

Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, Е.Л. Гришин

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ
В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ПРОВЕТРИВАНИЯ
ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ***

Рассмотрены разработка и совершенствование методов прогнозирования нарушений проветривания горнодобывающих предприятий на базе комплексного математического моделирования нестационарных аэротеплогазодинамических процессов, позволяющих осуществлять детальное планирование мероприятий по профилактике и борьбе с рудничными авариями. Приведен обзор разработанных математических моделей с описанием сферы применимости и аналитических выводов, полученных при их использовании для описания аварийных аэрологических и теплофизических процессов. Отмечена новизна результатов, полученных в ходе проведенных научно-исследовательских работ. Представлены программные продукты для проведения численного моделирования процессов, протекающих в рудниках в штатных и аварийных режимах проветривания.

Ключевые слова: воздухораспределение, системы контроля и управления, тепло- и массообмен, аэрологические и теплофизические процессы, тепловые депрессии, естественная тяга, устойчивость проветривания, сопряжение горных выработок, реверсирование, рециркуляционное проветривание, план ликвидации аварий.

Практически все работающие сегодня шахты и рудники построены в годы советского периода и рассчитаны на технические нормы того времени. Многократно увеличившиеся в размерах выработанные подземные пространства являются источником повышенной опасности для работающих в них людей в случае возникновения нештатных ситуаций, в частности связанных с нарушением проветривания горных выработок. В целях обеспечения безопасности горных работ добыча полезных ископаемых в современных условиях сопровождается разработкой и внедрением новых технологических схем вентиляции с использованием дополнительных источников тяги и элементов регулирования воздухораспределения. В связи

с участвовавшими в последнее время авариями, связанными с гибелью шахтеров, особое значение приобретают исследования направленные на разработку систем контроля за состоянием и управления движением воздуха с целью не допущения скопления в нем взрывоопасных и вредных газов. Исследования процессов движения воздуха, переноса тепла, дыма и газов непосредственно во время аварий также необходимы, поскольку позволяют делать выводы относительно наиболее безопасных путей выхода людей на поверхность и способов скорейшей ликвидации аварий и их последствий. Исследования аэро- и теплогазодинамических процессов, протекающих в аварийных режимах проветривания, в частности во время пожаров, явля-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 15-05-04552 А и № 13-05-96013 р_урал_а.

ются основой для разработки комплекса мероприятий, направленных как на предотвращение возникновения аварий, так и на управление аварийным проветриванием в реальном времени.

Решение научных проблем контроля, прогнозирования и управления микроклиматическими параметрами рудничной атмосферы связаны с именами А.Н. Щербаня, О.А. Кремнева, Ю.Д. Дядькина, А.Ф. Воропаева, К.З. Ушакова, И.И. Медведева, А.Е. Красноштейна, V. Hiramatsu, J. Kokado, E. Mundry и других ученых, которые разработали общие основы рудничной аэрологии и теплофизики, являющиеся инструментом обеспечения безопасных условий ведения горных работ. Исследования и совершенствование моделей рудничных аэрологических процессов в мировой науке идет по четырем основным направлениям – 1) развитие методов расчета стационарного воздухораспределения; 2) исследование процессов тепло- и массопереноса; 3) разработка методов моделирования быстро протекающих аварийных процессов и 4) разработка энергосберегающих способов управления проветриванием. Одновременно имеет место тенденция интеграции всех направлений с целью представления проветривания вентиляционных сетей в виде единого аэротеплогазодинамического процесса. В связи с бурным развитием вычислительной техники в последние десятилетия, достигнут значительный прогресс в комплексном многофакторном моделировании, особенно в реализации численных методов расчета и практическом использовании результатов применительно к обеспечению безопасных условий ведения горных работ. Первое направление моделирования, связанное с решением сетевых задач воздухораспределения является базовым, поскольку разработка моделей второго (тепло- и массоперенос) и четвертого направлений (управление

вентиляцией) в конечном итоге приводит к необходимости их сетевой адаптации, а третье направление является доработкой первого учетом инерционных свойств воздушных потоков.

На базе многолетних исследований сложных аэрологических процессов, протекающих в рудничных вентиляционных сетях в различных условиях, разработаны теоретические основы моделирования аварийных ситуаций, связанных с нарушением нормального проветривания горнодобывающих предприятий. Основные научные результаты исследований могут быть сформулированы следующим образом.

1) Решена математически и реализована численно сопряженная задача теплообмена с учетом следующих факторов: конечного значения коэффициента теплоотдачи, переменного по длине расхода воздуха (учет ответвлений), переменной по времени температуры воздуха на входе (атмосферные, суточные и сезонные колебания температуры), поглощения и выделения тепла при испарении и конденсации влаги, наличия геотермической ступени, а также двухслойности массива (крепь стволов), позволяющая адекватно и точно описывать процессы теплообмена рудничного воздуха с породным массивом в условиях больших перепадов температур в широких временных интервалах, от нескольких секунд до нескольких лет. Установлено, что расчет непродолжительных теплообменных процессов, происходящих, как правило, в аварийных режимах проветривания, должен производиться в приближении малых времен, что эквивалентно решению задачи теплообмена в плоском слое. Построенная математическая модель дает возможность рассчитывать сложные теплообменные и связанные с ними физические процессы, происходящие в рудниках и формирующие их микроклимат. Преимущество данной модели теплообмена

вентиляционного воздуха с породным массивом заключается в том, что методом вычислений является реальная, а не модельная, физическая характеристика – температура, погрешность вычисления которой можно оценить и сделать сколь угодно малой при численном расчете [1].

2) Разработан алгоритм расчета нестационарных процессов движения воздуха по горным выработкам в условиях меняющихся тепловых депрессий и напоров источников тяги, в основу которого положен современный быстрый сходящийся численный метод расчета стационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях – метод контурных расходов. Определены условия применимости квазистационарного приближения этого метода для вычисления переменных расходов воздуха. В постановке задачи расчета быстропотекающих переходных процессов учтено, что потенциальная энергия давления идет не только на преодоление аэродинамического сопротивления выработок, но и, частично, на изменение кинетической энергии движения воздуха. Установлено, что часть эта будет тем больше по сравнению с потерями энергии на трение, чем быстрее происходят изменения расходов. По результатам численных экспериментов сделан вывод, что инерционность воздуха, не учитываемая при моделировании стационарных и медленных нестационарных режимов проветривания, должна быть учтена при описании быстрых переходных процессов, происходящих, как правило, во время аварий [2].

3) Разработан алгоритм численного решения нестационарной задачи распространения тепла и примесей в атмосфере горных выработок на базе модели идеального вытеснения. Алгоритм реализован численно в предположении несущественности медленных диффузионных процессов на фоне

кондуктивного теплопереноса быстрым воздушным потоком. Интегрированный в методы расчета нестационарного воздухораспределения алгоритм идеального вытеснения позволяет отслеживать направления движения и изменения концентрации вредных газов, дыма, пыли и тепла в сложных вентиляционных условиях при наличии большого количества источников тяги и тепловых депрессий [3].

4) Дано математическое описание изменений теплофизических характеристик рудничного воздуха с учетом его сжимаемости. Исследованы и проанализированы следующие термодинамические механизмы, влияющие на движение воздуха – нагрев воздуха в результате его гидростатического сжатия в стволах, совершение работы силами давления при сжатии-расширении воздуха, а также зависимость сопротивления выработок движению воздуха от его объемного расхода [4]. Показано, что влияние данных механизмов на проветривание следует учитывать, в частности, в случае отключения ГВУ. Изучена динамика тепловых депрессий во время пожаров и их влияние на движение воздуха в горных выработках с учетом расслоения конвективных потоков по сечению горных выработок [5]. На основе решения задачи сопряженного теплообмена между вентиляционным воздухом и породным массивом и разработанного алгоритма численного решения нестационарной задачи распространения газовых примесей по выработкам смоделированы изменения тепло-, газо-, воздушной ситуации на руднике после возникновения пожара. Полученные математические зависимости позволяют рассчитывать изменения величин и направлений движения воздушных потоков, их температур и задымленности в процессе пожара.

5) На основании анализа экспериментальных данных и результатов чис-

ленных экспериментов установлено, что пренебрежение потерей депрессии на сопряжениях горных выработок приводит к ошибкам, существенно превышающим погрешности измерений при проведении ВДС в следующих ситуациях: сопряжения стволов с горизонтами, калориферными и вентиляционными каналами; участки вентиляционных сетей с большой плотностью узлов и рудники с выработками больших сечений. В соответствии с законом сохранения импульса в местах слияния-разделения воздушных потоков разработан универсальный подход к моделированию узловых сопротивлений. Полученные формулы обеспечивают количественный учет влияния сопротивлений сопряжений произвольной размерности на воздухораспределение в вентиляционной сети в единой форме и интегрируются в метод контурных расходов после внесения соответствующих изменений в исходные формулы метода. Произведена проверка зависимостей для расчета потерь депрессии на сопряжениях горных выработок путем сравнения с результатами численного моделирования воздухораспределения в программной среде ANSYS [6].

6) Установлено, что во время отключения главной вентиляционной установки (ГВУ) или ее работе с малой производительностью (в реверсивном режиме) ощутимое влияние на движение воздуха по вентиляционным стволам и через рудник в целом начинает оказывать конвективная сила, вызванная разностью плотностей воздуха различной температуры. В одних условиях конвекция эта приводит к возникновению устойчивой естественной тяги, проветривающий рудник, в других – к движению воздуха только внутри вентиляционных и воздухоподающих стволов. На основании проведенных исследований определены условия и критерии реализации того или иного

режима конвективного движения воздуха в вентиляционных стволах после отключения или реверсирования ГВУ. Определены факторы, влияющие на возникновение и устойчивость этих режимов, к которым, прежде всего, следует отнести геометрию сопряжений стволов с горизонтами и начальные условия, определяющие специфику переходных процессов движения воздуха сразу после отключения или реверсирования ГВУ [7].

7) На примере вентиляционной сети калийного рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий» определены варианты наиболее безопасных путей вывода людей из рудника по результатам численного моделирования развития различных пожаров. При этом установлено, что в зависимости от конкретных условий, а именно, места и интенсивности пожара, а также прошедшего с начала его возникновения времени, эти пути оказываются различными.

8) На основе комплексного компьютерного моделирования разработаны методы управления азотеплогазодинамическими процессами в руднике с помощью устройств отрицательного и положительного регулирования воздухораспределения [8].

При разработке моделей следующие исследовательские работы были проведены впервые:

- определены критерии устойчивости проветривания горных выработок во время рудничных аварий, основанные на математическом моделировании динамики тепловых депрессий в условиях интенсивного теплообмена между воздухом и породным массивом;
- разработана методика численного прогноза начальной стадии развития экзогенного рудничного пожара, позволяющая определять направления движения, температуру и задымленность воздушных потоков;

- изучено воздействие тепловой стратификации скоростей движения воздушных потоков по сечению горных выработок на процессы теплогазопереноса и устойчивость проветривания;

- построена математическая модель промерзания крепи вентиляционного ствола после реверсирования главной вентиляционной установки в холодный период года, основанная на решении задачи сопряженного теплообмена между воздухом и двухслойным массивом операционным методом [9];

- дана количественная оценка влияния инерционности воздушных потоков и сжимаемости воздуха в выработанных пространствах на протекание переходных процессов, связанных с остановом или реверсированием главных вентиляционных установок, а также внезапным возникновением мощных тепловых депрессий при возгораниях в наклонных выработках;

- установлены возможные режимы проветривания калийных рудников естественной тягой после аварийного отключения вентилятора в зависимости от топологии вентиляционной сети, времени года и начальных условий [7];

- получены математические зависимости для определения потерь депрессии на сопряжениях горных выработок, необходимые при проведении

вентиляционных расчетов применительно к рудникам с большим эквивалентным отверстием;

- определены условия безопасного использования систем рециркуляционного проветривания для предупреждения возникновения аварийных ситуаций, связанных с прекращением поступления свежего воздуха на проветриваемые участки, выраженные в недопущении критического соотношения величин депрессии главной вентиляционной установки, напора рециркуляционного источника тяги и аэродинамических сопротивлений участков [10].

Все представленные в статье математические модели реализованы численно и используются для проведения технических расчетов. Большая часть из них интегрирована в аналитический комплекс «АэроСеть» [11], позволяющий производить комплексное моделирование аэрологических и теплофизических процессов, протекающих в рудниках, как в штатных, так и в аварийных режимах проветривания. Для работы с аварийными вентиляционными режимами разработан отдельный программный модуль «План ликвидации аварий» [12], с помощью которого осуществляется детальное планирование аварийных мероприятий, в частности путей и времени вывода людей на поверхность при возникновении рудничных пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красноштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. Моделирование процессов нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 5. – С. 77–85.

2. Шалимов А.В., Зайцев А.В., Гришин Е.Л. Учет инерционных сил движения воздуха при расчетах нестационарного воздухораспределения в вентиляционной сети // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 4. – С. 218–222.

3. 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. 64–68.

4. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Термодинамические механизмы возникновения рудничных тепловых депрессий и их влияние на проветривание // Горное эхо. Вестник горного института. – 2006. – № 4. – С. 40–44.

5. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Конвективная стратификация воздушных пото-

ков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания // Горный журнал. – 2014. – № 12. – С. 105–109.

6. 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. 200–205.

7. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage // International Journal Heat Mass Transfer. – 2015. – № 86. – pp. 288 – 293.

8. Круглов Ю.В., Семин М.А., Зайцев А.В. Математическое моделирование работы оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2011. – № 2. – С. 116–126.

9. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Теплообмен вентиляционного воздуха с крепью воздухоподающего ствола и породным массивом // Физико-технические

проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 92–100.

10. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Трушкова Н.А. К оценке аварийных ситуаций при проектировании рециркуляционных систем // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 132–137.

11. Мальков П.С., Зайцев А.В., Кашников А.В., Кормшиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Казаков Б.П., Шалимов А.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015610589 Аналитический комплекс «АэроСеть». Федеральная служба по интеллектуальной собственности, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 января 2015 года.

12. Гришин Е.Л., Казаков Б.П., Кашников А.В., Киряков А.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Шалимов А.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011616768 «План ликвидации аварий». Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31 августа 2011 года. **ГИАВ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Казаков Борис Петрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: aero_kaz@mi-perm.ru,
Шалимов Андрей Владимирович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: shalimovav@mail.ru,
Гришин Евгений Леонидович – кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: aeroevg@mail.ru,
Горный институт Уральского отделения РАН.

UDC 622.411

DEVELOPMENT OF AIR FLOW AND HEAT DISTRIBUTION MODELS FOR EMERGENCY MINE VENTILATION MODES

Kazakov B.P.¹, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, e-mail: aero_kaz@mi-perm.ru,
Shalimov A.V.¹, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: shalimovav@mail.ru,
Grishin E.L.¹, Candidate of Technical Sciences, Researcher, e-mail: aeroevg@mail.ru,
¹ Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

This paper is about development and improvement of mine ventilation violations forecasting method based on complex mathematical simulation of unsteady air flow and heat distribution, enabling detailed planning of mine emergencies prevention and control measures. We provide an overview of developed mathematical models, describe the scope of their applicability and analyze the results obtained in the process of application to emergency aerodynamic and thermal processes description. The novelty of obtained result during the research work is noted. Programming software for the numerical modeling of the processes occurring in the mines in regular and emergency ventilation modes is presented.

Key words: air distribution, control and management systems, heat and mass transfer, aerodynamic and thermal processes, thermal drop, natural draft, ventilation sustainability, mine airways junction, reversal mode, recirculation, emergency response plan.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Projects Nos. no 15-05-04552 A and no 13-05-96013 r_ural_a.

REFERENCES

1. Krasnoshteyn A.E., Kazakov B.P., Shalimov A.V. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2007, no 5, pp. 77–85.
2. Shalimov A.V., Zaytsev A.V., Grishin E.L. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 4, pp. 218–222.
3. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2010, no 2, pp. 64–68.
4. Kazakov B.P., Shalimov A.V. *Gornoe ekho. Vestnik gornogo instituta*. 2006, no 4, pp. 40–44.
5. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A., Grishin E.L., Trushkova N.A. *Gornyy zhurnal*. 2014, no 12, pp. 105–109.
6. Levin L.Yu., Semin M.A., Gazizullin R.R. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 9, pp. 200–205.
7. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage. *International Journal Heat Mass Transfer*. 2015, no 86. pp. 288–293.
8. Kruglov Yu.V., Semin M.A., Zaytsev A.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2011, no 2, pp. 116–126.
9. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2011, no 5, pp. 92–100.
10. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Trushkova N.A. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no 1, pp. 132–137.
11. Mal'kov P.S., Zaytsev A.V., Kashnikov A.V., Kormshchikov D.S., Kruglov Yu.V., Levin L.Yu., Kazakov B.P., Shalimov A.V. *Certificate of official registration of computer programs No 2015610589*, 14.01.2015.
12. Grishin E.L., Kazakov B.P., Kashnikov A.V., Kiryakov A.S., Kruglov Yu.V., Levin L.Yu., Shalimov A.V. *Certificate of official registration of computer programs No 2011616768*, 31.08.2011.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ КИРПИЧНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ

Ишкин Егор Сергеевич – эксперт, e-mail: ies-san@yandex.ru,
Легаев Вадим Расимович – эксперт, e-mail: vadimlegaev@yandex.ru,
Драгунов Павел Сергеевич – главный специалист, e-mail: p.dragunov89@mail.ru,
Смышляев Сергей Александрович – эксперт, e-mail: smyshlsa@yandex.ru,
ООО «СИБЭО».

Рассмотрены особенности и проблемы, возникающие при обследовании и оценке технического состояния промышленных дымовых труб. Акцентировано внимание на примеры характерных дефектов и повреждений, на которые следует обращать внимание в ходе визуального обследования сооружений. В качестве примеров для анализа проведения технического обследования использованы кирпичные дымовые трубы высотой 45–75 м, расположенные на промплощадках предприятий Сибирского федерального округа.

Ключевые слова: кирпичные трубы, несущие строительные конструкции, безопасность, техническое обследование.

TECHNICAL INSPECTION OF INDUSTRIAL BRICK CHIMNEYS

Ishkin E.S.¹, Expert, Legaev V.R.¹, Expert, Dragunov P.S.¹, Chief Specialist, Smishlyaev S.A.¹, Expert,

¹ Siberian Expert Organization, Prokopenvsk, Russia.

We describe the features and inconveniences during the survey and diagnostic technical condition of industrial brick chimneys. We pay attention to examples of distinctive defects and damage that you should identify during the visual inspection of structures. We use industrial brick chimneys with the height of 45–75 meters located at industrial sites of the Siberian Federal district as an examples for the analysis of technical survey.

Key words: brick chimneys, bearing constructions, safety, technical survey.