УДК 622.411

Б.П. Казаков, А.В. Шалимов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫХОДА ВОЗДУШНЫХ МАСС ИЗ ВЫРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ РУДНИКА ПОСЛЕ ОСТАНОВКИ ИЛИ РЕВЕРСИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКА ТЯГИ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ*

Рассмотрены вопросы прогнозирования газовой обстановки в руднике в аварийном режиме проветривания, связанном с отключением или реверсированием нагнетающего вентилятора. Проведена аналитическая оценка величины расхода и времени истечения застойного воздуха из выработанного пространства после прекращения работы источника тяги. Разработана феноменологическая модель нестационарного движения потоков сжимаемой воздушной среды по рудничной сети на основе уравнений Кирхгофа с поправками на инерционность и сжимаемость воздуха в сопряжениях горных выработок. Расчетным путем смоделирована динамика переходных вентиляционных процессов на упрощенной сети рудника после изменения режима работы вентилятора. Показано, что после его остановки расходы воздуха уменьшаются линейно, что согласуется с результатами аналитических исследований, а после реверсирования выход на стационарный режим обратного проветривания происходит асимптотически, и значительно дольше. На основе анализа сетевых моделей нестационарного воздухораспределения различного уровня сложности сделан вывод об оптимальности феноменологического подхода, позволяющего получать результаты приемлемой точности без значительного увеличения вычислительной ресурсоемкости.

Ключевые слова: главная вентиляционная установка, реверсирование, выработанное пространство, нестационарное воздухораспределение, сжимаемость, инерционность, аэродинамическое сопротивление, атмосферное давление.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-76-81

Оценка газовой обстановки в аварийных режимах проветривания рудников, связанных со сменой режима работы главной вентиляционной установки, должна основываться на представлении воздуха в виде сжимаемой среды. Быстрое изменение депрессии или напора вентилятора инициирует процессы сжатия-разрежения воздуха, интенсивность которых сравнима по величине с общим изменением движения воздушных потоков за счет изменения тяги. В случаях отключения или реверсирования нагнетающего источника тяги из непровет-

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 17-45-590973 р_а «Разработка методов прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания горнодобывающих предприятий».

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 11. С. 76–81.
© Б.П. Казаков, А.В. Шалимов. 2017.

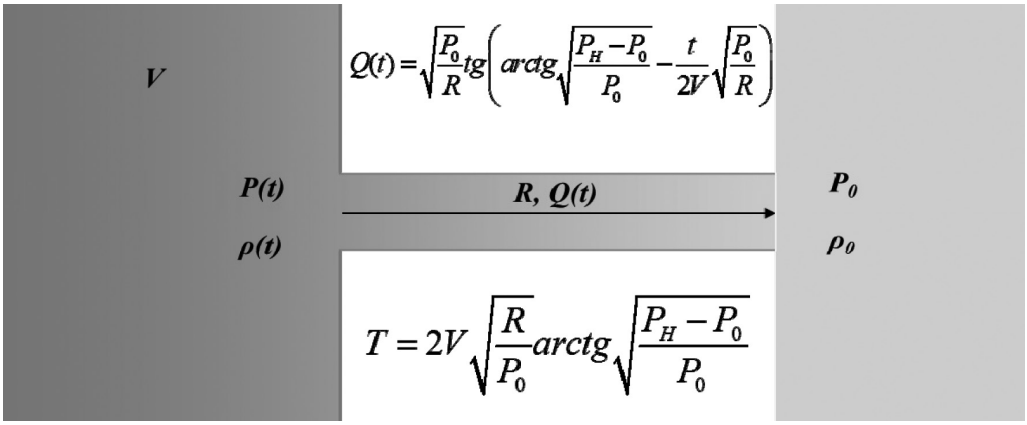

Рис. 1. Выход избыточного количества воздуха из выработанного пространства рудника: t, с — текущее время, область определения от 0 до *T*; *T*, с — время выхода избыточного воздуха из выработанного пространства; *Q*(*T*), м^3/с — текущий расход воздуха из выработанного пространства в рудничную сеть; *R*, кг/м^7 — аэродинамическое сопротивление пути, соединяющего выработанное пространство с сетью; *V*, м^3 — объем выработанного пространства; P_0, Па — внешнее давление воздуха на выходе; $P_н > P_0$, Па — начальное давление воздуха в выработанном пространстве: ρ_0, кг/м^3 — плотность внешнего воздуха на выходе; $\rho_н > \rho_0$, кг/м^3 — начальная плотность воздуха в выработанном пространстве

риваемых выработанных пространств рудника выделяется значительное количество застойного воздуха с высокой концентрацией вредных и горючих газов, что представляет опасность в случае превышения ими предельно допустимых концентраций в действующих выработках [1].

Не сложный аналитический расчет позволяет сделать оценку величины скорости и времени истечения сжатого воздуха из большой замкнутой полости (рис. 1).

При сопротивлении пути выхода в 0,01 кмюрг истечение воздуха из выработанного пространства объемом 1 млн м^3 после остановки вентилятора нагнетательного действия происходит по расчету в течение 10 мин.

Приведенный пример дает количественную оценку влияния сжимаемости воздуха на его движение после отключения источника тяги, но не отражает всей сложности процесса, т.к. в реальности: выработанное пространство — это не просто большая воздушная полость, а сложная система выработок, каждая из которых имеет внутреннее аэродинамическое сопротивление; система эта связана с действующими выработками не в одном, а в нескольких местах; сжатие воздуха происходит не только в выработанном пространстве, но и в действующих выработках также. Поэтому точное решение возможно лишь на основе численного решения задачи в сетевой постановке.

В целях упрощения ресурсоемкости модели воздух полагается сжимаемым только в сопряжениях выработок, вмещающих в себя половину массы рудничного воздуха прилегающих выработок. Стоки и истоки воздуха в сопряжениях задаются поправками в уравнениях 1-го закона сетей, определяющими интенсивность сжатия или разрежения воздуха в узлах под действием сил давления. В систему уравнений Кирхгофа [2] добавлены инерционное слагаемое в контурных уравнениях и ненулевой баланс расходов в сопряжениях, моделирующий сжимаемость воздуха (рис. 2).

Быстро сходящиеся специализированные методы проведения вентиляционных расчетов (последовательных приближений, контурных расходов, узловых давлений или градиентные [3—7]) для решения этой системы уравнений не пригодны, поскольку предполагают нулевой баланс расходов в узлах сети, поэтому используется стандартный метод Ньютона [8].

На каждом шаге по времени производятся увязка расходов воздуха по всем выработкам, при этом в ней участвуют: напоры источников тяги, если они заданы напорными характеристиками; аэродинамические сопротивления выработок, если в них находятся регулируемые вентиляционные двери (при моделировании работы систем автоматического управления проветриванием); давление воздуха в сопряжениях, которое определяется на каждой итерации по сумме падений депрессии в выработках, соединяющих текущий узел с атмосферой с фиксированным значением давления и плотности воздуха в сопряжениях, уточняющие баланс расходов и потери депрессии на линейных аэродинамических сопротивлениях выработок.

По сути, представленная модель нестационарного движения потоков сжимаемого воздуха является интегральным аналогом дифференциальных уравнений гидравлического удара, в которых пространственная сетка укрупнена до размеров выработок [9, 10].

На рис. 3 приведены результаты расчета движения воздушных потоков в выработках модельной сети после останова и реверсирования вентилятора. Выработка № 2 обозначает выработанное пространство объемом в 20 млн м^3, напор источника тяги 500 даПа направлен сначала на сжатие воздуха в выработанном пространстве. Смоделированы варианты: остановки вентилятора и его реверсирования до депрессии той же величины.

При остановке ГВУ, как и для случая одной выработки, динамика расходов характеризуется конечным временем прекращения движения воздуха в течение 20 мин, уменьшение расхода происходит линейно, что согласуется с полученными

$$\begin{cases} \sum_j (\pm q_{j,k}^{(s)}) = -\dfrac{P_k^{(s)}(\{q_j\}) - P_{k-1}^{(s)}}{t_k - t_{k-1}} \dfrac{\rho_{k-1}^{(s)}}{2P^{(0)}} \sum_j L_j^{(s)} S_j^{(s)} \\ \sum_j (\pm) \left(\dfrac{R_j(t)}{\left(\overline{\rho}_{j,k-1}\right)^2} q_{j,k}^{(i)} \left| q_{j,k}^{(i)} \right| + \dfrac{q_{j,k}^{(i)} - q_{j,k-1}^{(i)}}{t_k - t_{k-1}} \dfrac{L_j}{S_j} \right) = \sum_j (\pm \Delta\pi_{j,k}^{(i)}(q_j, t)) \end{cases}$$

Рис. 2. Законы вентиляционных сетей для расчета нестационарного движения потоков сжимаемого воздуха в руднике: k, j, s, i — номера моментов времени, выработок (от 1 до *n*), сопряжений (от 1 до *v*—1) и независимых контуров (от 1 до *n*—(*v*—1)); *R*(*t*) (кг/м^7), Δπ(*q*, *t*) (Па), *q*(*t*) (кг/с) — аэродинамические слпротивления выработок, напоры источников тяги и искомые значения массовых расходов воздуха; ρ(*t*) и ρ(*t*) (кг/м^3) — плотность воздуха в сопряжении и средняя плотность воздуха по выработке; *t* (с), *L* (м), *S* (м^2) — время, длины и сечения выработок; *P*(0) (Па), *P*(*t*) (Па) — атмосферное давление и давление воздуха в сопряжении

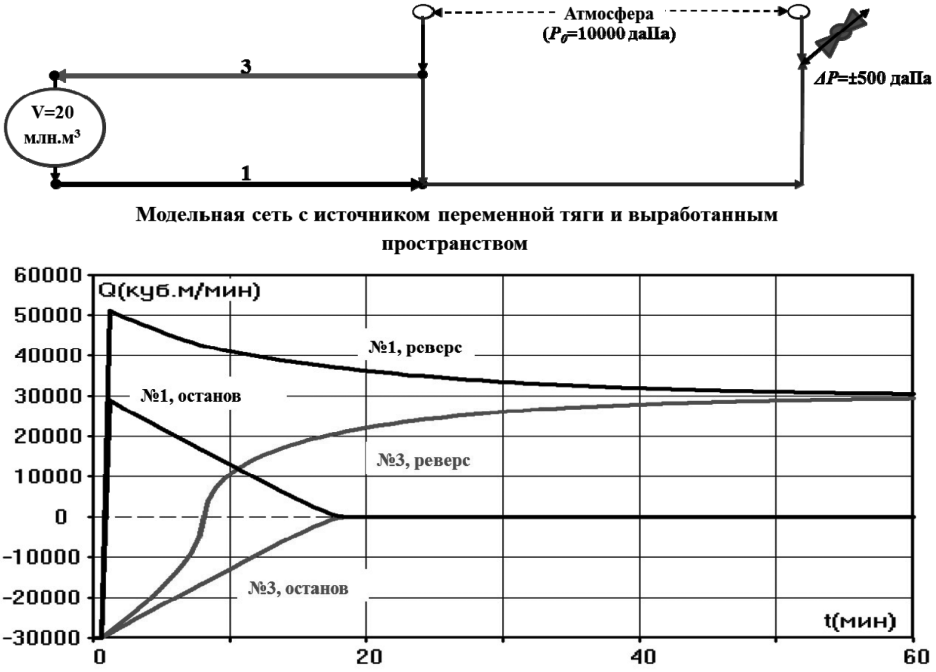

Рис. 3. Динамика расходов воздуха на выходе из выработанного пространства после останова и реверсирования ГВУ

аналитическими зависимостями (рис. 1). Динамика реверсивного движения воздуха отличается качественно и количественно, время протекания переходного процесса значительно больше, режим релаксации не линеен с асимптотическим выходом на стационарный режим.

По результатам проведенных исследований способов моделирования нестационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях рудников [9, 11—13] установлено, что оптимальное сочетание точности и скорости расчета дает полуаналитическая модель движения сжимаемых воздушных потоков, построенная на решении алгебраических сетевых уравнений с поправками на инерционность и сжимаемость. Физически обоснованная структура поправок обеспечивает адекватность расчетных результатов применительно к распределению расходов между выработками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кошель А. В., Исаевич А. Г.* Оценка возможности применения нагнетательного способа проветривания на калийных рудниках // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — 2016. — № 1. — С. 218—223.

2. *Шалимов А. В.* Численное моделирование газовоздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимов проветривания рудников и шахт // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2011. — № 6. — С. 84—92.

3. *Меренков А. П., Хасилев М. Ю.* Теория гидравлических цепей. — М., 1985. — С. 279.

4. *Казаков Б. П., Шалимов А. В.* Сравнительный анализ методов расчета воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях // Горное эхо. Вестник Горного института УрО РАН. — 2009. — № 1 (35). — С. 17—20.

5. *Шалимов А. В.* Адаптация метода узловых давлений к расчетам воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2011. — № 1. — С. 95—101.

6. *Cross H.* Analysis of flow in networks of conduits or conductors // Engineering Experiment Station, University of Illinois. — 1936. — P. 38.

7. *Todini E., Pilati S.* A gradient method for the analysis of pipe networks // International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK, September 8—10. — 1987.

8. *Амосов А. А.*, *Дубинский Ю. А.*, *Копченова Н. В.* Вычислительные методы для инженеров. — М.: Высшая школа. — 1994. — 544 с.

9. *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.

10. *Patankar S. V.* Numerical heat transfer and fluid flow. — Taylor and Francis. — 1981. — P. 196.

11. *Постникова Ю. М.* Влияние выработанных пространств на вентиляцию рудников в переходный период аварийной вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 3. — С. 206—209.

12. *Wang S., Liu B., Liu S.* Computer Simulation of Unsteady Airflow Processes in Mine Venilation Networks // Journal of liaoning technical university (natural science edition). — 2000. — 05. — P. 21—29.

13. *Лискова М. Ю.* Влияние выработанных пространств на воздухораспределение при включении гву после ее длительной остановки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2013. — № 2. — С. 51—56. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Казаков Борис Петрович[1] — доктор технических наук,
профессор, главный научный сотрудник,
e-mail: aero_kaz@mi-perm.ru,
Шалимов Андрей Владимирович[1] — доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: shalimovav@mail.ru,
[1] Горный институт
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 11, pp. 76–81.

UDC 622.411

B.P. Kazakov, A.V. Shalimov

MODELING OF DYNAMICS OF AIR OUTFLOW FROM UNDERGROUND MINED-OUT VOIDS AFTER SHUTDOWN OR REVERSE OF BLOWING VENTILATION SOURCE

The problems of prediction of the gas situation in the mine in an emergency mode of ventilation that is associated with shutdown or reversal of the blower. The analytical estimation of the flow rate and the time of expiration of stagnant air from the goaf after termination of a thrust source. Developed a phenomenological model of nonstationary flow of compressible air environment at the mining network on the basis of the Kirchhoff equations with the amendments to the inertia and compressibility of air in the mates of mine workings.

By calculation, the simulated transient dynamics of ventilation processes in a simplified network of the mine after changing the mode of operation of the fan. It is shown that after it stops the air flow

decreases linearly, which is consistent with the results of analytical studies, and after reversing of the output at steady-state reverse ventilation occurs asymptotically, and for much longer.

Based on the analysis of network models of unsteady air distribution at different levels of complexity, a conclusion about the optimality of the phenomenological approach, which allows to obtain results of acceptable accuracy without a significant increase in computational cost.

Key words: home ventilation installation, reversal, mined-out space, non-stationary distribution, compressibility, inertia, aerodynamic drag, atmospheric pressure.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-76-81

AUTHORS

Kazakov B.P.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, e-mail: aero_kaz@mail.ru,
Shalimov A.V.[1], Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: shalimovav@mail.ru,
[1] Mining Institute of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 17-45-590973 r_a: Development of methods to predict, prevent and combat ventilation accidents in mines.

REFERENCES

1. Koshel' A.V., Isaevich A.G. *Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i nefte promyslovogo oborudovaniya*. 2016, no 1, pp. 218—223.

2. Shalimov A.V. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2011, no 6, pp. 84—92.

3. Merenkov A.P., Khasilev M.Yu. *Teoriya gidravlicheskikh tsepey* (Theory of hydraulic circuits), Moscow, 1985, pp. 279.

4. Kazakov B.P., Shalimov A.V. *Gornoe ekho. Vestnik Gornogo instituta UrO RAN*. 2009, no 1 (35), pp. 17—20.

5. Shalimov A.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2011, no 1, pp. 95—101.

6. Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. *Engineering Experiment Station*, University of Illinois. 1936. P. 38.

7. Todini E., Pilati S. A gradient method for the analysis of pipe networks. *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic, UK, September 8—10. 1987.

8. Amosov A.A., Dubinskiy Yu.A., Kopchenova N.V. *Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov* (Computational methods for engineers), Moscow, Vysshaya shkola, 1994, 544 p.

9. Kruglov Yu.V., Levin L.Yu., Zaytsev A.V. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2011, no 5, pp. 100—108.

10. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor and Francis. 1981. P. 196.

11. Postnikova Yu.M. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 3, pp. 206—209.

12. Wang S., Liu B., Liu S. Computer Simulation of Unsteady Airflow Processes in Mine Venilation Networks. *Journal of liaoning technical university (natural science edition)*. 2000—05, pp. 21—29.

13. Liskova M.Yu. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2013, no 2, pp. 51—56.