

Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Р.Р. Газизуллин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В РУДНИЧНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ ПРИ РЕВЕРСИРОВАНИИ ГЛАВНОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ*

Разработан новый сетевой метод расчета воздухораспределения, учитывающий влияние местных аэродинамических сопротивлений на смешение, расширение, сжатие и поворот потоков, а также термодинамические факторы: естественную тягу, тепловую депрессию и нестационарный теплообмен с породным массивом. Предложенный метод позволят осуществлять расчет воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях при реверсировании ГВУ и других видах изменения режима работы ГВУ. С использованием данного метода выполнен расчет воздухораспределения в нормальном и реверсивном режимах проветривания для рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий». Полученные результаты численного моделирования сравнивались с результатами экспериментальных измерений расходов и давлений воздуха на руднике БКПРУ-2, полученных во время проведения процедуры планового реверсирования ГВУ.

Ключевые слова: реверсирование, местные аэродинамические сопротивления, главная вентиляторная установка, стационарное воздухораспределение, естественная тяга, теплообмен.

Введение

Действующие на территории Российской Федерации Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (по приказу Ростехнадзора от 11 декабря 2014 г.) предъявляют ряд требований к реверсивным режимам вентиляции рудников. Соблюдение данных требований необходимо для обеспечения безопасного вывода людей из рудника при ликвидации пожаров и задымлений. В частности, «расход воздуха, проходящего по главным выработкам в реверсивном режиме проветривания, должен составлять не менее 60% от расхода воздуха, проходящего по ним в нормальном режиме». Как следствие, на этапе проектирования и эксплуатации рудников для принятия эффективных технических решений и подбора правильных геометрических параметров горных выработок, обеспечивающих требуемые расходы воздуха и аэродинамические сопротивления выработок, появляется необходимость математического прогнозирования воздухораспределения не только в нормальном режиме проветривания, но и в реверсивном.

Существующие методы расчета воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях, как правило, основываются на решении системы уравнений Кирхгоффа 1-го и 2-го рода исходя из известных значений линейных аэродинамических сопротивлений, определяющихся в ходе проведения воздушно-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации в рамках научного проекта № МД-7047.2015.5.

депресссионных съемок на рудниках [1, 2, 3]. В ряде случаев для уточнения распределения расходов и давлений рассчитывается также неравномерное распределение температур в выработках рудника и связанные с ней естественная тяга и нестационарный сопряженный теплообмен с породным массивом [3, 4]. Однако в вентиляционных сетях со сложной топологией и множеством сопряжений горных выработок указанные подходы имеют высокую погрешность по причине неучета влияния местных сопротивлений при прохождении потоком воздуха сопряжений горных выработок, поворотов. По оценкам [5, 6], относительный вклад местных сопротивлений в общее сопротивление вентиляционной сети калийных рудников составляют 15–25% и увеличивается при относительном увеличении площадей поперечного сечения горных выработок. При рассмотрении воздухораспределения при изменении режима работы ГВУ (в частности, при реверсировании ГВУ) фактор, связанный с местными сопротивлениями, является наиболее значимым [4, 10].

В настоящее время в литературе существует ряд методов расчета местных аэродинамических сопротивлений [4, 5, 6, 7, 8]. Однако их интеграция в сетевые методы расчета воздухораспределения осложняется ограниченностью данных методов. В ряде случаев методы позволяют точно рассчитывать перепады давлений для частных случаев сопряжений трех горных выработок под прямым углом и оказываются не применимыми при анализе более сложных видов сопряжений [7]. В ряде случаев исследователями предлагаются достаточно общие формулы для расчета местных сопротивлений произвольного количества горных выработок, однако не учитывается ряд значимых физических процессов [4].

В данном исследовании разрабатывается новый сетевой метод расчета воздухораспределения, учитывающий влияние местных сопротивлений на смешивание, расширение/сжатие и поворот потоков, а также термодинамические факторы: естественную тягу, тепловую депрессию и нестационарный теплообмен с породным массивом.

Метод расчета стационарного воздухораспределения

Математическая модель вентиляционной рудничной сети представляет собой ориентированный граф $G = \{E, V\}$, где E – множество его ветвей $e_i \in E$, а V – множество его узлов $v_j \in V$. Ветвями данного графа являются прямые или криволинейные отрезки горных выработок, характеризующиеся длиной L , площадью поперечного сечения S , периметром поперечного сечения P , аэродинамическим сопротивлением R вследствие шероховатости стенок, расходом воздуха Q (см. рис. 1).

Расчет стационарного воздухораспределения основывается на методе контурных расходов [9]. Согласно данному методу, на каждой следующей итерации $\tau + 1$, исходя из предыдущей τ , рассчитывается вектор приближенных значений расходов воздуха:

$$q_k^{\tau+1} = q_k^{\tau} - (M^T \cdot D \cdot M)^{-1} \cdot M^T \cdot A \cdot M \cdot q_k^{\tau} \quad (1)$$

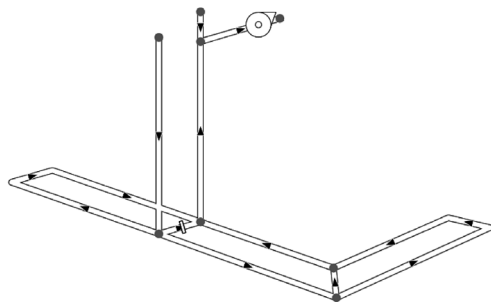


Рис. 1. Графовое представление вентиляционной сети рудника

$$D_{ij} = \left(2R_i |Q_i| - \frac{\partial P_i(Q_i)}{\partial Q_i} \right) \cdot \delta_{ij}. \quad (2)$$

Здесь $q_k = \{Q_i, i \in A_l(C_l)\}$ – вектор независимых расходов воздуха, содержащий расходы из множества ветвей A_l , образующих выбранное множество независимых контуров сет C_l без повторений; τ – индекс, характеризующий временной шаг итерационной процедуры; M^T – транспонированная матрица инцидентности графа сети, характеризующая вхождение ветвей в контур и их ориентацию в нем; D – матрица, элементы D_{ij} которой характеризуют величину изменения депрессии ветви № i , входящей в контур № j , при изменении ее расхода на единицу; A – матрица инцидентности графа сети, содержащая информацию о том, какие вершины граничат с какими ветвями; δ_{ij} – дельта-функция Кронекера [10]; $P_i(Q_i)$ – источник тяги (напор вентилятора, естественная тяга, тепловая депрессия).

Далее в конце каждой итерации рассчитывается максимальная невязка между расходами воздуха:

$$\varepsilon^\tau = \max_k |q_k^{\tau+1} - q_k^\tau|. \quad (3)$$

Итерационная процедура продолжается до тех пор, пока невязка ε^τ не станет меньше заданной точности ε_0 .

Учет предложенной модели местных аэродинамических сопротивлений осуществляется посредством модификации элементов матрицы D .

$$D_{ij} = \left(2R_i |Q_i| - \frac{\partial P_i(Q_i)}{\partial Q_i} - \frac{\partial \tilde{H}_{ij}}{\partial Q_i} \right) \delta_{ij}, \quad (4)$$

где дополнительный источник тяги \tilde{H}_{ij} представляет собой падение давления на местных сопротивлениях и рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{ij} = & -\beta_i \sum_{s_{in}} \left| \frac{Q_{s_{in}}}{Q_{\Sigma_{in}}} \right| \frac{\rho (V_{s_{in}} - V_i)^2}{2} - \beta_i \sum_{s_{out}} \left| \frac{Q_{s_{out}}}{Q_{\Sigma_{out}}} \right| \frac{\rho (V_{s_{out}} - V_i)^2}{2} - \\ & - 1,7\beta_i \sum_{s_{in}} \rho \left| V_i V_{s_{in}} \cdot \frac{Q_{s_{in}}}{Q_{\Sigma_{in}}} \right| \cdot \sin^2(\delta_{s_{in}i} / 2) \end{aligned} \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; $Q_{\Sigma_{in}}$ – суммарный расход воздуха, протекающий через начальный узел ветви № i , $Q_{\Sigma_{out}}$ – суммарный расход воздуха, протекающий через конечный узел ветви № i , куб.м/с; $Q_{s_{in}}$ – расход воздуха в ветви № s_{in} , по которой воздух поступает в начальный узел ветви № i , куб.м/с; $Q_{s_{out}}$ – расход воздуха в ветви № s_{out} , по которой воздух поступает в конечный узел ветви № i , куб.м/с; $V_{s_{in}}$ – скорость воздуха в ветви № s_{in} , по которой воздух поступает в начальный узел ветви № i , м/с; $V_{s_{out}}$ – скорость воздуха в ветви № s_{out} , по которой воздух поступает в конечный узел ветви № i , м/с; V_i – скорость воздуха в ветви № i , м/с; $\beta_i = 0,95 + 280\alpha_i$ – фактор трения; α_i – коэффициент аэродинамического сопротивления ветви № i , Н · с²/м⁸. Суммирование по индексу s_{in} в (5) осуществляется по всем ветвям, по которым поток поступает в начальный узел ветви № i . Суммирование по индексу s_{out} в (5) осуществляется по всем ветвям, по которым поток поступает в конечный узел ветви № i .

Первое слагаемое в (5) отвечает за местную потерю энергии на разделение потока, второе – на смешение потоков, третье – на поворот потоков при прохождении сопряжений. Выражение (5) получено на основании модели, предложенной в [10].

Учет естественной тяги и тепловых депрессий осуществляется путем представления источника тяги в виде

$$P_i(Q_i) = P_i^{(ГВУ)}(Q_i) + P_i^{(ЕТ)} = P_i^{(ГВУ)}(Q_i) + \frac{\rho_i^{(in)} + \rho_i^{(out)}}{2} g \Delta z_i \quad (6)$$

где $\rho_i^{(in)}$ и $\rho_i^{(out)}$ – соответственно плотности воздуха во входящем и исходящем узлах ветви № i , рассчитываемые из уравнения состояния Менделеева-Клапейрона, кг/м³; Δz_i – перепад высот ветви № i ; g – ускорение свободного падения, кг/м³.

Метод расчета нестационарного теплораспределения в рудничной атмосфере

Учет протекания термодинамических процессов в рудничной атмосфере осуществляется на базе модели [4]. При ее построении принимается ряд гипотез:

- распределение температуры воздуха в поперечном сечении выработки считается равномерным;
- воздух описывается уравнением состояния совершенного газа (Менделеева-Клапейрона) [4];
- рассматривается только конвективный теплоперенос в рудничном воздухе.

Численное решение уравнения конвективного переноса теплоты в рудничной атмосфере ищется с использованием метода конечных разностей на разнесенной сетке. Используемая численная схема, применяемая для каждой ветви № i , представлена ниже

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} + V_{i-1/2} \frac{T_i^k - T_{i-1}^k}{\Delta x} = q_{i-1/2}^k \quad V_i > 0 \quad (7)$$

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} + V_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta x} = q_{i+1/2}^k \quad V_i < 0 \quad (8)$$

$$q_{i+1/2}^k = q_{ТВ}(x_i, t_k) + \frac{k_\tau P}{\rho c_v S} (T_{ПМ}(x_i) - 0,5(T_{i+1}^k + T_i^k)) \quad (9)$$

Здесь T_i^{k+1} – значение температуры в центре ячейки № i на временном слое № k , °С; $V_{i-1/2}^k$ – значение скорости на границе между ячейками № $i-1$ и № i на временном слое № k , м/с; Δt – временной шаг, с; $\Delta x = V_i \Delta t$ – пространственный шаг, м; $q_{i-1/2}^k$ – тепловой поток через границу между ячейками № $i-1$ и № i на временном слое № k , Вт/м²; $q_{ТВ}(x_i, t_k)$ – прирост тепла в ячейке № i ; $T_{ПМ}(x_i)$ – температура породного массива в начальный момент времени на стенке выработки, °С; k_τ – коэффициент нестационарного теплообмена [4] на границе породного массива, Вт/°С/м²; P – периметр выработки, м; S – площадь поперечного сечения выработки, м²; c_v – удельная теплоемкость воздуха, Дж/°С/кг; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Для согласования тепловых потоков на границе массива и воздуха, а также на стыках между различными ветвями, в узлах графа вентиляционной сети формулируется граничное условие для температуры. Пусть узел представляет

сопряжения $N = N_{in} + N_{out}$ ветвей, причем через N_{in} ветвей воздух поступает в сопряжение, а из N_{out} уходит. Из N_{in} входящих ветвей в единицу времени поступает масса воздуха

$$m = \sum_{i=1}^{N_{in}} \rho_i Q_i, \quad (10)$$

имеющая среднюю температуру

$$\tilde{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{N_{in}} \rho_i Q_i T_i, \quad (11)$$

которая в дальнейшем задается на входе во все N_{out} исходящие ветви.

Расчет воздухораспределения в реверсивном режиме для рудника БКПРУ-2

Предложенный метод расчета воздухораспределения реализован в качестве программного модуля «аналитического комплекса «АэроСеть». С использованием данного метода выполнен расчет воздухораспределения в нормальном и реверсивном режиме проветривания для рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий». Для этого построена математическая модель вентиляционной сети рудника БКПРУ-2, состоящая из 356 ветвей. Получено, что доля местных аэродинамических сопротивлений в общем сопротивлении рудника БКПРУ-2 составляет 23%.

На рис. 2 представлен статистический анализ изменения расходов воздуха в ветвях вентиляционного графа рудника БКПРУ-2 при переходе с нормального режима работы ГВУ на реверсивный – функция распределения изменения расходов. В наибольшем количестве ветвей изменение расхода воздуха при реверсировании составляет менее 10%. К интервалу изменения расхода 0–20% относятся выработки с высоким абсолютным значением расхода воздуха – стволы, вентиляционный канал, транспортные и вентиляционные штреки главных направлений. В целом наблюдается следующая тенденция: большему относительному изменению расхода воздуха соответствует меньшее количество ветвей вентиляционного графа. На промежутке от 40 до 100% относительного изменения расхода количество ветвей возрастает. Данному промежутку соответствуют в основном ветви с низким абсолютным значением расхода воздуха на дальних участках главных направлений и панелях, где в силу большой разветвленности

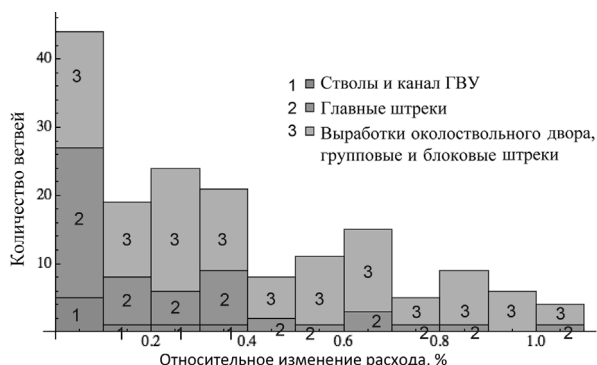


Рис. 2. Функция распределения изменений расходов воздуха в ветвях вентиляционного графа рудника БКПРУ-2

вентиляционной сети при реверсировании ГВУ, воздух существенно меняет траекторию движения. Полученные результаты подтверждают сформулированный в работе [11] тезис: чем дальше горная выработка от основных потоков воздуха через рудник, тем больше относительное изменение расхода воздуха через нее при учете местных сопротивлений, и тем меньше абсолютное изменение расхода. Для стволов и выработок околоствольного двора,

напротив, абсолютное изменение расхода может быть существенно, а относительное – нет.

Сравнительный анализ с результатами экспериментальных исследований, проведенных на руднике БКПРУ-2 во время планового реверсирования ГВУ, показал, что в случае, если при реверсировании ГВУ относительный вклад утечек через надшахтное здание, ляды ГВУ и вентиляционные переемы главных направлений не изменяется, наблюдается хорошее соответствие теоретических и практических результатов. Это обусловлено неучетом изменений утечек через надшахтное здание и ляды ГВУ в теоретической модели.

Научное обоснованное построение детализированной геометрической модели надшахтного здания и прогнозирование на ее основании аэродинамического сопротивления и утечек при реверсировании ГВУ на сегодня не представляется возможным. Это связано с определяющим влиянием случайных факторов на аэродинамическое сопротивление при реверсировании (открытие ворот, наличие щелевидных отверстий внешней поверхности здания, неизвестная шероховатость). Для приближения прогнозного теоретического воздухораспределения к наблюдаемому при реверсировании ГВУ на практике требуется минимизировать влияние случайных факторов на рудниках. Это может быть сделано посредством модификации существующих и разработке новых организационно-технических мероприятий при проведении реверсирования ГВУ:

- Установка и систематический контроль состояния датчиков открытия/закрытия ляд в канале ГВУ.
- Запрет на реверсирование ГВУ до момента срабатывания датчиков открытия реверсивных ляд.
- Герметизация ляд канала ГВУ.
- Строительство двусторонних перемычек на главных направлениях с дверьми, открывающимися в сторону, противоположную друг от друга. Наличие четного количества перемычек обеспечивает наилучшую симметрию аэродинамического сопротивления сбойки при реверсировании воздушной струи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Ф.А., Тянь Р.Б., Потемкин В.Я. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников. – М.: Недра, 1978.
2. Андрияшев М.М. Техника расчета водопроводной сети. – М.: Советское законодательство, 1932.
3. Воронин В.Н. Основы рудничной аэрогазодинамики. – М.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.
4. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д-р. техн. наук. – Пермь, 2012. – С. 32–45.
5. Алыменко Н.И. О выборе рациональных аэродинамических параметров вентиляционных каналов главной вентиляционной установки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 93–102.
6. Газизуллин Р.Р., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Влияние местных сопротивлений на воздухораспределение в рудниках при реверсивном режиме работы главной вентиляционной установки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 5. – С. 227–230.
7. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 324 с.: ил.
8. Харев А.А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей. – М.: Углетехиздат, 1954. – 248 с.
9. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 230 с.
10. Левин Л.Ю., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 9. – С. 200–206.

11. Казаков Б.П. Структурно-классификационный анализ рудничных вентиляционных сетей по типам протекающих в них аэрологических процессов // Сборник докладов ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН. – 2009. – С. 192–194. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Левин Лев Юрьевич – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, e-mail: aerolog_lev@mail.ru,
Семин Михаил Александрович – младший научный сотрудник, магистр механики, e-mail: mishkasemin@gmail.com,
Газизуллин Руслан Рафаилович – инженер, e-mail: gasisullin@yandex.ru,
Горный институт Уральского отделения РАН.

UDC 622.4

NUMERICAL SIMULATION OF AIR DISTRIBUTION VARIATION IN MINE VENTILATION NETWORKS IN CASE OF MAIN FAN REVERSAL

Levin L. Yu.¹, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director on Science Researches, e-mail: aerolog_lev@mail.ru,
Semin M.A.¹, Junior Researcher, Master of Mechanics, e-mail: mishkasemin@gmail.com,
Gazizullin R.R.¹, Engineer, e-mail: gasisullin@yandex.ru,
¹ Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

In this paper we develop a new method of air flow distribution calculation in mine ventilation networks with taking into consideration local aerodynamic resistance, natural ventilation, thermal drop and unsteady heat exchange between mine air and rock mass. Proposed method allows air flow distribution determination in arbitrary mine ventilation networks for different main fan ventilations modes, including main fan reversal mode. Using this method, we accomplished the calculation of air distribution in normal and reversal main fan modes for the Mine-2 of OJSC Uralkali. The results of numerical simulation were compared with results of experimental measurements of air flows and pressures in the Mine-2, obtained during the planned reversal of the main fan.

Key words: reversal of mechanical ventilation, local aerodynamic resistance, main fan, steady-state air distribution, natural ventilation, heat exchange.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Council on Grants of the President of the Russian Federation, Project No. MD-7047.2015.5.

REFERENCES

1. Abramov F.A., Tyan R.B., Potemkin V.Ya. *Raschet ventilyatsionnykh setey shakht i rudnikov* (Design of ventilation networks for coal and ore mines), Moscow, Nedra, 1978.
2. Andriyashov M.M. *Tekhnika rascheta vodoprovodnoy seti* (Design procedure for water mains), Moscow, Sovetskoe zakonodatel'stvo, 1932.
3. Voronin V.N. *Osnovy rudnichnoy aerogazodinamiki* (Mine arogas dynamics principles), Moscow, Ugletekhizdat, 1951, 492 p.
4. Shalimov A.V. *Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya, profilaktiki i bor'by s avariynymi narusheniyami provetrivaniya rudnikov* (Theoretical bases for forecasting, preventing and combating breakdowns in mine ventilation), Doctor's thesis, Perm, 2012, pp. 32–45.
5. Alymenko N.I. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2011, no 6, pp. 93–102.
6. Gazizullin R.R. Levin L.Yu., Zaytsev A.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 5, pp. 227–230.
7. Mokhirev N.N., Rad'ko V.V. *Inzhenernye raschety ventilyatsii shakht. Stroitel'stvo. Rekonstruktsiya. Eksploatatsiya* (Engineering designs of mine ventilation. Construction. Reconstruction. Operation), Moscow, ООО «Nedra-Biznestsentr», 2007, 324 p.
8. Kharev A.A. *Mestnye soprotivleniya shakhtnykh ventilyatsionnykh setey* (Local drags in mine ventilation networks), Moscow, Ugletekhizdat, 1954, 248 p.
9. Merenkov. A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskiykh tsepey* (Theory of hydraulic circuits), Moscow, Nauka, 1985, 230 p.
10. Levin L.Yu., Semin M.A., Gazizullin R.R. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 9, pp. 200–206.
11. Kazakov B.P. *Sbornik dokladov ezhegodnoy nauchnoy sessii Gornogo instituta UrO RAN* (Proceedings of Annual Scientific Session of the Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences), Perm, 2009, pp. 192–194.