I. АКТУАЛЬНО
I. URGENT



Д.А. Трубицына //
D.A. Trubitsyna
dtrubitsyna@gmail.com

зам. директора по развитию ООО "Горный-ЦОТ", Россия, 650002, Кемеровская обл., г Кемерово, Сосновый бульвар, 1
Deputy Director for Development "Gorniy-TSOT" Ltd, Sosoniy bulvar, 1, Kemerovo, Kemerovskaja obl., 650002, Russia



С.Н. Подображин //
S.N. Podobrazhin
tghcn13@mail.ru

д.т.н., старший научный сотрудник ЗАО НТЦ "Промышленная безопасность", Россия, 109147, г. Москва ул. Таганская д. 34а
Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, CJSC Scientific and Technical Center "Industrial Safety", Ulitsa Taganskaja, 34a, Moscow, 109147, Russia

УДК 622.81

УМНЫЕ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОТЛОЖЕНИЙ ПЫЛИ ПО СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ

SMART SYSTEMS FOR CONTINUOUS AUTOMATIC CONTROL OF DUST DEPOSITS IN THE NETWORK OF COAL MINES

Актуально задачей современных исследований в области промышленной безопастности остаются вопросы борьбы с пылью. Для повышения уровня пылевзрывозащиты угольных предприятий необходим объективный инструментальный способ контроля пылевзрывобезопасности выработок, обеспечивающий высокую точность, оперативностью и простоту в эксплуатации. Приведены теоретическое обоснование и результаты испытаний системы непрерывного автоматического контроля концентрации пыли в рудничной атмосфере и отложений пыли как подсистемы МФСБ угольной шахты. Анализ современного российского и международного опыт в области создания приборов контроля параметров угольного аэрозоля показал, что существующие способы и средства контроля запыленности и пылевзрывобезопасности горных выработок не обеспечивают выполнение требований положений нормативных документов в полной мере, поэтому целью исследований является решение данной проблемы. Показано, что в связи с требованиями новых нормативных документов контроль состояния аэрологической безопасности горных выработок можно осуществлять в режиме реального времени с помощью системы нового поколения с использованием искусственного интеллекта, которая позволяет проводить измерения базовых физических параметров, влияющих на пылеотложение, например: дисперсный состав, влажность воздуха, концентрация пыли и скорость воздушного потока. Проведенный комплекс лабораторных и шахтных исследований разработанной системы непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложений - прибора СКИП подтвердил правильность разработанной физической модели для оценки состояния пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт.

Dust control remains an urgent task of modern research in the field of industrial safety. To increase the level of dust explosion protection of coal enterprises, an objective instrumental method is required to control the dust explosion safety of mine workings, which provides high accuracy, efficiency and ease of use. The theoretical substantiation and test results of a system for continuous automatic control of the concentration of dust in the mine atmosphere and dust deposits as a subsystem of the MFSS of a coal mine are presented. Analysis of modern Russian and international experience in the field of creating devices for monitoring the parameters of coal aerosol showed that the existing methods and means for monitoring dustiness and dust explosion safety of mine workings do not fully meet the requirements of the provisions of regulatory documents, therefore, the purpose of research is to solve this problem. It is shown that in connection with the requirements of new regulatory documents, monitoring of the state of upper-air safety of mine workings can be carried out in real time using a new generation system using artificial intelligence, which allows measurements of basic physical parameters affecting dust deposition, for example: dispersed composition, humidity air, dust concentration and air velocity. The complex of laboratory and mine studies of the developed system of continuous automatic control of dust content and intensity of dust deposits - the SKIP device - confirmed the correctness of the developed physical model for assessing the state of dust explosion safety in coal mines.

Ключевые слова: *УГОЛЬНАЯ ШАХТА, ПЫЛЕОТЛОЖЕНИЕ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ, МФСБ, ЗАПЫЛЕННОСТЬ, АЭРОЗОЛИ, ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ, ПОДСИСТЕМА, СОСТАВ ПОДСИСТЕМЫ, ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ ЧАСТИ, ШАХТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ, ПАРАМЕТРЫ.*

Key words: *COAL MINE, DUST DEPOSITION, MULTIFUNCTIONAL SAFETY SYSTEM, MFSS, DUSTINESS, AEROSOLS, DISPERSED COMPOSITION, SUBSYSTEM, SUBSYSTEM COMPOSITION, FUNCTIONAL AND SUPPORTING PARTS, MINE TESTS, PARAMETERS.*

Одной из главных экологических повесток современного мира является загрязнение пылью. Мельчайшие взвешенные частицы попадают в атмосферу населенных пунктов, и без того сильно загрязненных промышленными выбросами и выхлопными газами. Ухудшение экологической обстановки неизбежно приводит к негативным последствиям: росту заболеваемости, в том числе онкологическими, ухудшению качества сельскохозяйственных земель, ухудшению видимости, снижение качества питьевой воды и другим. С ростом добычи угля, растет и нагрузка на угольные предприятия, что приводит к сопутствующему росту нагрузки на окружающую среду в окрестностях производств и терминалов.

Кроме экологических и эксплуатационных рисков, угольная пыль создает угрозы аварийных ситуаций на горных производствах. За последние десятилетия на шахтах РФ, ближнего зарубежья, а так же Индии и Китая практически во всех взрывах, имеющих крупномасштабные разрушения и приводящих к травмам и гибели работников предприятий, участвовала пылеметановоздушная смесь. До сих пор взрывы газа и угольной пыли остаются авариями с наиболее тяжкими последствиями в экономическом и социальном плане. В случаях, если взвешенная или отложившаяся пыль в горных выработках превосходит ее нижний предел взрываемости, при воспламенении это приведет к эффекту динамически расширяющегося объемного взрыва. Поэтому взрывы пылеметановых аэрозолей относятся к наболее опасным взрывам по сравнению со вспышками метана. Актуальным вопросом для предотвращения взрывов угольной пыли является борьбы с пылью, а также исследования свойств и процессов её образования, распространения и отложения в горных выработках. Исследованиями по решению проблем пылеподавления и пылевзрывозащиты занимались ученые, как в СССР, России, так и в Польше, Чехии, Словакии, Голландии, США, Франции и т.д. [1-3].

Контроль пылевзрывобезопасности горных выработок согласно требованиям безопасности производится специальными приборами или другой аппаратурой непрерывного действия. Для повышения уровня пылевзрывозащиты необходим объективный инструментальный способ контроля пылевзрывобезопасности выработок, который должен обеспечивать высокую точность, оперативностью и простоту в эксплуатации. Наиболее оптимальным в этом аспекте представляется способ непрерывного автоматизированного инструментального контроля интенсивности пылеотложения с возможностью определения взрывоопасного отложения пыли, позволяющий выработать и принять оперативные меры для нейтрализации нарушений пылевого режима.

Для обеспечения инструментального контроля наличия взрывоопасного количества отложившейся угольной пыли в горных выработках ВостНИИ разработана приставка к прибору ДПВ-1, принцип действия которой основан на срыве отложившейся пыли струей воздуха, выходящей с большой скоростью из сопла, с последующим засасыванием образовавшегося запыленного воздуха на фильтр, снятием показаний шкалы и расчетом величины пылеотложения на единицу поверхности.

Для контроля наличия взрывоопасного количества отложившейся угольной пыли в горных выработках созданы приборы: портативный анализатор «Инфлабар» (Польша), переносной радиоизотопный прибор КОР-1 и КПР-1М (МакНИИ, Украина) и ряд станций пылевого контроля и радиоизотопных экспресс-пылемеров. В России были выпущены ПРИз, ИКАР, РКП-5, ИКАР-ФБ-01, Прима; во Франции - MPS1-100 (Environnement); в Италии - MPS 100 (ELRKOS SpA); в США - Mass Monitor RDM-101, RDM-201, RDM-301; в Германии - Beta-Staubmetr, Staubmonitor, FH-62A, FH-62C; в Голландии - бета-монитор пыли мод. 9700 (Phillips).

Однако в данных и во вновь создаваемых современных приборах нет функции по автоматическому определению интенсивности пылеотложения.

В последние годы благодаря развитию цифровых технологий и Индустрии 4.0 прослеживается четкая тенденция автоматизации систем безопасности и охраны труда на предпри-

ятиях угольной промышленности, в связи с чем создаются новые технологии дистанционного контроля запыленности рудничной атмосферы с передачей информации в системы аэрогазового контроля (АГК) предприятий. Такие система должны состоять из датчиков запыленности воздуха, контроллеров, блоков сбора и передачи информации в системы АГК. Программное обеспечение должно проводить обработку и представление результатов в читаемом и понятном для диспетчера виде. Основным элементом этой системы является датчик замера запыленности воздуха или отложившейся пыли. Весь опыт пылевого контроля в угольных шахтах свидетельствует о том, что датчики запыленности в автоматических системах могут быть двух видов: оптические или радиоизотопные [14].

Немецкая фирма «HELMUT HUND GMBH» разработала стационарный оптический измеритель тонкодисперсной пыли «FMA-TMS-1», который использовался на предприятиях Германии в автоматических системах контроля запыленности. Стационарная система для измерения тонкодисперсных аэрозолей «FMA-TMS-1» работает по оптическому принципу, так же как и другие приборы серии ТМ. Измерительная система состоит из измерительной камеры (датчика) и обрабатывающего устройства, разработанного в виде стационарной установки для автоматического измерения и самодиагностики. Преимуществами данной конструкции являются низкие расходы на обслуживание, экономичность при продолжительной эксплуатации, простота установки.

Вышесказанное показывает на принципиальную возможность создания системы дистанционного автоматического контроля пылевзрывобезопасности горных выработок, однако из-за ряда выявленных конструктивных и схемотехнических недостатков она не вышла из стадии экспериментальных работ.

В соответствии с пунктом 22 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». утвержденных приказом Ростехнадзора от 8.12.2020 № 507, зарегистрированных Минюстом России 18.12.2020 № 61587, (далее – Правила безопасности), современные многофункциональные системы безопасности (МФСБ) угольных шахт должны включать в свой состав подсистему, которая должна обеспечивать мониторинг параметров безопасности шахты и предупреждение условий возникновения опасности аэрологического характера, а состав МФСБ должен предусматривать контроль аэрологической безопасности. Пункт 23 Правил безопасности в угольных шахтах закрепляет требование о необходимости соответствия МФСБ нормам в области промышленной безопасности и технического регулирования, обеспечения единства средств измерений и стандартов на взрывозащищенное электрооборудование, автоматизированные системы управления, информационные технологии, измерительные системы и газоаналитическое оборудование [15].

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт», утвержденные приказом Ростехнадзора от 8.12.2020 № 506, зарегистрированные Минюстом России 29.12.2020 г. рег. № 61918 (далее – Инструкция), устанавливает требования к обеспечению системами автоматического непрерывного измерения концентрации пыли в рудничной атмосфере и (или) отложения пыли, телеизмерение от всех датчиков пыли; телесигнализацию (световую и (или) звуковую) при превышении пороговых значений концентраций пыли в рудничной атмосфере и (или) отложений пыли и при отказе датчиков пыли, а также в целях осуществления дистанционного мониторинга (контроля) параметров безопасности сведения о пороговых значениях концентраций пыли в рудничной атмосфере и (или) отложений пыли должны автоматически передаваться в режиме реального времени по каналам связи в угледобывающую организацию [16].

Существующие способы и средства контроля запыленности и пылевзрывобезопасности горных выработок не обеспечивают выполнение требований положений нормативных документов в полной мере, поэтому целью исследований является решение данной проблемы. Необходимо исследовать и установить закономерности процесса пылеотложений витающей угольной пыли в зависимости от различных факторов, влияющих на распределение пыли по сети горных выработок, а именно - марочного состава угля, комплекса технологических параметров, таких как нагрузка на забои, скорость вентиляции и параметров атмосферных показателей. На следующем этапе необходимо разработать новые методы и средства для оценки и контроля состояния пылевзрывобезопасности горных выработок.

Результаты проведенных исследований по установлению закономерностей процесса пылеотложений угольной пыли по сети горных выработок показали следующее [4-8].

Анализ средних значений плотности рас-

пределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 50, 300 и 500 метрах от забоя показывает, что дисперсный состав пыли существенно зависит от марочного состава угля. С увеличением стадии метаморфизма выход мелких фракций угольной пыли значительно увеличивается. Максимальное значение дисперсного состава смещается от низко- к высокометаморфизованным углям с 41 мкм до 33 мкм, т.е. в среднем на 25% [6].

Плотность распределения пылевых фракций при разрушении угля зависит от марочного состава и с ростом степени метаморфизма угля сдвигается на 20–25 % в сторону увеличения выхода мелких фракций пыли для углей марок К и Ж. Это существенно повышает пылевзрывоопасность по длине выработки и требует пересмотра норм осланцевания и качества пылевзрывозащитных мероприятий.

В результате проведенных комплексных исследований установлено, что дисперсный состав пыли, образующейся при разрушении каменных углей высокой стадии метаморфизма характеризуется мономодальным распределением с преимущественным содержанием фракций до 37 мкм. Угли марок Д и Г имеют полимодальное распределение с максимумами весовых долей фракций соответственно в диапазонах 38-45 и 66-75 мкм.

В результате проведенных шахтных исследований установлено, что при современных нагрузках на очистные забои резко возрастают общее поступление тонких фракций в атмосферу и интенсивность отложения в горных выработках угольной пыли. При этом интенсивность пылеотложений по длине выработки уменьшается с удалением от лавы, а максимум пылеотложений 50–120 г/(м^3•сут) находится на расстоянии до 100 м от лавы, и далее происходит равномерное снижение пылеотложения до 8–20 г/(м^3•сут). При таких значениях интенсивности пылеотложений выработка переходит во взрывоопасное состояние уже через несколько часов работы по выемке угля [13].

Во время проведения исследований в шахтах одновременно с отбором проб на подложки регистрировали средние значения показаний стационарных датчиков запыленности. В результате получены зависимости интенсивности пылеотложений от запыленности воздуха в местах установки датчика запыленности и закономерности распределения интенсивности пылеотложений по длине выработки, что позволяет рассчитывать показатели пылевзрывобезопасности горных выработок на основании измерений концентрации пыли в воздухе на исходящей струе из забоя.

Сравнение расчетных значений интенсивности пылеотложений, данных, полученных по подложкам и по результатам пересчета концентрации витающей пыли с помощью двух датчиков ИЗСТ-01 в соответствии с «Методикой (метод) измерения количества отложившейся пыли с использованием измерителей запыленности стационарных ИЗСТ-01» (свидетельство об аттестации № 28/RA.RU..RU.10473/2017) [16] показало хорошую сходимость результатов шахтных испытаний и расчетного метода (погрешность находилась в диапазоне ±16÷24 % в зависимости от диапазона). Таким образом, анализ результатов проведенного комплекса лабораторных и шахтных исследований показал, что для определения основного показателя уровня пылевзрывоопасности горных выработок в угольных шахтах необходимо определение величины интенсивности пылеотложения от одного источника интенсивного пылевыделения до следующего, следует проводить на основе измерения концентрации витающей пыли, распределения дисперсного состава витающей пыли, влажности, температуры, скорости движения воздуха.

В настоящее время методы определения концентрации аэрозолей в сочетании с определением дисперсного состава частиц, находящихся в свободном (взвешенном) состоянии в воздухе атмосферы можно разделить на два типа: контактные и бесконтактные. К контактным методам можно отнести методы пробоотбора, а к бесконтактным методам можно отнести оптические, и частично трибоэлектрические.

Оптический метод измерения дисперсного состава и концентрации аэрозоля не воздействует на частицы, находящие в потоке, скорость регистрации позволяет проводить измерения в режиме реального времени.

Определим функцию распределения частиц для полидисперсной системы от размера частицы:

$$\int_0^\infty f(x)dx = 1 \qquad (1)$$

При этом, определим $df(x)=f(x)dx$ как долю частиц, из диапазона размеров $(x,x+dx)$.

Также определим порядки момента через следующую формулу:

$$x_{mn} = \left[\frac{\int_0^\infty x^m f(x)\,dx}{\int_0^\infty x^n f(x)\,dx}\right]^{\frac{1}{m-n}}, \qquad (2)$$

где n, m - обозначения порядка момента функции

распределения.

Основные порядки моментов: x_{10} – средне счетный, x_{30} – среднеобъемный, x_{43} – среднемассовый.

Анализ литературных данных показал, что описания различных гранулометрических систем с унимодальным распределением можно применять следующие обобщенные законы распределения: гамма-распределение, логарифмически нормальное распределение, нормальное распределение.

В тоже время первоначальные поток излучения ослабляется за счет поглощения излучения самой частицей, а также за счет рассеяния излучения на частице. Введем количественные параметры оценки влияния частицы на поле излучения:

$$Z_{ослабления} = Z_{рассеяния} + Z_{поглощения}, \quad (3)$$

здесь $Z_{рассеяния}$ - доля излучения ушедшего из рассматриваемого пучка ; $Z_{поглощения}$ - доля излучения поглощённого из пучка.

Перепишем оценку взаимодействия частиц с излучением через коэффициенты, связав площадь поверхности частиц с попадающим, либо рассеиваемым излучением:

$$K_X = \frac{\pi D^2}{4} Z_X, \quad (4)$$

где Z_x – соответствующая оценка излучения из (3).

Определим индикатрису рассеяния как функцию отношения интенсивности светового потока отраженного в каждое значение угла θ к полному потоку излучения, направленного на частицу. Данная функция является безразмерной от угла рассеяния θ, а сумма ее значений (интеграл) по углу рассеяния равен единице. Количественные характеристики для идеальных частиц – однородных и сферической формы, определяются двумя параметрами - показателем преломления материала составляющего частицу и безразмерным параметром дифракции:

$$m = n - in' \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}, \quad (6)$$

где n – показатель преломления, n' – показатель поглощения, λ – длина волны зондирующего излучения.

В качестве частиц, на которых происходит рассеяние излучения, могут выступать частицы с размерами от молекулы до витающих частиц угля размерами десятки микрометров, а также различные оптические неоднородности. Если размер частицы менее $\lambda/15$, то наблюдается релеевское рассеяние. При значениях более $\lambda/15$ - рассеяние Ми, при размерах частицы, сопоставимых с длиной волны λ - преобладает дифракционное рассеяние. Также теория Релея имеет еще ряд существенных ограничений для применения при измерениях реальных пылевых аэрозолей, применима лишь при выполнении ряда условий: среда, в которой распространяется зондирующее излучение, и частицы не должны содержать свободные заряды; магнитная проницаемость среды и частицы одинакова; размер рассеивающей частицы не более 10% длины волны; интенсивность рассеянного света вычисляется для точек весьма удалённых от возмущающей частицы (в дальней зоне $kr >> 1$).

Для работы с частицами, не подчиняющимися рэлеевскому закону рассеяния, используют теорию рассеяния Ми, которая показывает трансформацию индикатрис рассеяния при возрастании размеров рассеивателей. Теория Ми основана на разложении уравнений переизлучения электромагнитной волны (6). Также в теории Ми индикатрисы теряют свою симметричность – рассеяние вперед может быть значительно больше, чем рассеивание назад, и индикатриса рассеяния становятся многолепестковой. Кроме того, снижается частотная зависимость интенсивности рассеяния по отношению к закону Рэлея.

Аналитическое решение проблем эффективности рассеяния и получения индикатрисы рассеяния было получено в результате решения задачи рассеяния электромагнитной волны с заданным направлением на однородной частице сферической формы. Численные решения аналитической формы из-за больших вычислительных нагрузок возможны только с использованием компьютеров.

Первоначально будем рассматривать монодисперсную среду с равномерным заполнением частичками диаметром D и количеством частиц C_n, в которой распространяется параллельный зондирующий пучок с длиной волны λ, проходящий через слой аэрозоля толщиной l. Для описания ослабления данного пучка обратимся к закону Бугера.

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l}, \quad (7)$$

где $I(l)$ - интенсивность света, прошедшего через слой вещества толщиной l; k_λ – спектральный показатель ослабления зависящий от длины волны зондирующего пучка, при условии нахождения частиц независимо рассеивающих пучок.

Распишем спектральный показатель преломления и свяжем его с количеством и размером частиц:

$$k_\lambda = \frac{\pi D^2}{4} C_n Q(\alpha, m) \quad (8)$$

где $Q(a,m)$ - фактор эффективности ослабления с параметром дифракции и комплексным показателем преломления для угля $m = 1{,}54 - 0{,}5i$.

Характеристики излучения для монодисперсной среды получаются суммированием результатов одиночных взаимодействий с каждой частицей.

При переходе к работе с полидисперсными средами, мы оставляем предположение, что частицы имею сферическую форму, и рассеяние света на частицах происходит независимо друг от друга. Также мы будем рассматривать слой аэрозоля как достаточно тонкий, чтобы исключить влияние рассеивания второго и более высоких порядков.

Перейдем от счетной концентрации к массовой используя (1):

$$C_m = C_n \frac{\pi \rho_k {C_n}^2}{6} \int_0^\infty D^3 f(D) dD \quad (9)$$

и запишем формулу спектрального показателя ослабления полидисперсной системы для массовой концентрации.

$$k_\lambda = \frac{\pi C_m \int_0^\infty Q(\alpha, m) D^2 f(D) dD}{2 \rho_k \int_0^\infty D^3 f(D) dD} \quad (10)$$

где ρ_k – плотность частиц.

Получая этот показатель, мы определяем дисперсность пылевых частиц в атмосфере шахты. Показатели дисперсного состава пыли и ее влажность являются существенными, т.к. оказывают влияние на интенсивность пылеотложений. Дисперсный состав пыли и влажность оказывают существенное влияние на сдуваемость пыли. Если пыль сухая, то скорость, при которой начинается ее сдувание гораздо ниже. Одновременно, по мере продвижения запыленного воздуха по горным выработкам его дисперсный состав изменяется. Это происходит за счет того, что выпадают наиболее крупные фракции пыли.

Интенсивность пылеотложения, полученная по результатам проведенных лабораторных и шахтных исследований, определяется по формуле:

$$P_t = 86{,}4 \frac{f(r) v l^B}{S(W + W_B)} \text{ г/м}^3\text{сут.} \quad (11)$$

где v - скорость движения воздуха по выработке, м/с;

l - расстояние от источника пылеобразования, м;

S - сечение выработки, м^2;

B - коэффициент, учитывающий влияние степени метаморфизма угля;

$f(r)$- суммарное значение функции распределения частиц по размеру в момент измерения концентрации, мг/м^3;

W- естественная влажность угля,%;

W_B - относительная влажность воздуха в горной выработке, %.

Это дает основание для создания системы контроля интенсивности пылеотложений [13].

Результаты проведенных теоретических и лабораторных исследований по изучению закономерностей пылеотложений реализованы в системе непрерывного автоматического контроля запыленности шахтной атмосферы и интенсивности пылеотложений [7-13] (далее – прибор СКИП), схема которого представлена на рис.1.

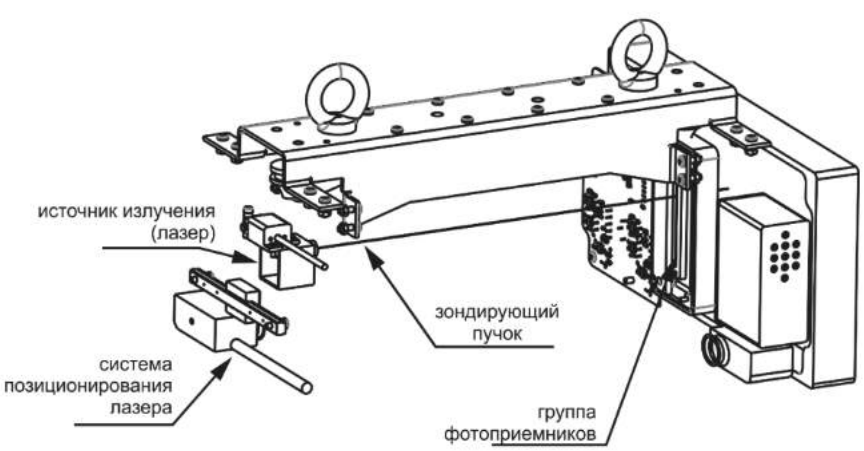


Рисунок 1. Схема прибора контроля запыленности и интенсивности пылеотложений СКИП
Figure 1. Scheme of the device for monitoring dust content and intensity of dust deposition SKIP

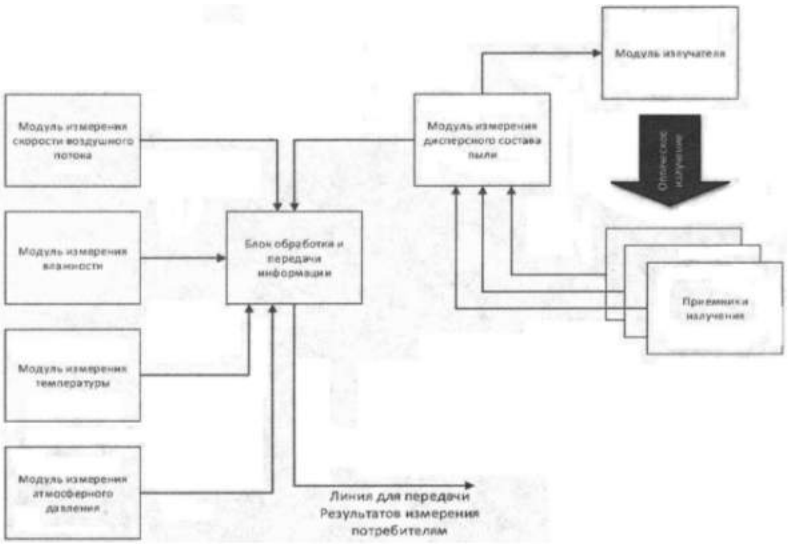


Рисунок 2. Принципиальная схема системы непрерывного автоматического контроля интенсивности пылеотложения с применением искусственного интеллекта – прибора СКИП
Figure 2. SSchematic diagram of a system for continuous automatic control of the intensity of dust deposition using artificial intelligence - the SKIP device

Разработанная высокотехнологичная инновационная система нового поколения с использованием искусственного интеллекта, позволяет проводить измерения базовых физических параметров, влияющих на пылеотложение: дисперсный состав, концентрация пыли и скорость воздушного потока и пр. Самообучающаяся искусственная нейронная сеть автоматически, оценив все доминантные параметры окружающей внешней среды и динамики полидисперсной системы, позволяет с минимальной погрешностью определить физический принцип определения основного измеряемого показателя – интенсивность пылеотложений и обучить нейросеть правильной оценке пылеотложения при постоянно меняющихся внешних условиях.

Основной измерительный блок системы содержит твердотельный лазер, оптическую систему зеркал и фильтров, систему стабилизации лазерного излучения, блоки фотоприёмников отвечающих за сбор рассеянного излучения, вычислительное устройство, блок стабилизированного питания и интерфейсы для подключения к электронным весам и внешним устройствам. Принцип действия измерителя основан на регистрации рассеянного лазерного излучения для вычисления концентрации витающей пыли и оценки дисперсного состава - данный метод измерения называется малоугловое рассеяние света. Измеренный уровень излучения с фотоприёмников (768 штук) и фотоматрицы передается в вычислительное устройство, которое непосредственно вычисляет текущую концентрацию пыли и дисперсный состав, далее эти данные комбинируются со скоростью воздушного потока, влажностью, а также показаниями весов и передаются в блок, отвечающий за обучение нейросети. Для обучения нейросети в систему входит набор специализированных весов непрерывного измерения пылеотложения. Использование оригинальной конструкции весов, а также алгоритмов позволяет измерять только оседающую пыль и распознавать нежелательные частицы на платформе весов.

После проведения обучения нейросети, весы отключаются от системы и далее она продолжает функционировать автономно используя для расчётов обученную нейросеть. В дальнейшем весы используются для проверки корректности работы системы и дообучения нейросети.

Использование данной системы позволяет решить проблему измерения концентрации пыли и пылеотложения на шахте с постоянно меняющимися условиями труда и расположением оборудования. Это позволило с минимальной погрешностью измерения не только регистрировать концентрацию витающей пыли, но и увеличить видимый спектр размеров частиц до диапазона 0-150 мкм, что позволяет практически осуществлять мгновенный анализ дисперсного состава витающей пыли, необходимого для расчета интенсивности пылеотложений до следующего источника интенсивного пылевыделения

Принципиальная схема предлагаемой системы непрерывного автоматического контроля интенсивности пылеотложения предоставлена на рисунке 2, где показана схема передачи и обработки сигналов.

Оптические датчики реагируют на непрозрачные и полупрозрачные предметы, водяной

Таблица 1. Основные характеристики прибора СКИП
Table 1. Main characteristics of the SKIP device

Показатель, ед. изм.	Диапазоны измерения
Количество отложившейся пыли, г/м^3 сут.	До 150
Массовая концентрация витающей пыли, мг/м$_3$	0-3000
Скорость движения воздушного потока, м/с	От 0,1 до 20
Температура воздушного потока, t°C	От -40 до +40
Относительная влажность воздушного потока, %	От 20 до 90 при +20°C
Диаметры частиц, мкм	0-150

пар, дым, аэрозоли. Предмет, попавший в активную зону оптического датчика, вносит изменения в прохождение луча. В данном случае, это пылевые частицы разного размера. В основе работы датчика лежит принцип использования оптического метода малых углов рассеяния для определения дисперсности пыли. Изменение фиксируется приёмниками, расположенными под разными углами к лучу. Появившийся сигнал, после обработки, подаётся на модуль расчета дисперсного состава пыли, где происходит обработка, преобразование сигналов из аналогового в цифровой и сравнение сигналов, затем определяется гранулометрический состав пыли. Затем данные поступают на блок обработки и передачи информации, где информация анализируется во взаимосвязи с поступившей информацией с модулей скорости воздушного потока, измерения влажности, температуры и атмосферного давления. В зависимости от гранулометрического состава атмосферы, скорости воздушного потока и влажности воздуха расчетно определяется характер распределения пылеотложения.

Модуль измерения скорости воздушного потока базируется на принципе действия ультразвукового анемометра.

Модули измерения влажности и температуры содержат датчики влажности и температуры соответственно.

Модуль измерения атмосферного давления содержит датчик давления.

Блоком обработки и передачи информации сигналы с датчиков обрабатываются и передаются на дисплей, где одновременно с информацией о характере пылеотложения показана информация о дисперсности пыли. В блоке обработки и передачи информации производится математическая обработка, а на дисплей информация выводится как в цифровом виде, так и графическом, что усиливает наглядность подаваемой информации. Анализ дисперсного состояния пыли с учетом скорости движения воздуха и его влажности позволит оперативно и наиболее точно определить показатель интенсивности пылеотложения.

В программном комплексе искусственной нейронной сети также доступны файлы конфигурации, сообщения об ошибках и статистические данные. Цифровой блок сбора данных может получать данные от системы, используя команды последовательного протокола или записывая их автоматически в режиме онлайн.

Программные продукты системы позволяют управлять работой приборов, собирать и обрабатывать данные, моделировать и делать прогнозы по динамике запыленности, интенсивности пылеотложений, микроклиматическим параметрам. Программные комплексы системы решают задачи в режиме реального времени (онлайн), технического (аппаратного) и информационного характера. Программный продукт создан и является объектом авторского права ООО «Горный-ЦОТ».

Программа работает в двух режимах:

1) одноразовый, интервальный — измерения проводятся в течение заранее установленного интервала времени;

2) многоразовый, цикличный — начало каждого цикла измерений синхронизируется с началом очередного часа по часам диспетчера.

Данные (вводимые в вычислительном блоке) в режиме онлайн выводятся в информационно доступном режиме - в виде диаграмм на экране монитора. Для уменьшения влияние случайной составляющей погрешности на результаты измерений, используют метод наименьших квадратов для линейной аппроксимации калибровочных данных.

Данные (количество и номера цифровых и аналоговых каналов, период дискретизации, продолжительность и количество сеансов измерения, калибровочные данные и т.д.), необходимые для работы программы содержатся в data-файлах - это платформа данных, которая помогает получать необходимую информацию в

Таблица 2. Результаты шахтных испытаний прибора СКИП

Table 2. Results of mine tests of the SKIP device

Номер подложки	Расстояние от СКИП, м	Начальный вес, г	Конечный вес, г	Привес, г	Интенсивность пылеотложений, г/м³ сут.	Показания СКИП, г/м³ сут.
1	0	7,1772	7,8753	0,6981	71,3550	67,1760
2	10	7,0750	7,7402	0,6653	67,9950	65,8600
3	20	7,1547	7,7575	0,6028	61,6140	62,0680
4	30	7,2555	7,8196	0,5641	57,6590	56,2320
5	40	7,1095	7,6569	0,5474	55,9500	48,9820
6	50	7,3670	7,8234	0,4564	46,6490	41,0350
7	100	6,9936	7,1072	0,1136	11,6090	9,7311
8	150	7,0949	7,1067	0,0119	1,2143	3,4780
9	200	7,1463	7,2540	0,1077	11,0050	2,7623
10	250	6,9055	6,9534	0,0478	4,8895	2,7403
11	300	7,2079	7,2344	0,0266	2,7136	2,7400
12	350	7,1493	7,1871	0,0377	3,8579	2,7300
13	400	7,1497	7,2417	0,0920	9,4060	2,7100
14	450	7,2354	7,3994	0,1640	16,7630	2,7100
15	500	7,2652	7,2753	0,0100	1,0268	2,7000
16	0	7,0825	7,7705	0,6880	70,3160	67,1760
17	10	6,9705	7,6704	0,6999	71,5330	65,8600
18	20	7,2570	7,8874	0,6304	64,4290	62,0680
19	30	7,1748	7,7376	0,5628	57,5270	56,2320
20	40	7,2798	7,8500	0,5701	58,2710	48,9820
21	50	7,0310	7,5396	0,5087	51,9890	41,0350
22	100	7,1689	7,2593	0,0904	9,2388	9,7311
23	150	7,0615	7,1106	0,0491	5,0136	3,4780
24	200	7,2930	7,3033	0,0103	1,0575	2,7623
25	250	7,0739	7,1665	0,0926	9,4676	2,7403
26	300	7,1295	7,2226	0,0931	9,5165	2,7400
27	350	7,0983	7,1503	0,0520	5,3174	2,7300
28	400	7,2593	7,2680	0,0087	0,8915	2,7100
29	450	7,1914	7,2146	0,0232	2,3686	2,7100
30	500	7,0195	7,0985	0,0790	8,0716	2,7000

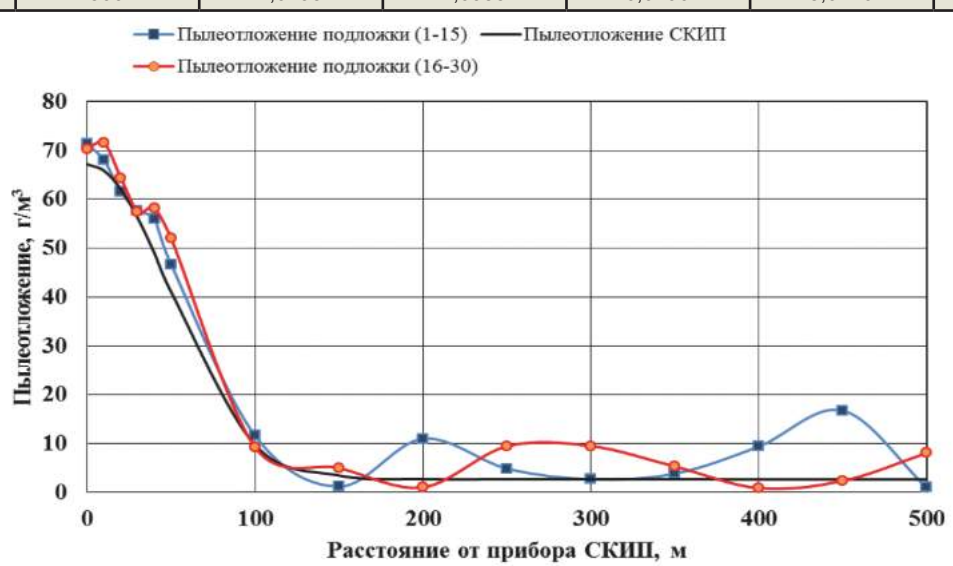


Рисунок 3. Результаты сравнительного анализа измерения интенсивности пылеотложений с помощью СКИП и расчетным методом с помощью подложек

Figure 3. Performan comparative analysis measurement dust deposits intensity using SKIP and calculated by using substrates

режиме онлайн и с использованием нейросетей.

Основные метрологические характеристики прибора СКИП приведены в таблице 1.

Результаты проведения шахтных испытаний прибора СКИП с целью апробации предложенного метода контроля запыленности и интенсивности пылеотложений в горных выработках представлены в таблице 2 и на рис. 3.

Измерение интенсивности пылеотложения осуществлялось через измерение массовой концентрации пыли и ее дисперсного состава. Методика испытаний состояла в следующем. В месте проведения испытаний системы непрерывного автоматического контроля интенсивности пылеотложения в горной выработке шахты устанавливался прибор СКИП и пластмассовые или металлические подложки (далее по тексту подложки). Прибор СКИП подключался к блоку питания для индикации показаний результатов измерения запыленности воздуха в месте установки и последующей обработки с целью определения интенсивности пылеотложения (количества отложившейся пыли) в горной выработке. Первые 12 подложек размещались через каждые 10 метров, таким образом, чтобы их открытые поверхности не были экранированы от вентиляционной струи элементами крепи и различными предметами. Далее размещались по две подложки через каждые 50 м на расстоянии 200 м от места установки прибора СКИП. Все подложки размещались на почве в горной выработке на расстоянии от 10 до 50 см от бортов выработки. Отбор проб угольной пыли проводился ежесуточно в течение пяти суток:

- после проведения пылевзрывозащитных мероприятий (осланцевания выработки), пронумерованные подложки без угольной пыли устанавливались на месте отбора.

- через сутки, перед очередным проведением пылевзрывозащитных мероприятий пронумерованные подложки с угольной пылью герметично упаковывались в отдельные соответственно пронумерованные мешки, а затем упаковывались в один мешок с этикеткой, которая содержала информацию о наименовании пробы, номере пробы, месте и дате отбора пробы.

Выводы.

1. Проведенный комплекс лабораторных и шахтных исследований разработанной системы непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложений - прибора СКИП подтвердил правильность разработанной физической модели для оценки состояния пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт. Прибор СКИП оснащен метками для систем АГК различной модификации и сертифицирован в составе этих систем как средство измерения заявленных параметров, что позволило выводить показания прибора СКИП на монитор диспетчера угольного предприятия.

2. Разработанная система непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложений - прибор СКИП проходит испытания по установлению типа средства измерения и процедуру внесения в Госреестр средств измерений. Освоено серийное производство прибора СКИП на производственной площадке ООО «Горный-ЦОТ».

3. Разработанная система непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложений - прибор СКИП отвечает современным требованиям Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», утвержденных приказом Ростехнадзора от 8.12.2020 г. № 507, зарегистрированных Минюстом России 18.12.2020 г. № 61587 [14] в части наличия в составе МФСБ системы контроля запыленности воздуха и пылевых отложений и Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт», утвержденных приказом Ростехнадзора от 8.12. 2020 г. № 506, зарегистрированных Минюстом России 29.12.2020 г. Рег. № 61918 [16] в части автоматического непрерывного измерения концентрации пыли в рудничной атмосфере и (или) отложения пыли, телеизмерения, телесигнализации при превышении пороговых значений концентраций отложений пыли и при отказе датчиков пыли, а также местной световой и (или) звуковой сигнализации; а также автоматической передачи данных о превышении пороговых значений концентраций пыли в рудничной атмосфере и (или) отложений пыли в режиме реального времени по каналам связи в угледобывающую организацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нецепляев, М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин. – М.: Недра, 1992. – 298 с.
2. Cybulski W. Badania nad granicznymi wybuchowymi stezeniami pyltu weglowego. Prace ownego Instytutu Gornictwa.

– Katowice, 1954.
3. Поздняков Г.А., Закутский Е.Л. Процесс накопления пыли и контроль пылевзрывобезопасности горных выработок. Научные сообщения / ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. М. 2007. – Вып. 321. – с. 253-265.
4. Ищук И.Г., Трубицына Д.А., Ботвенко Д.В. Закономерности изменения запыленности воздуха при различных нагрузках на очистные комбайновые забои (результаты новых исследований// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. т. 7. с. 206-211.
5. Ботвенко Д.В., Панов С.В., Хлудов Д.С., Трубицына Д.А. Исследование закономерностей пылевыделения при ведении проходческих работ// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. т. 7. с. 212-214.
6. Трубицына Д.А., Хлудов Д.С. Исследование дисперсного состава отложившейся пыли углей различной стадии метаморфизма// Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2014. № 1. с. 13-23.
7. Трубицына Д.А., Анисимов А.А., Хлудов Д.С., Оленников С.В., Трубицына Н.В. Результаты шахтных исследований интенсивности пылеотложений по сети горных выработок// Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2014. № 1. с. 68-74.
8. Трубицына Д.А., Хлудов Д.С., Трубицына Н.В. Исследование интенсивности пылеотложений в угольных шахтах// Безопасность труда в промышленности. 2014. № 9. с. 62-67.
9. 7. Трубицын А.А., Подображин С.Н., Скатов В.В., Ворошилов Я.С., Мусинов С.Н., Трубицына Д.А. Разработка системы мониторинга интенсивности пылеотложений и методики прогноза запыленности воздуха// Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 1. с. 6-13.
10. 9. Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов Я.С., Трубицына Д.А., Попов М.С., Седельников В.Е. Прибор для измерения концентрации пыли. Патент на полезную модель rus 80502 03.10.2008
11. 10. Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов Я.С., Трубицына Д.А., Попов М.С., Седельников В.Е. Датчик для измерения концентрации пыли. Патент на полезную модель rus 80503 29.09.2008
12. 11. Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П., Сидельников В.Е., Хлудов Д.С., Трубицына Д.А. Устройство для измерения скорости воздуха в горных выработках. Патент на полезную модель rus 61347 23.10.2006.
13. 12. Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов Я.С., Оленников С.В., Мусинов С.Н., Трубицына Д.А. Формирование системы автоматизированного контроля пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт// Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 4. с. 6-14.
14. Ворошилов Я. С., Трубицына Д. А. Разработка метода и системы контроля интенсивности пылеотложений для повышения уровня пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт// Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. 4. с. 28-41.
15. Соболев В.В. Установление закономерностей процессов пылеобразования при работе высокопроизводительной угледобывающей техники: дис. доктора техн. наук: 05.26.03. - НЦ ВостНИИ, Кемеровский, 2002 - 229 с.
16. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах" , Приказ Ростехнадзора от 08 декабря 2020 года №507, ФНП в области промышленной безопасности от 08 декабря 2020 года №507 // Электронный фонд «Кодекс» URL: http://docs.cntd.ru/document/573140209 (дата обращения: 20.07.2021).
17. Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 N 506 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт" (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2020 N 61918) // КонсультантПлюс URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372974/ (дата обращения: 20.07.2021).
18. Свидетельство об аттестации «Методика (метод) измерения количества отложившейся пыли с использованием измерителей запыленности стационарных ИЗСТ-01» от 12.09.2017 № 28/RA.RU..RU.10473/2017) // Росстандарт, 2017.

REFERENCES

1. Netseplyayev, M. I., Lubimova, A. I., & Petruhin, P. M. (1992). *Bor'ba so vzryvami ugol'noy pyli v shakhtakh [Fighting coal dust explosions in mines].* Moscow: Nedra. [In Russian].
2. Cybulski, W. (1954). *Badania nad granicznymi wybuchowymi stezeniami pyltu weglowego.* Prace ownego Instytutu Gornictwa. Katowice.
3. Pozdnyakov, G. A., & Zakutskiy, Y. L. (2007). *In Protsess nakopleniya pyli i kontrol' pylevzryvobezopasnosti gornykh vyrabotok [Dust accumulation process and control of dust and explosion safety of mine workings].* (Vol. 321, pp. 253–265). Moscow; NNTS GP – IGD im. A.A. Skochinskogo. [In Russian].
4. Ishchuk, I. G., Trubitsyna, D. A., & Botvenko, D. V. (2007). Zakonomernosti izmeneniya zapylennosti vozdukha pri razlichnykh nagruzkakh na ochistnyye kombaynovyye zaboi (rezul'taty novykh issledovaniy) [Regularities of changes in the dust content of the air at various loads on the longwall face (results of new research)]. *Mining Information and Analytical Bulletin, 7*, 206–211. [In Russian]
5. Botvenko, D. V., Panov, S. V., Hludov, D. S., & Trubitsyna, D. A. (2007). Issledovaniye zakonomernostey pylevydeleniya pri vedenii prokhodcheskikh rabot [Investigation of the laws governing dust emission during tunneling operations]. *Mining Information and Analytical Bulletin, 7*, 212–214. [In Russian].
6. Trubitsyna, D. A. & Hludov, D. S. (2014). Issledovaniye dispersnogo sostava otlozhivsheysya pyli ugley razlichnoy stadii metamorfizma [Study of the dispersed composition of the deposited coal dust at various stages of metamorphism]. *Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry, 1-2014*, 13-23. [In Russian]
7. Trubitsyna, D. A., Anisimov A.A., Hludov, D. S., Olennikov S.V., & Trubitsyna N. V. (2014) Rezul'taty shakhtnykh issledovaniy intensivnosti pyleotlozheniy po seti gornykh vyrabotok [Results of mine studies of the intensity of dust deposition along the network of mine workings]. *Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry, 1-2014*, 68-74. [In Russian].
8. Trubitsyna, D. A., Hludov, D. S., & Trubitsyna N.V.(2014). Issledovaniye intensivnosti pyleotlozheniy v ugol'nykh

shakhtakh [Investigation of the intensity of dust deposition in coal mines]. *Labor safety in industry, 9,* 62-67. [In Russian].
9. Trubitsyn, A. A., Podobrazhin, S. N., Skatov, V. V., Voroshilov, Ya. S., Musinov, S. N., & Trubitsyna, D. A. (2016). Razrabotka sistemy monitoringa intensivnosti pyleotlozheniy i metodiki prognoza zapylennosti vozdukha [Development of a system for monitoring the intensity of dust deposition and methods for forecasting dust content in the air].*Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry, 1-2016.* c. 6-13. [In Russian].
10. Trubitsyn, A. A., Trubitsyna, N. V., Voroshilov, Y. S., Popov, M. S., & Sedelnikov, V. Y. (2008, October 3). *Utility model patent RUS 80502. Dust concentration meter.* [In Russian].
11. Trubitsyn, A. A., Trubitsyna, N. V., Voroshilov, Y. S. Trubitsyna, D. A., Popov, M. S.,& Sedel'nikov, V. Ye. (2008, September 29). *Utility model patent RUS 80503. Sensor for measuring the concentration of dust.* [In Russian].
12. Trubitsyn, A. A., Trubitsyna, N. V., Voroshilov, Y. S., Voroshilov, S. P., Sedel'nikov, V. Ye., Hludov, D.S., & Trubitsyna, D. A. (2006, October 23). *Utility model patent RUS 61347. A device for measuring air speed in mine workings.* [In Russian].
13. Trubitsyn, A. A., Trubitsyna, N. V., Voroshilov, Y. S., Olennikov, S. V., Musinov, S. N.,& Trubitsyna, D. A. (2016). Formirovaniye sistemy avtomatizirovannogo kontrolya pylevzryvobezopasnosti gornykh vyrabotok ugol'nykh shakht [Formation of an automated control system for dust and explosion safety in coal mines].*Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry, 4-2016*, 6-14. [In Russian].
14. Voroshilov, Y. S., & Trubitsyna, D. A. (2017). Razrabotka metoda i sistemy kontrolya intensivnosti pyleotlozheniy dlya povysheniya urovnya pylevzryvobezopasnosti gornykh vyrabotok ugol'nykh shakht [Development of a method and system for monitoring the intensity of dust deposition to increase the level of dust explosion safety in coal mines]. *Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry, 4-2017*, 28-41. [In Russian].
15. Sobolev, V. V. (2002). *Ustanovleniye zakonomernostey protsessov pyleobrazovaniya pri rabote vysokoproizvoditel'noy ugledobyvayushchey tekhniki [Establishing regularities of dust formation processes during the operation of high-performance coal mining equipment]* (dissertation). NC VostNII, Kemerovo. [In Russian].
16. *Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti "Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shakhtakh" , Prikaz Rostekhnadzora ot 08 dekabrya 2020 goda №507, FNP v oblasti promyshlennoy bezopasnosti ot 08 dekabrya 2020 goda №507 [On approval of the Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules in coal mines", Order of Rostekhnadzor dated December 08, 2020 No. 507, FNP in the field of industrial safety dated December 08, 2020 No. 507].* Electronic fund "Codex". (2021). Retrieved July 20, 2021, from http://docs.cntd.ru/document/573140209. [In Russian].
17. *Prikaz Rostekhnadzora ot 08.12.2020 N 506 "Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti "Instruktsiya po aerologicheskoy bezopasnosti ugol'nykh shakht" (Zaregistrirovano v Minyuste Rossii 29.12.2020 N 61918) [Rostekhnadzor Order of 08.12.2020 N 506 "On Approval of Federal Norms and Regulations in the Field of Industrial Safety" Instruction on Aerological Safety of Coal Mines "(Registered in the Ministry of Justice of Russia on 29.12.2020 N 61918)].* ConsultantPlus. (2021). Retrieved July 20, 2021, from http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372974/. [In Russian].
18. Rosstandart, Svidetel'stvo ob attestatsii «Metodika (metod) izmereniya kolichestva otlozhivsheysya pyli s ispol'zovaniyem izmeriteley zapylennosti statsionarnykh IZST-01» ot 12.09.2017 № 28/RA.RU..RU.10473/2017 [Certificate of attestation "Method (method) for measuring the amount of deposited dust using stationary dust meters IZST-01" dated 12.09.2017 No. 28 / RA.RU..RU.10473 / 2017] (2017). Moscow.

