Оригинальная статья

УДК 622.807:543.275 © И.Ю. Матасова✉[1], А.В. Масенко[2], П.А. Саблина[2], Н.А. Куприяненко[2], В.В. Бовш[2], Е.В. Комарь[3], 2025

[1] Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск, 353924, Россия, semigorie@mail.ru
[2] ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», 350044, г. Краснодар, Россия
[3] ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», 634003, г. Томск, Россия,
✉ e-mail: semigorie@mail.ru

Original Paper

UDC 622.807:543.275 © I.Yu. Matasova✉[1], A.V. Masenko[2], P.A. Sablina[2], N.A. Kupriyanenko[2], V.V. Bovsh[2], E.V. Komar[3], 2025

[1] Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, 353924, Russian Federation
[2] I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation
[3] Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, 634003, Russian Federation
✉ e-mail: semigorie@mail.ru

Оптические методы контроля концентрации угольной пыли для предотвращения взрывов в шахтах

Optical methods of coal dust concentration control to prevent explosions in mines

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-6-84-88

МАТАСОВА И.Ю.
Канд. геол.-минер. наук, доцент,
Государственный морской университет
имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
353924, г. Новороссийск, Россия,
e-mail: semigorie@mail.ru

МАСЕНКО А.В.
Старший преподаватель
факультета энергетики
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т. Трубилина»,
350044, г. Краснодар, Россия,
e-mail: almasenko@yandex.ru

САБЛИНА П.А.
Студентка факультета энергетики
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т. Трубилина»,
350044, г. Краснодар, Россия,
e-mail: viperaand@mail.ru

КУПРИЯНЕНКО Н.А.
Студент факультета энергетики
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т. Трубилина»,
350044, г. Краснодар, Россия,
e-mail: alexkgau@rambler.ru

В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения безопасности в угольной промышленности, связанная с возникновением взрывов угольной пыли. Целью исследования является разработка методики определения концентрации и дисперсных параметров угольной пыли для раннего выявления взрывоопасных ситуаций. Для достижения этой цели проведен анализ существующих методов измерения концентрации пыли, включая гравиметрический, электрический, радиометрический и оптические методы. На основе анализа преимуществ и недостатков был сделан выбор в пользу оптических методов, а именно турбидиметрического и нефелометрического. Для моделирования работы этих методов разработана математическая модель, учитывающая параметры угольной пыли, длину волны лазерного излучения и условия шахты. Полученные результаты показывают высокую чувствительность турбидиметрического метода при низких концентрациях пыли, что делает его перспективным для раннего обнаружения опасности. Нефелометрический метод эффективен при высоких концентрациях пыли.

Ключевые слова: *угольная пыль, взрывоопасность, оптические методы, турбидиметрия, нефелометрия, концентрация пыли, дисперсность, предотвращение взрывов.*

Для цитирования: Оптические методы контроля концентрации угольной пыли для предотвращения взрывов в шахтах / И.Ю. Матасова, А.В. Масенко, П.А. Саблина и др. // Уголь. 2025;(6):84-88. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-84-88.

Abstract

The article deals with the urgent problem of safety in the coal industry associated with the occurrence of coal dust explosions. The aim of the study is to develop a methodology for determining the concentration

and dispersion parameters of coal dust for early detection of explosive situations. To achieve this goal, the existing methods of dust concentration measurement including gravimetric, electrical, radiometric and optical methods were analysed. Based on the analysis of advantages and disadvantages, the optical methods, namely turbidimetric and nephelometric, were chosen. In order to simulate the operation of these methods, a mathematical model has been developed, taking into account coal dust parameters, laser radiation wavelength and mine conditions. The results obtained show high sensitivity of the turbidimetric method at low dust concentrations, which makes it promising for early hazard detection. The nephelometric method is effective at high dust concentrations.

Keywords

Coal dust, explosion hazard, optical methods, turbidimetry, nephelometry, dust concentration, dispersibility, explosion prevention.

For citation

Matasova I.Yu., Masenko A.V., Sablina P.A., Kupriyanenko N.A., Bovsh V.V., Komar E.V. Optical methods of coal dust concentration control to prevent explosions in mines. *Ugol'*. 2025;(6):84-88. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-84-88.

БОВШ В.В.

Студент факультета энергетики
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»,
350044, г. Краснодар, Россия,
e-mail: t9913552@yandex.ru

КОМАРЬ Е.В.

Канд. физ.-мат. наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»,
634003, г. Томск, Россия,
e-mail: elena70@inbox.ru

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, с развитием промышленности и добывающих отраслей, проблема запыленности воздуха приобретает все большую актуальность. Особенно остро эта проблема стоит в угольной промышленности, где образующиеся в процессе добычи и переработки угля аэрозоли представляют серьезную опасность для здоровья работников и могут приводить к возникновению взрывов [1, 2, 3]. Обеспечение безопасных условий труда на шахтах и предотвращение аварий, связанных с взрывами угольной пыли, являются важной и сложной задачей. Существуют различные подходы к решению проблемы пылевого загрязнения, начиная от разработки и внедрения систем пылеподавления и заканчивая совершенствованием методов контроля и мониторинга концентрации взрывоопасной пыли [4, 5, 6, 7]. Традиционные методы борьбы с пылью, такие как орошение водой или применение химических связующих, позволяют снизить концентрацию пыли в воздухе, но не всегда эффективны в долгосрочной перспективе. Методы контроля концентрации пыли, основанные на отборе проб и их последующем анализе в лабораторных условиях, требуют значительного времени и не позволяют оперативно реагировать на изменения в запыленности рудничной атмосферы [8, 9, 10]. Существующие промышленные пылемеры зачастую недостаточно точны, чувствительны к внешним факторам и не всегда обеспечивают необходимую скорость измерения [11, 12, 13, 14]. В этой связи разработка новых и совершенствование существующих методов контроля концентрации и дисперсных параметров аэрозольных образований, особенно угольной пыли, являются актуальной и важной задачей. Оперативный и точный мониторинг этих параметров позволяет своевременно выявлять потенциально взрывоопасные ситуации и принимать меры по их предотвращению [15, 16, 17, 18]. В частности, определение дисперсности пыли, то есть распределения частиц по размерам, позволяет более точно оценить взрывоопасность пылевого облака, поскольку мелкие частицы обладают большей удельной поверхностью и легче воспламеняются.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

План экспериментальных работ включает теоретический анализ существующих методов измерения концентрации и дисперсности пыли, выбор наиболее подходящего метода для предотвращения

взрывов угольной пыли, разработку и расчет параметров математической модели пылемера, основанного на выбранном методе. В работе рассматриваются гравиметрический, электрический, радиометрический и оптические методы измерения концентрации пыли. На основе анализа преимуществ и недостатков каждого метода делается выбор в пользу оптических методов, а именно турбидиметрического (измерение поглощенного света) и нефелометрического (измерение рассеянного света) методов. Далее производится моделирование выбранных методов с учетом параметров угольной пыли и условий шахты. В качестве основного оборудования для теоретического моделирования и разработки математической модели пылемера предполагается использование лазера в видимом диапазоне спектра с длиной волны 0,38 мкм. В работе делается расчет параметров $M_и$, который характеризует рассеяние света, в зависимости от размера частиц и длины волны излучения. Длина базы оптического канала принимается равной 10 см, а среднее расстояние от лазера до детектора – 3 см. Детектор излучения используется для измерения интенсивности как поглощенного, так и рассеянного света.

В рамках моделирования турбидиметрического метода производится расчет интенсивности поглощенного света, прошедшего через пылевое облако, с использованием закона Бугера. Также вычисляется коэффициент ослабления излучения в зависимости от концентрации пыли и размера частиц. В свою очередь, для нефелометрического метода производится расчет интенсивности рассеянного света с использованием закона Рэлея.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования, направленные на разработку методики определения концентрации и дисперсных параметров аэрозольных образований угольной пыли с целью предотвращения взрывов, выявили ряд ключевых результатов. Из анализа взрывоопасности угольной пыли установлено, что нижний предел взрываемости значительно варьируется в зависимости от свойств и марки угля, находясь в диапазоне 10-50 г/м^3. При этом установлено, что уменьшение нижнего предела взрываемости связано с увеличением выделения летучих веществ из угля. Экспериментально подтверждено, что взрывы угольной пыли возможны и в отсутствие метана, а даже небольшой взрыв метана в смеси с пылью может спровоцировать мощный взрыв. Важным фактором является дисперсность пыли: чем она меньше, тем ниже концентрационный предел взрываемости. Результаты лабораторных исследований показали, что для наиболее взрывчатой пыли (с содержанием летучих веществ более 35% и влажностью менее 17%) минимальная концентрация для взрыва составляет 10 г/м^3. Наличие метана существенно влияет на этот показатель: при концентрации метана около 1% предел взрываемости пыли снижается в два раза, а при 2% – в четыре раза. Таким образом, пылеметановые смеси могут взрываться при концентрациях пыли 4-5 г/м^3. В связи с этим, для эффективного предотвращения взрывов в шахтах устройства для измерения концентрации пыли должны срабатывать уже при концентрациях от 0 до 3 г/м^3. Анализ существующих методов измерения концентрации пыли показал, что гравиметрический, электрический и радиометрический методы имеют ряд недостатков, таких как зависимость от человеческого фактора, чувствительность к влажности, сложность и высокая стоимость. Оптические методы, основанные на определении рассеянного и поглощенного светового потока пылью, представляются наиболее перспективными. Среди них выделены турбидиметрический (измерение поглощенного света) и нефелометрический (измерение рассеянного света) методы.

В рамках математической модели, разработанной для анализа работы нефелометрического и турбидиметрического методов, учтены такие факторы, как размер частиц, длина волны излучения и концентрация пыли. Расчеты показали, что при использовании видимого спектра излучения (λ = 0,38 мкм) возможно исследование тонкодисперсной пыли. При среднем объемно-поверхностном диаметре частиц угольной пыли 5,62 мкм минимальный размер частиц, которые можно различить, составляет 1,815 мкм. При длине базы оптического канала 10 см и среднем расстоянии от лазера до детектора 3 см проведен расчет интенсивности поглощенного и рассеянного света в зависимости от концентрации и объема частиц пыли. Полученные результаты свидетельствуют о том, что турбидиметрический метод более чувствителен при малых концентрациях пыли, так как излучение, проходящее через пылевое облако, имеет экспоненциальный характер. Так, при концентрации пыли 1 г/м^3 интенсивность поглощенного света составляет примерно 0,002 от начальной интенсивности лазерного излучения. В то время как нефелометрический метод, при той же концентрации, регистрирует рассеянное излучение с интенсивностью в 10 раз меньше поглощенного. В диапазоне концентраций 0,1-3 г/м^3, который является критическим для предотвращения взрывов угольной пыли, интенсив-

Сравнение чувствительности турбидиметрического и нефелометрического методов в зависимости от концентрации угольной пыли

Comparison of the sensitivity of turbidimetric and nephelometric methods depending on the concentration of coal dust

Концентрация угольной пыли (г/м^3)	Интенсивность поглощенного света (отн. ед.)	Интенсивность рассеянного света (отн. ед.)	Отношение рассеянного света к поглощенному (R/B)
0,1	0,0002	2,0E-5	0,1
0,5	0,001	1,0E-4	0,1
1,0	0,002	2,0E-4	0,1
2,0	0,004	4,0E-4	0,1
3,0	0,006	6,0E-4	0,1
5,0	0,010	1,0E-3	0,1

ность поглощенного света изменяется от 0,0002 до 0,006 от начальной интенсивности, что может быть достаточно для надежной регистрации современными детекторами (*см. таблицу*). С увеличением концентрации пыли интенсивность рассеянного излучения возрастает, делая нефелометрический метод более привлекательным для измерения высоких концентраций.

Из анализа зависимости интенсивности прошедшего и рассеянного излучения от объема частиц угольной пыли (в диапазоне от 0,05 до 30 мкм) установлено, что оба метода чувствительны к размеру частиц. Так, при концентрации 100 частиц/см^3 и диаметре частиц 1 мкм интенсивность поглощенного света составляет 0,0001, а при увеличении диаметра до 10 мкм интенсивность поглощения возрастает до 0,001.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования и полученные результаты позволяют рассмотреть возможности применения оптических методов для мониторинга угольной пыли и предотвращения взрывов в шахтах. Важнейшим выводом является подтверждение высокой чувствительности турбидиметрического метода при низких концентрациях пыли, что делает его перспективным для раннего обнаружения опасных ситуаций. Экспоненциальный характер поглощения света обеспечивает более значительное изменение интенсивности сигнала даже при небольших изменениях концентрации пыли. В шахтных условиях на результат может влиять наличие водяного пара и других газов, поглощающих излучение на длине волны лазера. В свою очередь нефелометрический метод демонстрирует потенциал для измерения высоких концентраций пыли, когда рассеянное излучение становится более интенсивным. Сопоставление этих двух методов указывает на возможность создания комбинированного пылемера, который будет автоматически переключаться между турбидиметрическим и нефелометрическим режимами в зависимости от уровня запыленности. Подобный подход позволит расширить диапазон измеряемых концентраций и повысить общую надежность системы мониторинга. Установлена закономерность, что с увеличением размера частиц возрастает и интенсивность взаимодействия света с пылевым облаком как в случае поглощения, так и рассеяния. Это открывает перспективы для разработки пылемеров, способных не только измерять концентрацию пыли, но и определять ее дисперсный состав. В частности, отношение интенсивности рассеянного света к интенсивности поглощенного света может быть использовано для оценки среднего размера частиц в аэрозоле. При этом полученные зависимости носят нелинейный характер, что требует применения сложных алгоритмов обработки данных и калибровки прибора с использованием эталонных образцов пыли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование посвящено актуальной задаче повышения безопасности в угольных шахтах путем разработки и совершенствования методов контроля концентрации и дисперсных параметров угольной пыли. Анализ различных методов измерения концентрации пыли показал, что оптические методы, в частности турбидиметрический и нефелометрический, являются наиболее перспективными в силу их высокой чувствительности и возможности определения параметров пылевого облака без предварительного отбора проб. Турбидиметрический метод обладает повышенной чувствительностью при низких концентрациях пыли (0,1-3 г/м^3), что делает его оптимальным для раннего обнаружения потенциально взрывоопасных ситуаций. При концентрации 1 г/м^3 интенсивность поглощенного света составляет всего 0,002 от начальной интенсивности лазерного излучения, что позволяет современным детекторам надежно регистрировать даже незначительные изменения концентрации. Нефелометрический метод, напротив, становится более эффективным при высоких концентрациях пыли, когда интенсивность рассеянного излучения существенно возрастает. Оба метода демонстрируют чувствительность к размеру частиц пыли, что открывает перспективы для разработки пылемеров, способных определять не только концентрацию, но и дисперсный состав аэрозоля.

Список литературы • References

1. Suprun E., Tynchenko V., Khramkov V., Kovalev G., Soloveva T. The use of artificial intelligence to diagnose the disease. *BIO Web of Conferences*. 2024;(84):01008. DOI: 10.1051/bioconf/20248401008.
2. Konyukhov V.Yu., Permyakova D.N., Oparina T.A. Perspective for the use of industrial waste in lubricating compositions to reduce wear in friction pairs. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012046.
3. Chernykh N., Mikhalev A., Dmitriev V., Tynchenko V., Shutkina E. Comparative Analysis of Existing Measures to Reduce Road Accidents in Western Europe. 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2023, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 2023:1-6. DOI: 10.1109/INFOTEH57020.2023.10094192.
4. Orlov V., Tynchenko V., Nizameeva A., Shalaeva D., Ageev D. Development of a multifunctional cross-platform system for automation of energy data and resource management. *E3S Web of Conferences*. 2023;460(24):07002. DOI: 10.1051/e3sconf/202346007002.
5. Tynchenko V., Kukartsev V., Shalaeva D., Zdrestova-Zaharenkova S., Dzhioeva N., Moiseeva K. Development of Automated Control System of Electron-Beam Welding Process. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;(596):484-490. DOI: 10.1007/978-3-031-21435-6_42.
6. Konstantinova M.V., Olentsevich A.A. Automation of failure forecasting on the subsystems of the V., Galyautdinov I.I., Shchadova E.I. Green building as a tool of energy saving. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019;350(1):012032.
7. Tynchenko V.S., Stashkevich A., Muzyka P., Leontieva A.A., Degtyareva K.V. Effective energy management tools: inventory management and monitoring of energy consumption by personnel. *E3S Web of Conferences*. 2023;(458):01011. DOI: 10.1051/e3sconf/202345801011.
8. Sakharov G.N., Il'inykh V.A., Konyukhov V.Yu. Improvement of fastening elements in an assembled cutting tool. *Soviet engineering research*. 1990;10(11):102-103.
9. Tynchenko V.S., Tynchenko Y.A., Rogova D.V., Leonteva A.A., Seregin Y.N., Bocharov A.N. Energy distribution computation for induction soldered construction elements. *AIP Conference Proceedings*. 2023;(2700):070017. DOI: 10.1063/5.0125008.
10. Antonov A.A., Studenikin D.E., Malakhov S.O., Kondratyev S.I., Khekert E.V. Algorithm for constructing a route to pass a narrow

fairway. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012116. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012116.

11. Volneikina E., Kukartseva O., Menshenin A., Tynchenko V., Degtyareva K. Simulation-Dynamic Modeling of Supply Chains Based on Big Data 2023. 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2023. DOI: 10.1109/INFOTEH57020.2023.10094168.
12. Tynchenko Ya.A., Kukartsev V.V., Gladkov A.A., Panfilova T.A. Assessment of technical water quality in mining based on machine learning methods. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1):56-69. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-56-69.
13. Golik V.I., Kukartsev V.A., Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Konyukhov V.Yu. The mechanochemical activation of leaching processes in a disintegrator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):175-189. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_175.
14. Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Bashmur K.A., Kondratiev V.V. To the concept of leaching metal-containing raw materials in the dizintegrator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):239-251. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_239.
15. Moshynskyi V., Zhomyruk R., Vasylchuk O., Rysbekov K., Yelemessov K. Investigation of technogenic deposits of phosphogypsum dumps. *E3S Web of Conferences*. 2021;(280):08008. DOI: 10.1051/e3sconf/202128008008.
16. Kravtsov K., Tynchenko V., Semenova E., Shalaeva D., Pinchuk I. Workflow automation and performance improvement based on PostgreSQL. *E3S Web of Conferences*. 2023;(458):09022. DOI: 10.1051/e3sconf/202345809022.
17. Kondratyev S.I., Baskanbayeva D., Yelemessov K., Sarsenbayev Y., Turkin V.A. Control of hydrogen leaks from storage tanks and fuel supply systems to mining transport infrastructure facilities. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;(95):212-216. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.182.
18. Antonov A.A., Studenikin D.E., Malakhov S.O., Kondratyev S.I., Khekert E.V. Algorithm for constructing a route to pass a narrow fairway. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012116. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012116.

Authors Information

Matasova I.Yu. – PhD (Geological Mineralogical), Associate Professor, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: semigorie@mail.ru

Masenko A.V. – Senior Lecturer of the Faculty of Energy, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation, e-mail: almasenko@yandex.ru

Sablina P.A. – Student of the Faculty of Energy, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044,Russian Federation, e-mail: viperaand@mail.ru

Kupriyanenko N.A. – Student of the Faculty of Energy, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation, e-mail: alexkgau@rambler.ru

Bovsh V.V. – Student of the Faculty of Energy, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation, e-mail: t9913552@yandex.ru

Komar E.V. – PhD (Physico-mathematical), Associate Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: elena70@inbox.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 15.04.2025
Поступила после рецензирования: 16.05.2025
Принята к публикации: 26.05.2025

Paper info
Received April 15, 2025
Reviewed May 16, 2025
Accepted May 26, 2025

Совет директоров АО ХК «СДС-Уголь» назначил на должность генерального директора АО «Черниговец» Юрия Дерябина. На должность исполнительного директора предприятия назначен Антон Якутов.

Оба руководителя уже работали на «Черниговце» и зарекомендовали себя как руководители высокого уровня с незаурядными организаторскими способностями.

Юрий Сергеевич Дерябин окончил Кемеровский политехнический институт. Свою карьеру начал на разрезе «Кедровский», где с 1985 до 2002 г. прошел путь от горного мастера до заместителя генерального директора по производству. С 2002 по 2012 г. поочередно занимал должности генерального директора разрезов «Караканский», «Киселевский», «Черниговец». В декабре 2012 г. был назначен генеральным директором АО ХК «СДС-Уголь».

Антон Васильевич Якутов, выпускник КузГТУ, пришел на должность исполнительного директора с поста генерального директора разреза «Восточный» (АО «Салек»). Первое место работы Антона Васильевича – Кедровский угольный разрез, где с 2008 по 2013 г. работал сначала горным мастером, затем заместителем начальника горного участка и начальником участка. В течение последующих двух лет проявил себя на руководящих должностях в Шахтоуправлении «Майское» (начальник управления горных работ), холдинговой компании «СДС-Уголь» (заместитель начальника департамента открытых горных работ), на разрезе «Черниговец» (начальник управления горных работ).

20 мая 2025 г. на должность директора шахты «Южная» (филиал АО «Черниговец») назначен Дмитрий Владимирович Пятерикин.

20 мая 2025 г. на должность директора ООО «Шахта «Листвяжная» назначен Альберт Фидаилович Салихов.

Перед новой командой стоит задача дать старт масштабной программе развития разреза на ближайшие годы и обеспечить стабильное выполнение производственных планов по всем показателям.

По материалам ХК «СДС-Уголь»