

Проблемы пожаров в угольных шахтах и обзор современных подходов к их моделированию

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-69-73>

Актуальность проблемы обоснована необходимостью применения инновационных подходов к борьбе с шахтными пожарами на основе использования методов компьютерного моделирования для прогнозирования развития пожаров и их последствий. Анализ статистических данных за последние годы показал, что в России наиболее частой причиной аварий при подземных работах по добыче угля являются пожары (более 40% от общего числа аварий). Похожая ситуация наблюдается и в Китае, являющемся ведущим мировым производителем угля, где подавляющее большинство крупных аварий на угольных шахтах составляют пожары и взрывы. Представлены основные причины возникновения пожаров. Дан обзор используемых сегодня методов моделирования пожаров, указаны достоинства и недостатки их применения. Для борьбы с эндогенными пожарами на основе численного моделирования можно формировать оптимальный тепловой баланс процессов самонагрева угля путем определения горнотехнических решений по снижению параметров теплогенерации угольных пластов.

Ключевые слова: угольные шахты, подземные пожары, статистика пожаров, аварии в угольных шахтах, численное моделирование, статистика аварий в шахтах, моделирование шахтных пожаров.

Для цитирования: Федоткин И.О., Федоткин Д.В. Проблемы пожаров в угольных шахтах и обзор современных подходов к их моделированию // Уголь. 2024. № 2. С. 69-73. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.

ВВЕДЕНИЕ

Добыча угля подземным способом связана с высоким уровнем потенциальных опасностей, реализация которых приводит к возникновению аварий, угрожающих жизни и здоровью горнорабочих, а также наносящих серьезный экономический ущерб [1, 2]. В связи с этим, возникает необходимость анализа официальных статистических данных по произошедшим за последние годы авариям на предприятиях по добыче угля, включающего выявление наиболее распространенных видов аварий и причин их возникновения, что является одной из задач настоящего исследования.

Наиболее частым видом аварий в угольных шахтах являются пожары. Для того, чтобы реально оценить риски, связанные с пожара-

ФЕДОТКИН И.О.

Аспирант НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com

ФЕДОТКИН Д.В.

Канд. техн. наук,
доцент НИТУ МИСИС,
начальник отдела
специальных исследований
ФГБУ ВНИИПО МЧС России,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: fdv982@mail.ru

ми на угольных шахтах, и эффективно ими управлять, необходимо иметь инструменты для прогнозирования развития пожаров и их последствий. При решении этой задачи хорошо зарекомендовали себя методы моделирования с использованием программных комплексов, широко используемые и активно развивающиеся за рубежом [3, 4]. Поэтому еще одной задачей данного исследования является обзор моделей, используемых в последние годы для изучения и прогнозирования подземных пожаров в мировой практике.

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО АВАРИЯМ В УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Согласно данным Ростехнадзора, число аварий на предприятиях угольной промышленности России за период с 2008 по 2022 г. значительно снизилось, несмотря на повышение объемов добычи угля (рис. 1), что обусловлено усилением контроля безопасности при горных работах, ликвидацией наиболее опасных предприятий, проведением исследований опасных явлений и внедрением новых технологий [5, 6].

При этом проведенные ранее исследования статистических данных по авариям в угольных шахтах, охватывающие период с 2005 по 2017 г., показали более низкую ди-

намику уменьшения количества пожаров относительно других видов аварий. Также было выявлено, что наиболее частой причиной аварий и инцидентов при подземных работах по добыче угля являлись пожары (более 50% от всех аварий и инцидентов), на втором месте по частоте находились обрушения горной массы и крепи, а на третьем – взрывы (вспышки) газа и угольной пыли [5, 7, 8].

Несмотря на принимаемые меры, пожары по-прежнему остаются самым распространенным видом аварий. В соответствии с данными Ростехнадзора, в период с 2017 по 2022 г. на их долю приходилось 41,7% от всего числа зарегистрированных аварий в угольных шахтах. Вторым по распространенности видом стали внезапные выбросы угля, породы и газа, как показано на рис. 2 [5]. Похожая ситуация наблюдается и в Китае, являющемся ведущим мировым производителем угля, где подавляющее большинство крупных аварий на угольных шахтах составляют пожары и взрывы [7].

К основным причинам пожаров за этот период относятся: отсутствие надлежащего контроля за составом атмосферы в горных выработках, недостаточность работ по локализации очагов самонагревания в целиках угля и выработанном пространстве, отсутствие надлежащего контроля за состоянием вентиляционных сооружений и обе-

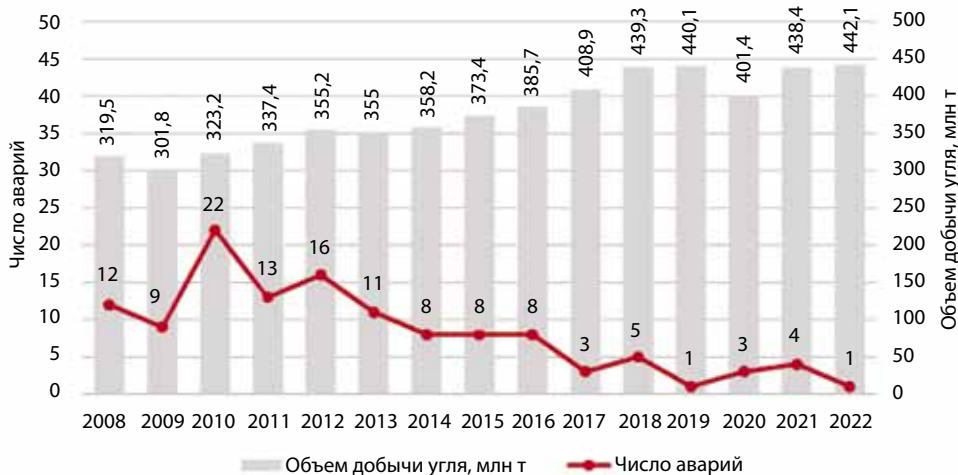


Рис. 1. Динамика аварийности на объектах угольной промышленности в сравнении с объемами добычи угля в 2008-2022 годах

Fig. 1. Dynamics of accident rates at coal industry facilities in comparison with coal production volumes in 2008-2022



Рис. 2. Виды аварий в угольных шахтах, произошедших за период с 2017 по 2022 г.

Fig. 2. Types of accidents in coal mines that occurred during the period from 2017 to 2022

спечением расчетного расхода воздуха в лаве, а также неэффективные способы предотвращения утечек воздуха в выработанное пространство [5].

Пожары в угольных шахтах представляют большую опасность для жизни и здоровья горнорабочих из-за выделений токсичных газов, распространяющихся по вентиляционному контуру и способных поражать большие участки вентиляционной сети, кроме того, пожары могут спровоцировать взрывы выделяющихся из угольных пластов горючих газов [9, 10, 11]. Поэтому важной задачей является прогнозирование их развития для оценки потенциальных сценариев аварий и разработки мер, направленных на их предотвращение и минимизацию негативных последствий.

Для этой цели широко используются методы компьютерного моделирования, позволяющие определить поля концентраций выделяющихся при пожаре газов, температурные поля и их эволюцию с течением времени и при различных сценариях [12, 13].

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ШАХТНЫХ ПОЖАРОВ

Наиболее широко используемыми на сегодняшний день методами моделирования пожаров являются методы, основанные на численном решении уравнений гидродинамики, или CFD-методы (computational fluid dynamics) (см. таблицу).

Для решения задач вычислительной гидродинамики применяются программные пакеты общего назначения, такие как ANSYS и FlowVision, а также специального, например Fire Dynamics Simulator (FDS). Их использование позволяет получить подробные данные о скорости воздушного потока, давлении, концентрации газов, тепловом потоке в моделируемой области и позволяет визуализировать сложное поведение системы [14, 15]. Однако стоит отметить, что применение CFD-методов при моделировании пожаров в масштабных вентиляционных сетях, состоящих из сотен выработок, может быть существенно затруднено по причине огромной вычислительной сложности таких задач [13]. Сравнение ре-

зультатов полномасштабных экспериментов и результатов CFD-моделирования (с использованием FDS) показало, что результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными, при этом среднее значение максимальных отклонений на всех участках составило 24% [15].

Для моделирования пожаров в шахтах также используются инструменты анализа вентиляционной сети шахты, такие как Ventsim и VnetPC [16]. Эти инструменты просты в использовании и не требуют больших вычислительных затрат, в отличие от CFD-моделей, что позволяет проводить расчеты для сложных вентиляционных сетей целиком. Они могут использоваться для определения оптимальных путей эвакуации в зависимости от места возможного пожара и времени, имеющегося у рабочих для безопасной эвакуации [4, 17]. Такое программное обеспечение позволяет моделировать сценарии пожара с учетом характеристик и режимов работы основных вентиляторов, а также характеристик вентиляционного контура, таких как форма, сечение, длина и глубина подземных полостей [4, 17].

Для предотвращения эндогенных пожаров с помощью применения методов численного моделирования можно рационально управлять параметрами газодинамики в условиях выемочного столба в угольных шахтах, разрабатывающих пласты, опасные по самовозгоранию. Для этого на основе численного моделирования можно формировать оптимальный тепловой баланс процессов самонагрева угля путем определения горнотехнических решений по снижению параметров теплогенерации угольных пластов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пожары в угольных шахтах наносят огромный социально-экономический и экологический ущерб, нарушают штатный режим работы шахт, уничтожают оборудование и горные выработки, и самую большую опасность пожары представляют для жизни и здоровья горнорабочих. Для прогнозирования развития шахтных пожаров хорошо зарекомендовали себя методы модели-

Обзор методов моделирования пожаров в угольных шахтах

Overview of methods for modeling fires in coal mines

Наименование программного комплекса, страна-разработчик	Основа модели	Достоинства	Недостатки
ANSYS Fluent (США) Fire Dynamics Simulator (США) – пользовательские интерфейсы: Fenix+ (Россия), PyroSim (США) FlowVision (Россия)	Численное решение системы уравнений Навье-Стокса	– Предоставление подробных данных о газодинамических параметрах, концентрациях продуктов горения, тепловом потоке – Возможность учета сложной геометрии моделируемой области – Возможность учета физико-химических процессов	– Большая продолжительность вычислений, возрастающая при расширении области моделирования и увеличении разрешения сетки
Ventsim (Австралия) VnetPC (США)	Законы Кирхгофа	– Возможность использования для моделирования масштабных и сложных вентиляционных сетей – Низкие вычислительные затраты	– Дым и тепло представляются в виде однонаправленного потока – Низкая информативность касательно физики процесса

рования с использованием программных комплексов, широко используемых и активно развивающихся за рубежом. Данный опыт моделирования также может быть применен для борьбы с эндогенными пожарами путем формирования оптимального теплового баланса процессов самонагрева угля за счет определения горнотехнических решений по снижению параметров теплогенерации угольных пластов.

Список литературы

1. Анализ причин взрывов, вспышек и воспламенений метана в угольных шахтах России в 2005-2019 гг. / Е.И. Кабанов, Г.И. Коршунов, А.В. Корнев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2-1. С. 18-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-18-29.
2. Prerequisites for applying the risk-based approach to assessing the explosive and fire hazardous properties of underground mining materials / V. Rodionov, I. Skripnik, T. Kaverzneva et al. // E3S Web of Conferences. 2023. 417. 05013. DOI: 10.1051/e3s-conf/202341705013.
3. Numerical and experimental investigation of carbon monoxide spread in underground mine fires / L. Zhou, L. Yuan, D. Bahrami et al. // Journal of Fire Sciences. 2018;36(5):406-418. DOI: 10.1177/0734904118793891.
4. Nematollahi Sarvestani A., Oreste P., Gennaro S. Fire Scenarios Inside a Room-and-Pillar Underground Quarry Using Numerical Modeling to Define Emergency Plans // Applied Sciences. 2023;13(7):4607. DOI: 10.3390/app13074607.
5. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору: ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 15.01.2024).
6. Баловцев С.В. Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 350-359. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.
7. Родионов В.А., Серегин А.С., Иконников Д.А. Мультипликативный метод оценки взрывопожароопасных свойств рудничной атмосферы при поступлении в воздушную среду углеводородных газов // Горный журнал. 2023. № 9. С. 35-40. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.05.
8. A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China / Zhu Y., Wang D., Shao Z. et al. // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 121. P. 357-366. DOI: 10.1016/j.psep.2018.11.013.
9. Ганова С.Д., Скопинцева О.В., Исаев О.Н. К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 6. С. 109-115. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2132.
10. Стандартизация установок импульсного пожаротушения для подачи самовспенивающейся газоаэрозоленополненной пены / Н.П. Копылов, Д.В. Федоткин, Е.Ю. Сушкина и др. // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 7. С. 16-20. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-16-20.
11. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Куликова Е.Ю. Оценка влияния тяжелых углеводородов на аэрологические риски аварий в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 2. С. 234-245. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245.
12. Study on Numerical Simulation of Fire Danger Area Division in Mine Roadway / H. Wen, Y. Liu, J. Guo et al. // Mathematical Problems in Engineering. 2021;(2):1-13. DOI: 10.1155/2021/6646632.
13. Expanding the FDS Simulation Capabilities to Fire Tunnel Scenarios Through a Novel Multi-scale Model / V. Verda, R. Borchiellini, S. Cosentino et al. // Fire Technology. 2021, Vol. 57. P. 2491-2514. DOI: 10.1007/s10694-020-01081-y.
14. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников / Б.П. Казаков, Е.В. Колесов, Е.В. Накаряков и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 6. С. 5-33. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-6-0-5.
15. Mine Fire Behavior under Different Ventilation Conditions: Real-Scale Tests and CFD Modeling / F. Fernández-Alaiz, A.M. Castañón, F. Gómez-Fernández et al. // Applied Sciences. 2020;10(10):3380. DOI: 10.3390/app10103380.
16. Brake D.J. Fire modelling in underground mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. Proceedings of the Australian mine ventilation conference. Adelaide, SA, Australia, 2013. P. 1-3.
17. Simulating and Predicting Escape Routes for Ventilation Network of Duong Huy Coal Company using Ventsim DESIGN Software / Duy Huy Nguyen, Cao Khai Nguyen, Van Thinh Nguyen et al. // Inżynieria Mineralna. 2022, Vol. 50. P. 151-157. DOI: 10.29227/IM-2022-02-20.

Original Paper

UDC 622.822 © I.O. Fedotkin, D.V. Fedotkin, 2024

ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2024, № 2, pp. 69-73

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-69-73>

Title

THE PROBLEMS OF FIRES IN COAL MINES AND A REVIEW OF MODERN APPROACHES TO THEIR MODELLING

Authors

Fedotkin I.O.¹, Fedotkin D.V.^{1,2}

¹ National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation

² FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Moscow region, 143903, Russian Federation

SAFETY

Authors Information

Fedotkin I.O., Postgraduate Student, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com

Fedotkin D.V., PhD (Engineering), Associate Professor,
Head of the Special Research Department, e-mail: fdv982@mail.ru

Abstract

The relevance of the problem is justified by the need for innovative approaches to combating mine fires based on the use of computer modeling methods to predict the development of fires and their consequences. Analysis of statistical data for recent years has shown that in Russia the most frequent cause of accidents in underground coal mining is fires (more than 40% of the total number of accidents). A similar situation is observed in China, which is the world's leading coal producer, where the overwhelming majority of major accidents at coal mines are fires and explosions. The main causes of fires are presented. The review of fire modelling methods used today is given, advantages and disadvantages of their application are indicated. To combat endogenous fires, based on numerical modeling, it is possible to form an optimal heat balance of coal self-heating processes by determining mining solutions to reduce the heat generation parameters of coal seams.

Keywords

Coal mines, Underground fires, Fire statistics, Coal mine accidents, Numerical modelling, Statistics of mine accidents, Modelling of mine fires.

References

- Kabanov E.I., Korshunov G.I., Kornev A.V. & Myakov V.V. Analysis of the causes of methane explosions, flashes and ignitions at coal mines of Russia in 2005-2019. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2021;(2-1):18-29. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-18-29.
- Rodionov V., Skripnik I., Kaverzneva T., Zhikharev S., Kriklivyy S. & Panov S. Prerequisites for applying the risk-based approach to assessing the explosive and fire hazardous properties of underground mining materials. *E3S Web of Conferences*, 2023, 417, 05013. DOI: 10.1051/e3sconf/202341705013.
- Zhou L., Yuan L., Bahrami D., Thomas R.A. & Rowland J.H. Numerical and experimental investigation of carbon monoxide spread in underground mine fires. *Journal of Fire Sciences*, 2018;36(5):406-418. DOI: 10.1177/0734904118793891.
- Nematollahi Sarvestani A., Oreste P. & Gennaro S. Fire Scenarios Inside a Room-and-Pillar Underground Quarry Using Numerical Modeling to Define Emergency Plans. *Applied Sciences*, 2023;13(7):4607. DOI: 10.3390/app13074607.
- Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision: annual reports on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. [Electronic resource]. Available at: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (accessed 15.01.2024).
- Balovtsev S.V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*, 2023;8(4):350-359. (Russia). DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.
- Rodionov V.A., Seregin A.S. & Ikonnikov D.A. Multiplicative method to assess fire and explosion hazard of mine air containing hydrocarbon gases. *Gornyi Zhurnal*, 2023, (9), pp. 35-40. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2023.09.05.
- Zhu Y., Wang D., Shao Z., Xu C., Zhu X., Qi X. & Liu F. A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, (121), pp. 357-366. DOI: 10.1016/j.psep.2018.11.013.
- Ganova S.D., Skopintseva O.V. & Isaev O.N. On the issue of studying the composition of hydrocarbon gases of coals and dust to predict their potential hazard. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, Vol. 330, (6), pp. 109-115. (In Russ.). DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2132.
- Kopylov N.P., Fedotkin D.V., Sushkina E.Yu. & Novikova V.I. Standardization of Impulse Extinguishing Installations for Delivery of Self Foaming Gas-aerosol Foam. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*, 2023, (7), pp. 16-20. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-16-20.
- Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. & Kulikova E.Yu. Assessment of heavy hydrocarbons influence on aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023;15(2):234-245. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245.
- Wen H., Liu Y., Guo J., Zhang Z., Liu M. & Cai G. Study on Numerical Simulation of Fire Danger Area Division in Mine Roadway. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021;(2):1-13. DOI: 10.1155/2021/6646632.

13. Verda V., Borchiellini R., Cosentino S., Elisa G., Tuni J.M. Expanding the FDS Simulation Capabilities to Fire Tunnel Scenarios Through a Novel Multi-scale Model. *Fire Technology*, 2021, (57), pp. 2491-2514. DOI: 10.1007/s10694-020-01081-y.

14. Kazakov B.P., Kolesov E.V., Nakariakov E.V. & Isaevich A.G. Models and methods of aerodynamic calculations for ventilation networks in underground mines: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2021;(6):5-33. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2021-6-0-5.

15. Fernández-Alaiz F., Castañón A.M., Gómez-Fernández F. & Bascompta M. Mine Fire Behavior under Different Ventilation Conditions: Real-Scale Tests and CFD Modelling. *Applied Sciences*, 2020;10(10):3380. DOI: 10.3390/app10103380.

16. Brake D.J. Fire modelling in underground mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. Proceedings of the Australian mine ventilation conference. Adelaide, SA, Australia, 2013, pp. 1-3.

17. Duy Huy Nguyen, Cao Khai Nguyen, Van Thanh Nguyen, Van Quang Nguyen, Minh Chien Nguyen & Khac Duy Nguyen. Simulating and Predicting Escape Routes for Ventilation Network of Duong Huy Coal Company Using Ventsim DESIGN Software. *Inżynieria Mineralna*, 2022, (50), pp. 151-157. DOI: 10.29227/IM-2022-02-20.

For citation

Fedotkin I.O., Fedotkin D.V. The problems of fires in coal mines and a review of modern approaches to their modelling. *Ugol*, 2024, (2), pp. 69-73. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.

Paper info

Received January 9, 2024

Reviewed January 15, 2024

Accepted January 26, 2024

РЕКЛАМА

НПП ЗАВОД МДУ

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ЗАВОД МОДУЛЬНЫХ
ДЕГАЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК»

**ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ДЕГАЗАЦИИ И УТИЛИЗАЦИИ
МЕТАНА**

МЕТАН ПОД КОНТРОЛЕМ!

РОССИЯ
Г. НОВОКУЗНЕЦК
ШОССЕ СЕВЕРНОЕ, 8

WWW.ZAVODMDU.RU
INFO@ZAVODMDU.RU
ТЕЛ.: +7 (3843) 991-991