

А.Ю. Ермаков, Н.М. Качурин, Вал.В. Сенкус

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ВЕНТИЛЯЦИИ И БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПО АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОМУ ФАКТОРУ

Аннотация. Предложенные научной школой МГГУ методические подходы к метановой безопасности высокопроизводительной очистной выемки угля справедливы и для методических положений оценки метановой опасности при очистных работах и проведении подготовительных выработок, поэтому необходимо развивать системные принципы технологии снижения риска техногенных аварий в угольных шахтах, которые основываются на моделировании риска по аэрологическому и газовому факторам, а также моделировании газовой ситуации при появлении предвестников взрывоопасного состояния шахтного воздуха. На основе экспериментальных и теоретических исследований установлены новые и уточнены существующие закономерности движения метана в угольных пластах и вмещающих породах, что позволяет разработать теоретические положения, научно обосновывающие технологии снижения риска и локализации последствий взрывов метановоздушной смеси в угольных шахтах, комплекс программных средств для мониторинга аэрогазодинамического состояния горных выработок с учетом влияния геотехнологических процессов при больших нагрузках на очистные забои.

Ключевые слова: системный подход, обеспечение, вентиляция, безопасность, угольная шахта, аэрогазодинамический фактор.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-212-218

Статистический анализ аварий в угольных шахтах по аэрогазодинамическому фактору показывает, что эффективность существующих методов для прогнозирования риска взрывов метановоздушной смеси в горных выработках угольных шахт, физическая модель и математическое описание угрозы возникновения взрывоопасных газовых ситуаций в горных выработках угольных шахт является неудовлетворительной, что наглядно иллюстрируется динамикой взрывов метана и их последствий на угольных шахтах России, представленной в работах [2, 5–12]. Наиболее опасными в отношении взрывов метана являются очистные и подготовительные забои [3–4], то есть горные выработки, где происходит непосредственное разрушение уголь-

ного пласта и формирование поверхностей обнажения, являющихся источниками метановыделения.

Разработанные в научной школе МГГУ методические подходы к метановой безопасности высокопроизводительной очистной выемки угля справедливы и для методических положений оценки метановой опасности при очистных работах и проведении подготовительных выработок, поэтому необходимо развивать системные принципы технологии снижения риска техногенных аварий в угольных шахтах, которые основываются на моделировании риска по аэрологическому и газовому факторам, а также моделировании газовой ситуации при появлении предвестников взрывоопасного состояния шахтного воздуха.

Обоснованные теоретические положения о необходимости оценки метановой опасности очистных и подготовительных участков для разработки эффективной технологии, позволяют снизить риск возникновения взрывов метана, но требуют исследований закономерности нарушений состава рудничной атмосферы метанообильных шахт и создания инновационного технологического комплекса распознавания взрывоопасных ситуаций и локализации последствий взрывов метановоздушной смеси, обеспечивающего необходимый уровень безопасности при ведении горных работ на угольных шахтах с высокой нагрузкой на очистные забои.

В настоящее время на основе экспериментальных и теоретических исследований установлены новые и уточнены существующие закономерности движения метана в угольных пластах и вмещающих породах, что позволяет разработать теоретические положения, научно обосновывающие технологии снижения риска и локализации последствий взрывов метановоздушной смеси в угольных шахтах, комплекс программных средств для мониторинга аэрогазодинамического состояния горных выработок с учетом влияния геотехнологических процессов при нагрузках на очистные забои 10 тыс. т/сут и более.

Анализ структуры риска взрыва метановоздушной смеси (МВС) позволяет записать концептуальную формулу в следующем виде

$$R_{\text{МВС}} = R_{\text{ВЗР}} \cdot Y, \quad (1)$$

где $R_{\text{МВС}}$, $R_{\text{ВЗР}}$ — риск и вероятность взрыва МВС соответственно; Y — ущерб от взрыва МВС.

Вероятность взрыва метановоздушной смеси будет представлять собой вероятность одновременного появления двух событий:

- концентрация метановоздушной смеси должна быть выше нижнего пре-

дела взрывчатости и не превышать верхнего предела взрывчатости;

- появление во взрывоопасном объеме источника воспламенения.

Поэтому

$$R_{\text{МВС}} = P\{\text{НПВ} < [\text{МВС}] < \text{ВПВ}\} P_{\text{ИВ}} \cdot Y,$$

где $[\text{МВС}]$ — средняя концентрация метана в МВС; НПВ , ВПВ — нижний и верхний пределы взрывчатости метана в метановоздушной смеси; $P\{\text{НПВ} < [\text{МВС}] < \text{ВПВ}\}$ — вероятность появления взрывоопасной концентрации метана; $P_{\text{ИВ}}$ — вероятность появления источника воспламенения. В общем случае ущерб от взрыва метановоздушной смеси определяется как математическое ожидание поражения горнорабочих в подземном пространстве.

Для снижения риска и локализации последствий взрывов метановоздушной смеси необходима компьютерная технология оценки динамики концентрации метана в воздухе.

Математическое описание переноса метана в горном массиве и рудничной атмосфере сводится к следующим уравнениям:

- уравнению фильтрационного переноса метана в горном массиве

$$\frac{dX}{dt} = \text{div} \left[\frac{\rho(p)k}{\mu} \text{grad}(p) \right], \quad (2)$$

- уравнению диффузионного переноса метана в воздухе горных выработок

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dt} + \sum_{i=1}^3 \frac{d}{dx} (cv_i) = \\ = \sum_{i=1}^3 \frac{d}{dx_i} \left[(D_T + D_M) \frac{dc}{dx_i} \right] + I(c), \quad (3) \end{aligned}$$

где X — природная газоносность угольного пласта или вмещающих пород; ρ , p — плотность и давление метана в горном массиве; k , μ — соответственно газовая проницаемость горного массива и динамическая вязкость метана; c — концентрация метана в воздухе горных выработок



Рис. 1. Дерево событий, формирующих опасную газовую ситуацию по фактору взрыва метано-воздушной смеси

Fig. 1. Tree of events causing gas hazard by the criterion of air-and-methane explosion

боток; v_i — компоненты вектора скорости воздуха; D_T , D_M — коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии метана соответственно; $I(s)$ — интенсивность поступления метана в воздух горных выработок; t — время; x_i — пространственная координата ($i = 1, 2, 3$).

Адаптация уравнений (2)–(3) к конкретным горно-геологическим условиям позволяет сформулировать адекватные краевые условия и ввести допущения, упрощающие эти уравнения.

Интенсивность поступления метана в воздух горных выработок $I(s)$ выражается в явном виде из решения уравнения фильтрационного переноса метана в горном массиве. При этом формирование опасной ситуации по фактору взрыва метановоздушной смеси и возникновение последствий взрыва можно рассматривать в виде графов (деревьев) событий, представленных на рис. 1–2.

Формирование опасной ситуации по фактору взрыва метановоздушной смеси представляет собой взаимосвязь следующих процессов:

- выделение метана из различных источников и подача недостаточного количества воздуха;
- начало увеличения концентрации метана в воздухе горной выработки;
- увеличение содержания метана в воздухе;
- возникновение опасной газовой ситуации в подземной горной выработке.

Возникновение последствий взрыва метановоздушной смеси происходит как результат взрыва, приводящего к гибели людей и разрушениям. Взрыв метановоздушной смеси может вызвать и другие аварии — подземный пожар и взрыв угольной пыли. Вторичные аварии также приводят к гибели людей и разрушениям, при этом подземный пожар пред-

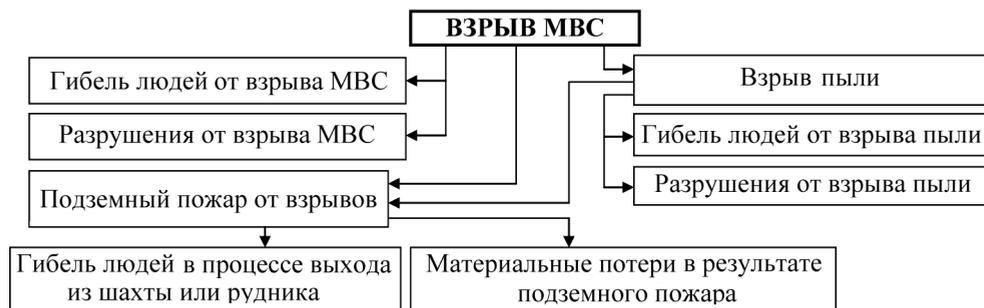


Рис. 2. Дерево событий, формирующих последствия взрыва метановоздушной смеси

Fig. 2. Tree of events causing after-effects of air-and-methane mixture explosion



Рис. 3. Геотехнологические подходы к снижению риска и последствий взрывов метановоздушной смеси

Fig. 3. Geotechnical approaches to mitigation of risk and after-effects of air-and-methane mixture explosion

ставляет наибольшую опасность для людей, застигнутых аварией.

Предполагая, что экспоненциальный закон распределения отказов системы защиты от взрывов МВС справедлив, можно получить количественные статистические оценки. Анализ показывает, что по своим характеристикам система защиты от взрывов МВС в угольных шахтах России не изменилась и остается на уровне угольной промышленности СССР [1]. При этом система защиты от поражающих факторов ухудшилась в несколько раз. Снижение риска и последствий взрывов метановоздушной смеси целесообразно осуществлять геотехнологическими методами.

Наиболее реальные геотехнологические подходы к решению этой проблемы показаны на рис. 3.

Системный подход к снижению риска и локализации последствий взрывов метана в угольных шахтах сводится к решению следующих научных и практических:

- обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств моделирования воздухораспределения в выработках угольных шахт в реальном масштабе времени при нормальных и аварийных режимах эксплуатации;

- совершенствование технологии обследования шахтных вентиляционных систем (ШВС) и подготовки исходных данных для моделей ШВС;

- обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств моделирования систем дегазации угольных шахт в реальном масштабе времени при нормальных и аварийных режимах эксплуатации шахты;

- совершенствование технологии определения метаноёмкости и природной метаносности, а также коллекторских свойств угольных пластов и вмещающих пород;

- обоснование моделей динамики метановыделения из различных источников, разработка алгоритмов и комплекса программных средств моделирования абсолютной метанообильности выработок высокопроизводительных угольных шахт;

- обоснование моделей динамики концентрации метана в горных выработках угольных шахт;

- обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств решения задач сетевой газовой динамики угольных шахт в реальном масштабе времени при нормальных и аварийных режимах эксплуатации угольных шахт;

- совершенствование компьютерной технологии разработки, уточнения и реализации плана ликвидации аварии для метанообильных угольных шахт;

- разработка и внедрение компьютерной технологии оценки риска взрыва метановоздушной смеси в угольных шахтах;

- разработка и внедрение технологии снижения последствий взрыва метановоздушной смеси в угольных шахтах.

Для конкретизации результатов в научной сфере и практическом направлении необходимо уточнить закономерности газообмена на контакте поверхностей обнажения горного массива с рудничной атмосферой и выявить закономерности влияния газовых примесей с высоким сорбционным потенциалом на скорость метановыделения из угольных пластов и вмещающих пород.

Современное положение и перспективы освоения глубоких горизонтов требуют разработки автоматизированной системы аэрогазодинамического мониторинга горных выработок очистных и подготовительных участков и газодинамического мониторинга дегазационной сети шахты. Особое внимание следует уделить разработке и внедрению новых технических средств повышения герметичности дегазационных скважин и снижения притечек воздуха в шахтную дегазационную сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. А. Геохимия ландшафта и окружающая среда. — М.: Недра, 1990. — 134 с.

2. Качурин Н. М., Борщевич А. М., Качурин О. Н., Бухтияров А. А. Безопасность геотехнологий добычи угля по газовому фактору // Безопасность жизнедеятельности. — 2010. — № 5. — С. 24–28.

3. Каледина Н. О., Кобылкин С. С. Обоснование области применения и выбора метода обеспечения метановой безопасности высокопроизводительной очистной выемки угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ 4 Метан. — 2008. — С. 9–22.

4. Каледина Н. О. Проблемы обеспечения метановой безопасности при высокопроизводительной выемке угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ 4 Метан. — 2008. — С. 22–33.

5. Качурин Н. М., Фатуев В. А., Качурин О. Н. Системный подход и обеспечение безопасности процесса использования минерально-сырьевых ресурсов / Известия ТулГУ. Естественные науки. — 2007. — Вып. 2. — С. 106–111.

Практика показывает, что необходимо продолжить совершенствование технологий разработки и реализации плана ликвидации аварии с использованием средств моделирования состава шахтного воздуха в реальном масштабе времени.

Убедительно доказано, что вопросы системной метанобезопасности должны обеспечиваться на всех этапах функционирования угольной шахты. Технологический процесс проветривания очистных забоев и подготовительных выработок сопровождается возникновением состояний, которые принято называть авариями. Необходимым условием оценки надежности функционирования вентиляционной системы шахт является создание метода прогнозной оценки и эффективности функционирования вентиляционной системы шахт, позволяющей прогнозировать динамику состояния системы вентиляции.

Метод должен базироваться на универсальных принципах моделирования, позволяющий учесть динамику влияющих факторов и обеспечить высокую степень адекватности модели поведению реальной системы.

Точность прогнозирования и развития аварийной ситуации — многофакторная и многомерная задача, а множество переменных определяет ее динамическое состояние.

6. Качурин Н. М., Борщевич А. М., Качурина О. Н. Системный подход к снижению риска и локализации последствий взрывов метана в угольных шахтах // Известия вузов. Горный журнал. — 2010. — № 4. — С. 19–24.

7. Качурин Н. М., Борщевич А. М., Ефимов В. И. Обеспечение безопасности технологии «шахта — лава» по газовому фактору при отработке газоносных угольных пластов // Рудник будущего. Пермь. — 2010. — № 3. — С. 81–88.

8. Socolov E. M. et al. System of imitation for forecasting the ¹³⁷Cs migration in the radioactive trace zone at the Chernobyl Atomic Power Station failure // International Symposium on Radiation Safety. — Moscow, 1994. — Pp. 101–103.

9. Kachurin N. M. Conceptual rules of the monitoring of the «Environment — Human Health» system in the Russian Federation / The 2-nd International Symposium «Mining and Environmental Protection». — Belgrade, 1998. — Pp. 21–26.

10. Kachurin N. M., Babovnikov A. L. Gassing during the break and transport of coal in a retreat longwall / Development of new technologies and equipment for mine haulage and hoisting. — Budva. — 2005. — Pp. 245–249.

11. Siemek J., Rajtar J. Simulation of gas outflow from porous fissured media // Arch. Mining. Sci. — 1989. — 34, № 1. — Pp. 119–128.

12. Васючков Ю. Ф. Диффузия метана в ископаемых углях // Химия твердого топлива. — 1976. — № 4. — С. 76–79. **ГИАН**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ермаков Анатолий Юрьевич — кандидат технических наук,

управляющий филиалом ООО «Сибниииуглеобогашение», г. Прокопьевск,

Качурин Николай Михайлович — доктор технических наук,

профессор, зав. кафедрой, ТулГУ,

Сенкус Валентин Витаутасович — кандидат технических наук,

начальник горного отдела, ООО «Проектгидроуголь-Н», e-mail: senkus@yandex.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 7, pp. 212–218.

Systemic approach to coal mine ventilation safety based on air/gas dynamics control

Ermakov A. Yu., Candidate of Technical Sciences,

Manager of the Branch, LLC «Sibniuuugleobogaschenie», Prokopyevsk, Russia,

Kachurin N. M., Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of Chair, Tula State University, 300012, Tula, Russia,

Sencus Val. V., Candidate of Technical Sciences, Head of Mining Department,

LLC «Proektgidrougol-H», Novokuznetsk, Russia, e-mail: senkus@yandex.ru.

Abstract. The analysis of accidents concerned with the aero/gas dynamics control in coal mines reveals inefficiency of the current methods available for prediction of air-and-methane mixture explosions, as well as for physical modeling and mathematical description of gas explosion hazards in coal mines. The methodical approaches to methane safety proposed by the Moscow State Mining University school are also valid for estimation of methane hazard in development and breakage headings. To this effect, it is required to develop a system concept of induced accident risk management in coal mining based on the accident risk modeling with respect to aerology and gas emission factor, as well as on the modeling of gas situation when forerunners of explosion hazard originate in mine air. The experimental and theoretical research has revealed and refined the new and current mechanisms of methane flow in coal and host rock mass. This allows developing a theoretical framework for the technologies aimed to reduce air/methane mixture explosion hazards and to isolate explosion consequences, as well as enables designing bundled software for air and gas monitoring in coal mines with regard to effects of geotechnical processes during high-performance longwall operations.

Key words: systemic approach, provision, ventilation, safety, coal mine, air/gas dynamics control.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-212-218

REFERENCES

1. Alekseenko V.A. *Geokhimiya landshafta i okruzhayushchaya sreda* [Geochemistry of the landscape and the environment], Moscow, Nedra, 1990, 134 p.
2. Kachurin N.M., Borshchevich A.M., Kachurina O.N., Bukhtiyarov A.A. Bezopasnost' geotekhnologii dobychi uglja po gazovomu faktoru [Safety of geotechnologies for coal mining by gas factor], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2010, no 5, pp. 24–28. [In Russ].
3. Kaledina N.O., Kobytkin S.S. Obosnovanie oblasti primeneniya i vybora metoda obespecheniya metanovoy bezopasnosti vysokoproizvoditel'noy ochistnoy vyemki uglja [Substantiation of the field of application and the choice of the methane safety assurance method for high-efficiency coal mining]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. Special edition 4. 2008, pp. 9–22. [In Russ].
4. Kaledina N.O. Problemy obespecheniya metanovoy bezopasnosti pri vysokoproizvoditel'noy vyemke uglja [Problems of ensuring methane safety in high-performance coal mining]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. Special edition 4. 2008, pp. 22–33. [In Russ].
5. Kachurin N.M., Fatuev V.A., Kachurina O.N. Sistemnyy podkhod i obespechenie bezopasnosti protsessi ispol'zovaniya mineral'no-syr'evykh resursov [System approach and ensuring the safety of the process of using mineral raw materials]. *Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki*. 2007. issue 2, pp. 106–111. [In Russ].
6. Kachurin N.M., Borshchevich A.M., Kachurina O.N. Sistemnyy podkhod k snizheniyu riska i lokalizatsii posledstviy vzryvov metana v ugol'nykh shakhtakh [A systematic approach to risk reduction and localization of consequences of methane explosions in coal mines]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2010, no 4, pp. 19–24. [In Russ].
7. Kachurin N.M., Borshchevich A.M., Efimov V.I. Obespechenie bezopasnosti tekhnologii «shakhta lava» po gazovomu faktoru pri otrabotke gazonosnykh ugol'nykh plastov [Ensuring the safety of «mine-lava» technology for the gas factor at the development of gas-bearing coal seams]. *Rudnik budushchego. Perm'*. 2010, no 3, pp. 81–88. [In Russ].
8. Socolov E.M. et al. System of imitation for forecasting the ¹³⁷Cs migration in the radioactive trace zone at the Chernobyl Atomic Power Station failure. *International Symposium on Radiation Safety*. Moscow, 1994. Pp. 101–103.
9. Kachurin N.M. Conceptual rules of the monitoring of the «Environment Human Health» system in the Russian Federation. *The 2-nd International Symposium «Mining and Environmental Protection»*. Belgrade, 1998. Pp. 21–26.
10. Kachurin N.M., Babovnikov A.L. Gassing during the break and transport of coal in a retreatlongwall. *Development of new technologies and equipment for mine haulage and hoisting*. Budva. 2005. Pp. 245–249.
11. Siemek J., Rajtar J. Simulation of gas outflow from porousfissured media. *Arch. Mining. Sci.* 1989. 34, no 1. pp. 119–128.
12. Vasyuchkov Yu. F. Diffuziya metana v iskopaemykh uglyakh [Methane diffusion in fossil coals]. *Khimiya tverdogo topliva*. 1976, no 4, pp. 76–79. [In Russ].



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК, ПРИМЕНИМЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МАРКШЕЙДЕРСКИХ ЗАДАЧ

(2018, № 4, СБ 14, 16 с.)

Гусев В.Н., Малюхина Е.М., Илюхин Д.А., Рахаткулов Д.Х., Выстрчил М.Г., Ниязов Н.Т.

Представлен анализ и обработка маркшейдерско-геодезической информации для дальнейшего применения в прогнозных расчетных методиках при ведении подземных горных работ. Методики применимы для инженерно-технических работников, проектных и научно-технических организациях. Аналитическая обработка натуральных данных позволяет повысить производительность и безопасность ведения горных работ, повышает ее экономическую целесообразность.

OBTAINING ANALYTICAL MODELS AND CALCULATION METHODS APPLICABLE TO SOLVING SURVEYING PROBLEMS

Gusev V.N., Maluhina E.M., Ilyukhin D.A., Rakhmankulov D.H., Vystrcil M.G., Niyazov N.T.

The analysis and processing of surveying and geodetic information for further application in predictive calculation methods in the conduct of underground mining. The techniques are applicable for engineering and technical workers, design and scientific and technical organizations. Analytical processing of field data can improve the productivity and safety of mining operations, increases its economic feasibility.