

УДК 622.81

doi: 10.37657/vniipo.avpb.2023.84.16.002

СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Сергей Борисович Романченко, Елена Алексеевна Губина, Елена Геннадьевна Воронцова, Виктория Вячеславовна Вдовина, Наталья Анатольевна Киселева

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Аннотация. В статье проанализированы методы контроля качества нейтрализации взрывчатых свойств пыли (качества осланцевания), основанные на трех физических принципах измерений: оптическом, радиоизотопном и химическом. Рассмотрены преимущества и недостатки используемых методов контроля и промышленных приборов, реализованных на соответствующих физических принципах. Обоснован принципиально новый термогравиметрический способ оценки качества осланцевания горных выработок, описаны его основные параметры.

Ключевые слова: аэрозоль, взрывоопасность, угольная пыль, осланцевание, термогравиметрия, термогравиметрическая кривая

Для цитирования: Романченко С.Б., Губина Е.А., Воронцова Е.Г., Вдовина В.В., Киселева Н.А. Способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2023. № 3 (17). С. 14–23. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2023.84.16.002>.

METHODS FOR CONTROLLING DUST AND EXPLOSION SAFETY OF MINE WORKINGS

Sergey B. Romanchenko, Elena A. Gubina, Elena G. Vorontsova, Victoria V. Vdovina, Natalia A. Kiseleva

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

Abstract. There were analyzed the methods of quality control of neutralization of explosive properties of dust (quality of rock dusting) based on 3 physical principles of measurement: optical, radioisotope and chemical ones. There are considered advantages and disadvantages of both control methods and industrial devices implemented on the corresponding physical principles. There is proposed fundamentally new thermogravimetric method for assessing the quality of rock dusting of mine workings, as well as the main parameters are described.

Keywords: aerosol, explosion hazard, coal dust, rock dusting, thermogravimetry, thermogravimetric curve

For citation: Romanchenko S.B., Gubina E.A., Vorontsova E.G., Vdovina V.V., Kiseleva N.A. Methods for controlling dust and explosion safety of mine workings. Aktual'nye Voprosy Pozharnoi Bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2023, no. 3, pp. 14-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2023.84.16.002>.

Введение

подавляющее большинство добываемого угля и его разведанных запасов (более 97 %) составляют угли, опасные по взрывам пыли, при этом взрыв угольной пыли в шахте является единственным видом (родом) аварии, носящей характер общешахтной катастрофы.

В обеспечении взрывобезопасности угледобывающих шахт важнейшую роль играет применение технологий механического осланцевания (сланцевая пылевзрывозащита). При выполнении требуемых работ угольную пыль в выработке по всему периметру смешивают с негорючей пылью на основе известняка (доломита) с гидрофобными добавками по ГОСТ Р 51569-2000 (пыль инертная). Пыль инертная имеет дополнительное название в нормативах – сланцевая пыль, а процесс ее смешивания с угольной пылью для нейтрализации взрывчатых свойств называется осланцеванием или инертризацией. В настоящее время сланцевая пылевзрывозащита применяется практически на всех шахтах Российской Федерации.

Одним из основных факторов, характеризующих склонность угольной пыли к взрыву, является выход летучих веществ, главные компоненты которых – смолистые вещества, водород, этан и непредельные углеводороды. К опасным по пыли относятся угли с выходом летучих 15 % и более.

По действующим в Российской Федерации Правилам безопасности (ПБ) [1–3] показателями взрывчатых свойств отложившейся угольной пыли являются нижний предел взрываемости σ_{10} (г/м³) и норма осланцевания N (%). Под нижним пределом взрываемости отложившейся пыли подразумевается максимально допустимое количество отложившейся угольной пыли, отнесенное к единице объема выработки, при котором невозможно распространение фронта пламени взрыва по сети горных выработок. Норма осланцевания горных выработок – наименьшее содержание негорючих веществ (в %), при котором смесь угольной и инертной пыли становится невзрывчатой, определяется как

$$N = \frac{A^{daf} (100 - D)}{100} + D, \quad (1)$$

где D – добавка инертной пыли, устанавливаемая периодическими лабораторными испытаниями или по номограмме [2].

Норма осланцевания – международный признанный показатель. Так, в правилах безопасности США [4] содержание негорючих веществ в отбираемых пробах пыли должно быть не менее 65 % на свежей струе и не менее 80 % на исходящей вентиляционной струе (включая влагу и золу). Каждые 0,1 % содержания метана в рудничной атмосфере увеличивает норму осланцевания на 1 % на свежей струе и на 0,4 % на исходящей струе воздуха. Диапазон значений норм осланцевания в США:

$N = 65 \div 70$ % – на свежей струе в шахтах;

$N = 80$ % – на исходящей струе негазовых шахт; (2)

$N = 80 \div 84$ % – на исходящей струе газовых шахт.

В математической форме требования ПБ США [4] возможно записать:

$$D = N - A^{daf} - W, \quad (3)$$

где D – добавка инертной пыли, обеспечивающая взрывобезопасное состояние выработки, %; W – влажность угля.

Действующими ПБ Российской Федерации [1] предусматривается комплекс работ по приведению горных выработок во взрывобезопасное состояние. Контроль пылевзрывобезопасности осуществляется инженерно-техническими

работниками, работниками служб вентиляции и подразделениями аварийно-спасательных формирований с помощью переносных приборов или методом лабораторного анализа. Такая организация работ требует соответственного количества приборов контроля. В настоящее время в лабораториях аварийно-спасательных формирований МЧС России определение содержания твердых негорючих частиц осуществляется методом сжигания. Необходимо отметить, что работы ФГБУ ВНИИПО МЧС России в период 2013–2020 гг. позволили научно обосновать и провести первоначальное патентование принципиально нового способа – термогравиметрического [18].

1. Реализованные способы контроля пылевзрывобезопасности

До 2022 года в мировом горном деле были рассмотрены и/или запатентованы способы контроля качества нейтрализации взрывчатых свойств пыли (или качества осланцевания), основанные на трех физических принципах измерений: радиоизотопном, оптическом и химическом. Практически все указанные способы были реализованы в виде стационарных измерительных комплексов или переносных измерительных приборов, однако вследствие трудностей эксплуатации, погрешности и трудоемкости измерений они имеют различную степень внедрения.

К одному из наиболее проблемных способов возможно отнести радиоизотопный, несмотря на его кажущиеся преимущества, склонность к инновациям и научную перспективность. Независимо от мощности применяемых источников излучения, приборы, имеющие радиоизотопные компоненты, имеют сложную процедуру допуска. Также крайне сложны таможенные процедуры, как при перемещении (ввозе) таких приборов, так и при их утилизации. Сущность радиоизотопного способа определения содержания негорючих веществ в смеси угольной и инертной пыли заключается в том, что β -частицы, отраженные от породы, покрытой угольной пылью, или смеси угольной и инертной пыли, создают в ионизационной камере ток, пропорциональный толщине слоя пыли и соотношению между негорючими и горючими веществами в смеси. В описании патентов [5, 6] отмечено, что данный способ относится к области ядерно-физических методов исследования вещества и определения содержания негорючих веществ в смеси угольной и инертной пыли, предусматривает облучение исследуемого и двух калибровочных образцов β -излучением, регистрацию обратно-рассеянного β -излучения и расчет содержания негорючих веществ по полученным данным. Различие в запатентованных способах состоит в том, что в методе, предложенном в США [6], градуировочный график строится на основе двух проб пыли, содержащих известное количество негорючих веществ. По патенту СССР [5] в качестве одного из калибровочных образцов используют эквивалентную меру массовой доли негорючих веществ, изготовленную из однородного твердого материала, эффективный атомный номер которого равен эффективному атомному номеру смеси угольной и инертной пыли с содержанием негорючих веществ, соответствующим начальной части диапазона определения содержаний, а в качестве второго калибровочного образца используют пробу инертной пыли, применяемую для осланцевания данной горной выработки.

По патенту SU1711049A1 [5] при регистрации обратно-рассеянного бета-излучения зависимость числа регистрируемых импульсов ($n_{см}$) аппроксимируется линейным уравнением

$$n_{см} = n_{ип} + \Psi(C_{ип} - C_{нв}), \quad (4)$$

где $n_{см}$, $n_{ип}$ – соответственно число импульсов, зарегистрированных от исследуе-

мой пробы и от импульсов чистой инертной пыли; $C_{ип}$, $C_{нв}$ – соответственно процентное содержание негорючих веществ в чистой инертной пыли ($C_{ип} = 100 \%$) и исследуемой смеси ($C_{нв}$ – определяемый параметр, %); Ψ – чувствительность устройства к изменению содержания негорючих веществ.

Уравнение (4) преобразовано к виду, где от максимально возможного содержания негорючих частиц (100 %) вычитается разница в зарегистрированных импульсах между калибровочной и исследуемой пробами с учетом коэффициента Ψ

$$C_{нв} = \frac{100\% - (n_{ип} - n_{см})}{\Psi} \quad (5)$$

Для реализации способа необходим калибровочный (эквивалентный) образец с известным содержанием негорючих веществ C_3 .

В настоящее время переносные приборы контроля пылевзрывобезопасности на радиоизотопном принципе действия промышленно не выпускаются из-за указанных выше сложных процедур оборота и утилизации радиоактивных материалов.

Оптический принцип определения содержания инертных добавок в шахтной пыли основан на разнице цвета пылевой смеси и росте отражающей световой способности у различных образцов пыли [7, 8].

Промышленно выпускаемые приборы на оптическом принципе действия: CDEM-1000 (США), FotoPylox (Польша). Общий вид наиболее распространенного оптического прибора приведен на рис. 1.

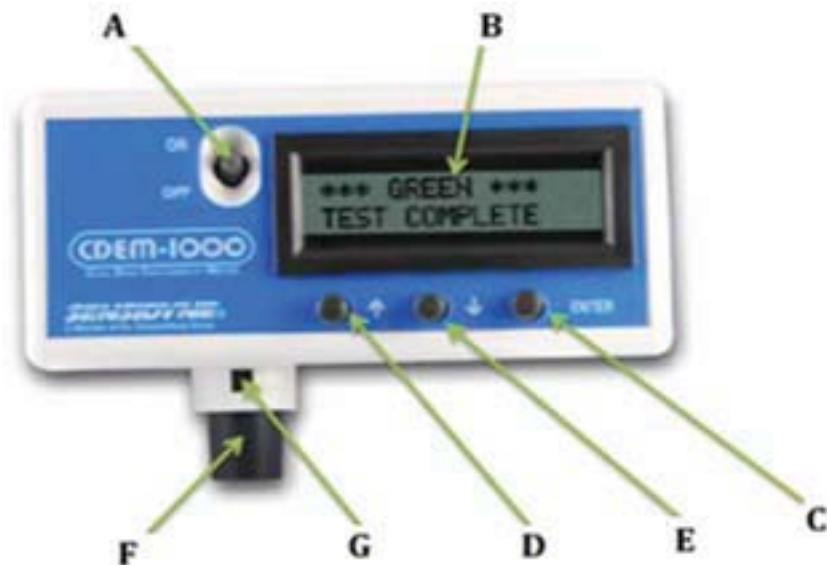


Рис. 1. Оптический анализатор качества осланцевания выработок CDEM-1000, Sensidyne, LP, США (фото производителя приборов)

Анализатор взрывчатости проб шахтной пыли CDEM-1000 (рис. 1) – это массово производимый и применяемый на шахтах США и других странах прибор в искробезопасном исполнении. Интерфейс прибора максимально упрощен для удобства персонала шахт. Прибор компактен (13,7 × 62 × 32 мм), вес прибора 230 г.

Управление прибором осуществляется при помощи жидкокристаллического дисплея (B) и четырех кнопок: A – включение/выключение; C – курсор вверх ↑; D – курсор вниз ↓; E – вход.

В нижней части прибора находится оптический датчик (G) и съемный колпачок для испытуемой пробы пыли (F) [9].

Вместе с прибором поставляется необходимый для работы набор аксессуаров и специальных порошков (тестовая пыль «Питсбург» 100 % уголь; граничная смесь (80 % инертной и 20 % угольной пыли); чистая инертная пыль 100 %, удалитель влаги – «активированные молекулярные сита», специальные воронки с металлическим ситом и т. д.

Результатом работы прибора является интегральное заключение «Смесь взрывоопасна» (на экран дисплея выводится слово «red» – красный или «Смесь невзрывоопасна» – «green» – зеленый).

По инструкции CDEM-1000 смесь для анализа должна содержать не менее 70 % инертной пыли и интегральный показатель должен быть однозначно привязан к требованиям национальных ПБ США [4, 11], которые устанавливают минимальный безопасный уровень каменной пыли на выемочном участке не менее чем 80 % при полном отсутствии метана. Диапазон содержания инертной пыли для выемочных участков при наличии метана в атмосфере составляет 80–84 %. Непосредственно содержание метана в рудничной атмосфере прибором не определяется, предполагается его предварительное измерение переносным газоанализатором и ручной ввод в CDEM-1000 (ввод упрощен и осуществляется методом стрелок вверх ↑ или вниз ↓ на дисплее – (рис. 1). Учет концентрации метана проводится программным обеспечением CDEM-1000 по зависимостям (2) и (3).

Недостатком данного способа является сложность конструкции, необходимость настройки прибора на каждый угольный пласт или его участок при изменении показателей качества угля, отсутствие возможности определения влажности шахтной пыли (как одной из негорючих составляющих), влияния изменения дисперсного и вещественного состава шахтной пыли на погрешность показаний. Оптические блоки чувствительны к загрязнению, перед каждым измерением требуется осуществить специальную процедуру по их чистке.

Оптические приборы ориентированы на отличные от Российской Федерации нормы и правила, что сделало невозможным их сертификацию и определение метрологических характеристик. На шахтах Российской Федерации приборы не применяются, несмотря на длительный период поставки на шахты рабочих версий приборов.

Третьим из запатентованных ранее способов, получивших максимальное внедрение на шахтах Российской Федерации в виде переносного прибора ПКП (ООО «Горный ЦОТ», Кемерово), является химический способ. Его суть состоит в измерении объема углекислого газа (CO_2) или скорости выделения CO_2 в ходе химической реакции разложения известняка (CaCO_3) при его взаимодействии с жидким химическим реагентом – кислотой (лимонной кислотой $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ или соляной кислотой HCl). При таком способе проба шахтной пыли помещается в реакционную колбу или съемную пробирку. Измерительный блок прибора в этом случае по интенсивности выделения CO_2 формирует выходной электрический сигнал, далее обрабатываемый в электронном вычислительном блоке. На основании этого определяется процентное содержание негорючей составляющей в смеси угольной и инертной пыли.

В Российской Федерации нашли практическое применение только приборы на химическом принципе действия типа ПКП (рис. 2).



Рис. 2. Прибор контроля пылевзрывобезопасности ПКП (ООО «Горный ЦОТ», Кемерово)

Основные элементы прибора ПКП: 1 – вычислительный блок; 2 – аккумулятор; 3 – датчик расхода газа; 4 – уплотнитель; 5 – съемная колба с химическим реагентом; 6 – цилиндрическая емкость с анализируемой пробой шахтной пыли; 7 – панель управления.

К достоинствам прибора относится компактность (170 × 120 × 50 мм), небольшой вес – 0,6 кг, приемлемая относительная погрешность измерений ($\pm 10\%$). Полученный результат – содержание инертной пыли в процентах (%) – выводится на табло.

Несмотря на наличие приборов пылевого контроля типа ПКП и их широкое внедрение в Российской Федерации данный способ и практика применения приборов позволила выделить ряд недостатков:

- время получения достоверного измерения составляет 20–30 мин с учетом «холостого измерения» и дублирования замеров;
- использование в процессе измерений обновляемых для каждого измерения хрупких емкостей (стеклянных колб) и химических реагентов (лимонная кислота, этиловый спирт), необходимость проведения утилизации отработанной кислоты;
- отсутствие возможности определения влаги исследуемой пробы пыли как одного из негорючих составляющих;
- в аварийных условиях работы ПАСС(Ф) измерения с применением стеклянных колб и кислот проводятся при полном отключении электроэнергии и шахтного освещения. Риск ошибочных действий в этом случае существенно возрастает.

Кроме того, все известные типы приборов на трех различных физических принципах измерений ориентированы на исследования отложившейся пыли в нормальных (до аварии) условиях и не предназначены для исследования пыли, подвергшейся высокотемпературному воздействию взрыва или пожара, что делает их неприемлемыми для подразделений профессиональных спасательных формирований в ходе ликвидации указанных аварий (особенно при угрозе повторных взрывов метана и угольной пыли).

2. Инновационный термогравиметрический способ контроля качества инертнизации выработок

С учетом рассмотренных выше способов для повышения оперативности и точности контроля был предложен термогравиметрический способ контроля взрывоопасности пыли. Данный способ обоснован работами ФГБУ ВНИИПО МЧС России в период 2013–2020 гг. и отражен в ряде публикаций [10–17]. Необходимо отметить, что термогравиметрические способы могут существенно различаться по режимам нагревания (изотермический, динамический с линейным ростом температуры, программно-задаваемый с отбором проб газов и т. д.). В рамках настоящей статьи рассмотрен частный случай изотермического нагрева образцов [16].

Сущность данного способа заключается в помещении пробы шахтной пыли в термовесы, поддерживающие температуру равную или несколько выше критической температуры разложения как угля, так и известняка. Сигнал от термовесов позволяет получать две характерные функции: функцию потери массы во времени (ТГ-кривая) и функцию скорости потери массы (ДТГ-кривая), используемые для определения времени окончания термического разложения смеси, то есть момента, когда ТГ-кривая принимает практически горизонтальное положение и далее не изменяется, а значение ДТГ-функции равно нулю.

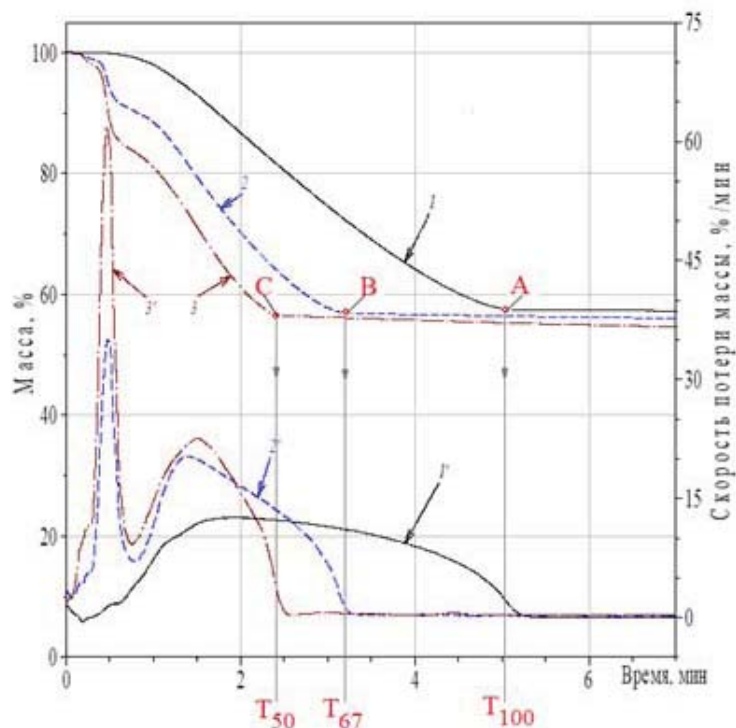


Рис. 3. Термогравиметрические кривые – ТГ(1, 2, 3) и ДТГ (1', 2', 3')

На рис. 3 представлены две группы кривых для трех последовательно испытанных образцов*:

- образец № 1 – 100 % известняк (кривые ТГ и ДТГ соответственно 1 и 1');
- образец № 2 – 67 % известняка и 33 % угля (кривые 2 и 2');
- образец № 3 – 50 % известняка и 50 % угля (кривые 3 и 3').

* Примечание: диапазон содержания негорючих веществ в отложившейся шахтной пыли после осланцевания по нормативам рассчитывается и должен находиться в пределах от 60 до 90 %. Смеси, иллюстрирующие сущность метода, содержат расширенный диапазон с содержанием CaCO_3 более 50 %.

В верхней части рис. 3 ТГ-кривые с номерами 1, 2, 3 имеют характерные точки А, В, С. При переходе по стрелкам на ось абсцисс (времени процесса) получают значения времени T_x , где нижний индекс соответствует содержанию сланцевой пыли в пробе (для рассматриваемого примера на рис. 3: T_{100} , T_{67} , T_{50}). Данные точки определяют время полного термического разложения образца, сопровождавшееся выходом газообразных веществ (по ГОСТ Р 55660-2013 – «выход летучих веществ») или величину T_{100} , T_{67} , T_{50} . Расположенные в нижней части рис. 3 ДТГ-кривые позволяют уточнить окончание процесса термического разложения, их значение в указанных точках равно нулю.

Как видно из рис. 3, чем выше содержание CaCO_3 , тем дольше идет процесс термического разложения смеси «известняк – уголь», поэтому $T_{100} > T_{67} > T_{50}$, что позволяет на предварительном этапе применения метода экспериментально получить функциональную зависимость величины фактического содержания сланцевой пыли X в виде функции от времени T :

$$X = f(T). \quad (6)$$

Функция (6) экспериментально получается с шагом 10 % по содержанию известняка и заносится в память прибора в форме таблицы или виде аппроксимированной функциональной зависимости (рис. 4).

Для образца шахтной пыли с неизвестным содержанием угольной и сланцевой пыли проводится измерение времени его термодеструкции $T_{\text{изм}}$ на термовесах. Далее по определенному времени термодеструкции $T_{\text{изм}}$ (для приведенного примера на рисунке $3T_{\text{изм}} = 160$ с) по зависимости (6) рассчитывается X -концентрация сланцевой пыли. В примере на рис. 4 $X = 61,5$ %; процесс продемонстрирован в виде переходов по стрелкам.

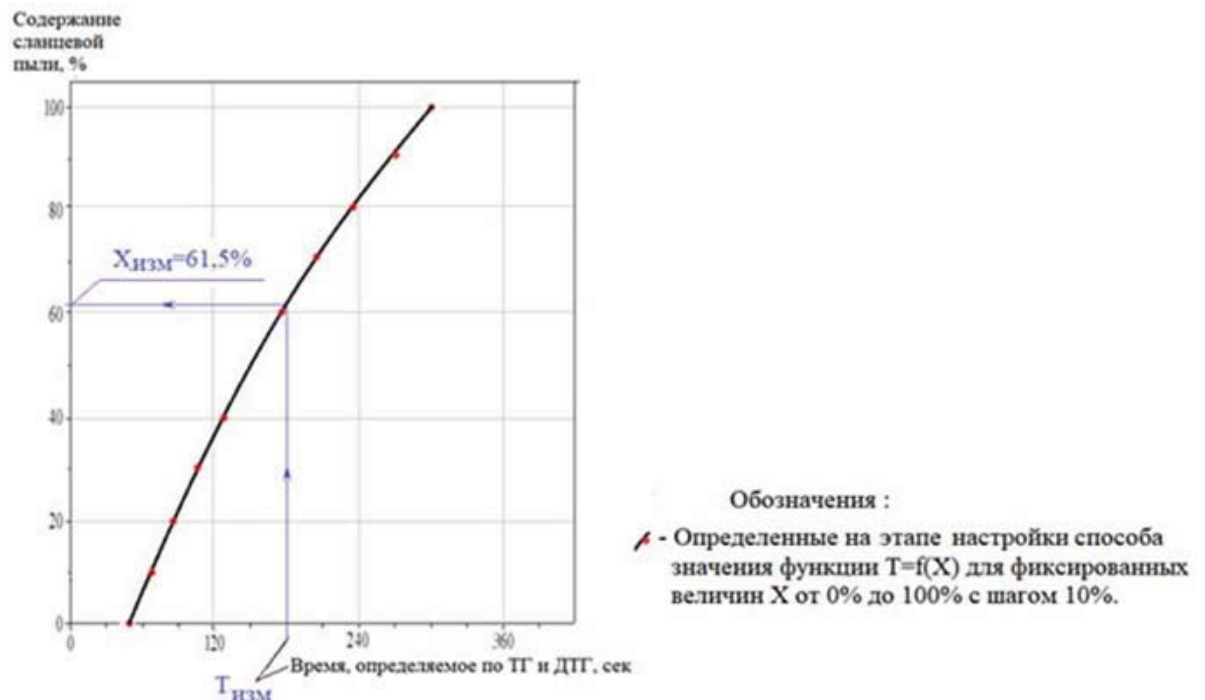


Рис. 4. Определение процентного содержания сланцевой пыли X (или качества осланцевания) на основе времени T , определенного по ТГ и ДТГ кривым в ходе термодеструкции образца

Осуществимость предложенного способа продемонстрирована непосредственными результатами, представленными на рис. 3 и 4, выполненными для смесей сланцевой пыли (промышленно выпускается по ГОСТ Р 51569-2000) и

угольной пыли энергетического угля марки «Д» шахт Кузбасса. Реализация способа будет востребована для всех угольных шахт, опасных по газу и взрывам угольной пыли.

Выводы

Предлагаемый термогравиметрический способ отработан экспериментально. Основным преимуществом предлагаемого способа является высокая точность оценки содержания инертной пыли в смеси с угольной пылью после осланцевания, возможность проведения ее в сжатые сроки (до 5–9 мин) и безопасность для обслуживающего персонала за счет отсутствия опасных радиоизотопных либо химических материалов. Точность измерений не зависит от степени метаморфизма углей, влажности и зольности пробы. Термоаналитические зависимости, используемые в методе, позволяют проводить определения ряда дополнительных параметров (например, численное определение влажности образца), что существенно уточняет процесс отнесения образца пыли к неопасным по взрывам.

Термогравиметрический способ отличается от известных ранее способов:

- отсутствием оптических датчиков с системой распознавания оттенков серого цвета (или с системой генерации различных выходных сигналов при разных отражающих свойствах смесей угольной и сланцевой пыли);

- отсутствием взрывных камер с системами подачи аэрозоля, системой воспламенения аэрозоля с заменяемыми одноразовыми химическими воспламенителями или с системой электрического воспламенения аэрозолей (способ непосредственного взрывного испытания [17]);

- отсутствием химических реагентов и емкостей (съемных пробирок) для проведения химических реакций, отсутствием датчика расхода газа, каналов для его прохождения системы выброса газа в атмосферу, а также отсутствием системы обеспечения герметичности для сменяемых пробирок;

- отсутствием расходных либо сменяемых материалов (съемные фильтры, химические реагенты и т. д.).

Способ реализован в виде патента РФ № 2747022 [16].

Список литературы

1. Правила безопасности в угольных шахтах: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности, утв. Приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 г. № 507.

2. Правила безопасности в угольных шахтах. Кн. 3. Инструкция по борьбе с пылью и пылевзрывозащите / Госгортехнадзор России. Липецк: Липецкое издательство, 1999. 109 с.

3. Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах. Введена в действие приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.10.2014 г. № 462. 38 с.

4. Title 30 – Mineral Resources. Vol. 1, parts 1–199. Washington: U.S. Government Printing Office (Правила безопасности в угольных шахтах США), 2009. 767 p.

5. Авторское свидетельство СССР № 1711049 (патент SU1711049A1), кл. G 01 N 23/22, опубликовано 07.02.1992 г., БИ № 5.

6. Патент США № 4590373, кл. G 01 N 23/00, 1986.

7. EMAG. Automation and Safety Systems. URL: <https://www.mining-technology.com/contractors/controls/emag/> (дата обращения: 05.06.2021 г.).

8. Авторское свидетельство СССР № 420790, кл. E 21 F 5/00, опубликовано 25.03.1974 г., БИ № 11.

9. *Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М.* Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. М.: Недра, 1992. 298 с.
10. *Уэндландт У.* Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 526 с.
11. ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ.
12. *C.G.D. Silva Filho and F.E. Milioli* (2008) A Thermogravimetric Analysis of the Combustion of a Brazilian Mineral coal. *Quimica Nova*, 31, 98-100.
13. *Романченко С.Б., Губина Е.А., Ушаков Д.В., Нагановский Ю.К.* Термогравиметрический анализ угольной пыли и инертных добавок в системах пылевзрывозащиты // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2020. № 2. С. 6–13.
14. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа.
15. ASTM E 1131-2014. Стандартный метод композиционного анализа с применением термического анализа. Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.
16. Патент РФ № 2747022, заявка № 2020118687/03(031733), МПК E21F 5/12(2006.01) G01N 31/00 (2006.01). Термогравиметрический способ оценки качества осланцевания горных выработок.
17. *Романченко С.Б., Девликанов М.О.* Влияние дисперсного состава угольной пыли на показатели взрывоопасности // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 2. С. 16–23.

**Статья поступила в редакцию 05.06.2023;
одобрена после рецензирования 26.06.2023;
принята к публикации 17.07.2023.**

Романченко Сергей Борисович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: romanchenkosb@mail.ru; **Губина Елена Алексеевна** – начальник сектора. E-mail: spectehsyst@gmail.com; **Воронцова Елена Геннадьевна** – начальник сектора. E-mail: onp2003@mail.ru; **Вдовина Виктория Вячеславовна** – старший научный сотрудник. E-mail: k703a@yandex.ru; **Киселева Наталья Анатольевна** – старший научный сотрудник. E-mail: onp2003@mail.ru.

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Sergey B. Romanchenko – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher. E-mail: romanchenkosb@mail.ru; **Elena A. Gubina** – Chief of Sector. E-mail: spectehsyst@gmail.com; **Elena G. Vorontsova** – Chief of Sector. E-mail: onp2003@mail.ru; **Victoria V. Vdovina** – Senior Researcher. E-mail: k703a@yandex.ru; **Natalia A. Kiseleva** – Senior Researcher. E-mail: onp2003@mail.ru.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.