013. – № 11. – С. 256–257.
12. Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В. Особенности определения аэродинамических сопротивлений глубоких шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 164–168.
13. Моделирование динамики тепловых депрессий и ее влияния на проветривание горных выработок / А.В. Шалимов, Д.С. Кормщиков, Р.Р. Газизуллин, М.А. Семин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 12. – С. 41–47. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.5.
14. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Экспериментальное исследование изменения воздухораспределения на калийных рудниках при реверсировании главной вентиляционной установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 17. – С. 89–97. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.10.
15. Lew A., Buscaglia G., Carrica P. A note on the numerical treatment of the k-epsilon turbulence model // *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. – 2001. – Vol. 14 (3). – P. 201–209. DOI: 10.1080/10618560108940724.
16. Patankar S.V., Spalding D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimension parabolic flows // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1972. – Vol. 15. – P. 1787–1806. DOI: 10.1016/0017-9310(72)90054-3.
17. Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the K-Epsilon turbulence model. – New York: Wiley, 1994. – 194 p.
18. Семин М.А. Совершенствование методики построения CFD-моделей для решения задач рудничной вентиляции // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – 2014. – № 12. – С. 275–277.
19. Brake D.J. Mine ventilation – a practitioner’s manual. – Brisbane, 2012. – 686 p.
20. Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 100–108.

References

1. Trushkova N.A. Issledovanie vozmozhnosti provetrivaniia chasti shakhtnogo polia bez ispol'zovaniia ventilatora glavnogo provetrivaniia [Study ventilation possibility of the mine field without using the main ventilation fan]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesurov: sb. nauch. tr.*, 2011, pp.241-243.
2. SNiP 23-01-99. Stroitel'naia klimatologiia [Construction climatology]. Moscow: Izd-vo standartov, 1999, 67 p.

3. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan shutdown. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 86, pp.288-293. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.004.
4. Merenkov A.P. Differentsiatsiia metodov rascheta gidravlicheskih tsepei [Methods differentiation of hydraulic circuits calculation]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1973, vol.13, no.5, pp.1237-1248.

5. Yun Sh., Hai-ning W. Study and application on simulation and optimization system for the mine ventilation network. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 26, pp.236-242. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2163.
6. Zhang H., Pera L.S., Carla V.S., Zhao Y. Applied research of U-shape ventilation network in underground mine. *Archives of mining science*, 2014, vol.59, is.2, pp.381–394. DOI: 10.2478/amsc-2014-0027.
7. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Kiriakov A.S. Modelirovanie perekhodnykh protsessov nestatsionarnogo vozdukhoraspredeleniia v rudnike v avariinykh rezhimakh [Modelling of transient non-stationary air distribution in mine during emergency operation]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2010, no.2, pp.83-89.
8. Kruglov Iu.V. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy postroeniia sistem optimal'noe upravleniia provetrivaniem podzemnykh rudnikov [Theoretical and technological basics of building management systems, optimal ventilation of underground mines]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Perm', 2012, 341 p.
9. Shalimov A.V., Zaitsev A.V., Grishin E.L. Uchet inertsiionnykh sil dvizheniia vozdukh pri nestatsionarnykh raschetakh vozdukhoraspredeleniia v ventilatsionnoi seti [Accounting the inertial forces of air motion in unsteady calculations of air distribution in ventilation network]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2011, no.4, pp.218-222.
10. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. Modelirovanie nestatsionarnykh protsessov dvizheniia vozdukh i perenosa tepla i primesei po vyrabotkam rudnichnykh ventilatsionnykh setei v programnom komplekse «Aeroset» [Modelling of non-stationary processes of air flow and heat transfer and additives to develop a mine ventilation network in the software package "Aeroset"]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2010, no.2, pp.64-69.
11. Mal'tsev S.V. Opredelenie aerodinamicheskikh parametrov stvolov glubokikh rudnikov na osnovanii dannykh vozdušno-depressiionnoi s"emki [Determination of aerodynamic parameters of deep mine shafts on the basis of an air-depression survey data]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov: sb. nauch. tr.*, 2013, no.11, pp.256-257.
12. Kazakov B.P., Isaevich A.G., Mal'tsev S.V. Osobennosti opredeleniia aerodinamicheskikh soprotivlenii glubokikh shakhtnykh stvolov [Peculiarities of determination of the aerodynamic resistance of deep mine shafts]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2013, no.12, pp.164-168.
13. Shalimov A.V., Kormshchikov D.S., Gazizullin R.R., Semin M.A. Modelirovanie dinamiki teplovykh depressii i ee vliianiia na provetrivanie gornykh vyrabotok [Modeling alteration of thermal drop of ventilation pressure and its effects on mine working ventilation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2014, no.12, pp.41-47. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.5.
14. Levin L.Iu., Semin M.A., Kliukin Iu.A. Eksperimental'noe issledovanie izmeneniia vozdukhoraspredeleniia na kaliinykh rudnikakh pri reversirovanii glavnoi ventilatornoi ustanovki [Experimental study of change in air distribution on potash mines during revers of main fan installation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2015, no.17, pp.89-97. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.10.
15. Lew A., Buscaglia G., Carrica P. A note on the numerical treatment of the k-epsilon turbulence model. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2001, vol. 14 (3), pp.201-209. DOI: 10.1080/10618560108940724.
16. Patankar S.V., Spalding D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimension parabolic flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1972, vol. 15, pp.1787-1806. DOI: 10.1016/0017-9310(72)90054-3.
17. Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the K-Epsilon turbulence model. New York: Wiley, 1994, 194 p.
18. Semin M.A. Sovershenstvovanie metodiki postroeniia CFD-modelei dlia resheniia zadach rudnichnoi ventilatsii [Improving technique of construction CFD-models for solving mine ventilation problems]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov: sb. nauch. tr.*, 2014, no.12, pp.275-277.
19. Brake D.J., Mine ventilation – a practitioner's Manual. Brisbane, 2006, 686 p.
20. Kruglov Iu.V., Levin L.Iu., Zaitsev A.V. Modelirovanie perekhodnykh protsessov v ventilatsionnykh setiakh podzemnykh rudnikov [Calculation method for the unsteady air supply in mine ventilation networks]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2011, no.5, pp.100-108.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Исследование аэро- и термодинамических процессов, протекающих на начальном этапе организации сквозного проветривания рудника / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин, Е.В. Накаряков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №21. – С.367–377. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.9

Please cite this article in English as:

Levin L.Iu., Semin M.A., Kliukin Iu.A., Nakariakov E.V. Study of aero- and thermodynamic processes occurring on the first stage of the cross-ventilation creation in mine. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no.21, pp.367–377. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.9