

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОПЛИВА
И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
CHEMICAL TECHNOLOGY OF FUEL AND HIGH-ENERGY SUBSTANCES**

Научная статья

УДК 662.741

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-64-70

**ИНИЦИИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ВЗРЫВА НА ПОВЕРХНОСТИ
УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ**

Заостровский Анатолий Николаевич,
Петрушина Анна Владимировна,
Нурмухаметов Денис Рамильевич

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

* для корреспонденции: catalys01@rambler.ru

**Информация о статье**

Поступила:

18 апреля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 июня 2025 г.

Принята к публикации:

30 июня 2025 г.

Опубликована:

28 августа 2025 г.

Ключевые слова:

угольная пыль, метан,
сорбция, фюзинит, удельная
поверхность, шахта, взрыв.

Аннотация.

Рассмотрены физико-химические особенности компонентов взрыва. Установлено, что метан, водород, кислород и пары воды, сорбируясь на поверхности угольной пыли, образуют ионно-радикальные формы, способствующие возникновению ряда быстродействующих реакций типа цепных; минеральные компоненты углей и петрографические ингредиенты группы фюзинита, обладающие высокой удельной поверхностью, выполняют роль катализаторов.

Взрыву и самовозгоранию предшествует скрытая активация газообразных компонентов, приводящая их в возбужденное состояние благодаря сорбции на поверхности углей и минеральных компонентов. Последнее обстоятельство является основой реакций при гетерогенном катализе и в определенной мере относится к взрывам метана и угольной пыли.

Каталитическое действие многих соединений переходных металлов в окислительно-восстановительных реакциях зависит от активации кислорода в его комплексах. Комплексообразование изменяет природу молекулы кислорода, приближая ее к возбужденному состоянию, в связи с чем реакционная способность кислорода значительно повышается. Взаимодействие водорода с кислородом протекает по типу разветвленной цепной реакции и сильно экзотермично. Активная роль влаги в процессах окисления и самовозгорания углей предшествует взрыву метана и угольной пыли. Взрыв метанугольной пыли является конечным результатом предварительной активации ее компонентов, для чего требуется время и определенные горно-технические условия, в том числе связанные с нарушением безопасных условий работы.

Для цитирования: Заостровский А.Н., Петрушина А.В., Нурмухаметов Д.Р. Инициирование компонентов взрыва на поверхности угольной пыли // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4 (170). С. 64-70. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-64-70, EDN: VBDTVN

В шахтной атмосфере время от времени появляется горючий газ – метан, представляющий собой источник метановой опасности: взрывы метана были причиной многих жертв в горной промышленности. Метан

в концентрациях меньше нижней границы взрываемости может увеличить опасность взрывов пыли, образуя с пылью так называемую гибридную смесь. При расследовании причин взрывов в угольных шахтах и их оценке, как

правило, имеется в виду взрыв только метана или метана с участием угольной пыли. Так как в шахтном воздухе могут быть водород и пары воды, то они также участвуют во взрывах. Но отрицать наличие в шахтном воздухе водорода и паров воды невозможно, а значит, невозможно отрицать и их участие во взрыве.

Взрывы только угольной пыли в основном характерны для углеподготовительных отделений электростанций, коксохимических производств, а также для сушильных отделений углеобогатительных фабрик. В угольных шахтах, как правило, имеет место совмещенный взрыв угольной пыли и метана. В газообильных шахтах главной причиной взрыва считается метан, угольная пыль является причиной дистанционного распространения его [1]. Не опровергая данных положений, следует считать, что в любом случае угольная пыль провоцирует взрыв метана.

Взрыву и самовозгоранию предшествует скрытая активация газообразных компонентов, приводящая их в возбужденное состояние благодаря сорбции на поверхности углей и минеральных компонентов. Последнее обстоятельство является основой реакций при гетерогенном катализе и в определенной мере относится к взрывам метана и угольной пыли [2].

Угольная пыль. Элементарный углерод в виде кокса, графита и активного угля широко используется в промышленной химии как восстановитель и катализатор. Роль катализатора выполняет поверхность, достигающая у активных углей до 700-800 м²/г, что способствует физической и химической сорбции многих газов и жидкостей.

Внутренняя поверхность природных углей не превышает 100-150 м²/г. При образовании тонкодисперсной угольной пыли ее удельная поверхность может приближаться к удельной поверхности активных углей, особенно к фюзену – мягкому, рыхлому петрографическому ингредиенту, сохранившему клеточную структуру исходного растения-углеобразователя [3]. Высокая удельная поверхность угольной пыли подтверждается результатами работы [4]: при лабораторных взрывах давление повышалось с увеличением дисперсности пыли. Приближенный расчет удельной поверхности пыли показывает, что в диапазоне средних диаметров ее частиц от 1 до 100 мкм удельная поверхность изменяется в пределах 0,6 – 600 м²/г.

Известно, что минеральная часть угольной пыли в большей степени является фактором, тормозящим взрыв [5]. Однако в химической промышленности в качестве катализаторов, как правило, применяются неорганические вещества, в том числе оксиды алюминия, кремния, железа, а также различные глины [6]. В углях возможно

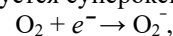
содержание железа, активного по отношению к кислороду [7].

Таким образом, угольная пыль, имея развитую удельную поверхность, является сорбентом для молекул воды и газов, что приводит их в активное состояние.

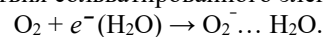
Кислород. В обычном представлении имеются в виду молекулярные формы кислорода O₂ и O₃, а также атомный радикал O[•] и ион O₂⁻. Адсорбированные формы данных молекул, атомов и ионов отличаются значительной активностью по сравнению с газообразными. В результате сорбции молекул кислорода возникают ионные формы: O₂⁺, O₂⁻, O₂²⁻, O⁻. Отмечается особая реакционная способность иона O⁻ в процессах окисления CO и углеводородов. Для металлов известны пероксидные формы типа Me – O – O [8].

Каталитическое действие многих соединений переходных металлов в окислительно-восстановительных реакциях зависит от активации кислорода в его комплексах. Комплексообразование изменяет природу молекулы кислорода, приближая ее к возбужденному состоянию, в связи с чем реакционная способность кислорода значительно повышается.

От взаимодействия молекулы O₂ с электроном при сорбции на поверхности твердых тел образуется супероксид O₂⁻:

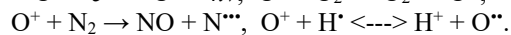
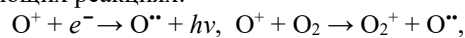


который имеет место и в растворах за счет взаимодействия сольватированного электрона:

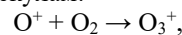


Ион O₂⁻ является распространенным лигандом в комплексных соединениях переходных элементов.

Из стабильных радикально-ионных форм кислорода необходимо отметить ионы O⁺ и O⁻ [8]. В значительных количествах O⁺ содержится в верхних слоях атмосферы, где участвует в следующих реакциях:



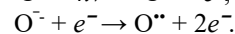
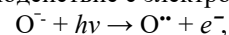
Наблюдалось присоединение O⁺ к насыщенным молекулам:



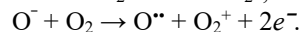
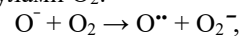
а также его перезарядка:



Для иона O⁻ отмечена фотохимическая реакция и взаимодействие с электроном:



Ион O⁻ может участвовать в перезарядке вместе с молекулами O₂:



Приведенные данные в достаточной степени характеризуют активные свойства кислорода.

Оксиды углерода CO и CO₂ образуются в процессе разложения растительного материала с ранних стадий диагенеза и на протяжении всего процесса метаморфизма, а также возникают при медленном низкотемпературном окислении углей. Из химических особенностей CO следует отметить его ненасыщенное валентное состояние, что и является причиной реакционной способности по отношению ко многим элементам и соединениям. Наличие свободной электронной пары позволяет CO входить в качестве лиганда в многочисленные комплексные соединения, в том числе образовывать карбониды со многими металлами.

Оксид CO₂, растворяясь в воде, дает слабую угольную кислоту H₂CO₃, которая при сорбции на поверхности углей диссоциирует на ионы H⁺, HCO⁻ и CO₃²⁻. Некоторое количество оксидов углерода удерживается на поверхности углей благодаря хемосорбции.

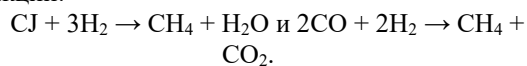
Водород. За несколько месяцев выделения из трещин угольного пласта концентрация водорода в подземных выработках может превысить предел взрываемости (4,7%). Будучи в структуре органической массы углей, водород в процессе метаморфизма отщепляется и накапливается в порах углей и трещинах пласта как окклюдированный газ, однако его образование может происходить и в результате длительного низкотемпературного окисления углей.

Радикально-атомная форма водорода генерируется при сорбции его молекул на угольной поверхности (H₂ → 2H[•]). В химических реакциях, протекающих в растворах, преобладает ионная форма H⁺, в карбидах металлов она присутствует в виде H⁻. Известны молекулярные ионы H₂⁺ и H₃⁺. В водной среде как радикал, так и ион водорода гидратированы в виде H₃O[•] и H₃O⁺, H₉O₄[•] и H₉O₄⁺.

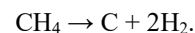
Обладая малыми размерами молекул по сравнению с другими газами, водород способен поглощаться металлическим железом, особенно когда оно находится в тонкодисперсном состоянии, например, в трущихся узлах горных машин при несколько повышенной температуре.

Взаимодействие водорода с кислородом протекает по типу разветвленной цепной реакции и сильно экзотермично.

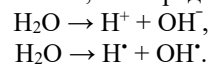
Метан как «болотный газ» образуется уже при первоначальном разложении растительного материала, а в угольных месторождениях, так же как и водород, в результате отщепления радикалов CH₃[•] и H[•]. В порах углей возможно образование метана при каталитическом воздействии железа, согласно следующих реакций:



С повышением температуры метан способен подвергаться крекингу, образуя графит:

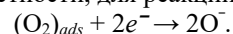


Вода. Сорбция воды на поверхности углей приводит ее молекулы в активное состояние с образованием как ионов, так и радикалов:

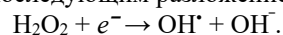


Вода – вещество весьма реакционноспособное; в природных условиях это свойство ярко проявляется в реакциях гидролиза солей. Она является растворителем для многих природных соединений, в том числе для большинства газов. С участием воды протекают окислительно-восстановительные реакции в недрах, а также современное минералообразование на поверхности углей и пород. Для минеральной части углей важно, что вода в качестве лиганда входит в состав аквагидрооксокомплексов; кристаллогидратная вода в сульфатах и вода в глинах настолько прочно связаны, что при нагревании вода удаляется лишь при 800-900°C.

При окислении углей присутствие следов воды – обязательное условие хемосорбции кислорода, в частности, для реакции (см. [9]):



С химической точки зрения воду можно рассматривать как оксид водорода. Кроме устойчивой формы H₂O известен неустойчивый пероксид H₂O₂, его ион HO₂⁻ и радикал HO₂[•], а также малоизученные сверхпероксиды H₂O₃ и H₂O₄. Образование в углях пероксидов возможно в результате первоначальных окислительных процессов с последующим разложением:

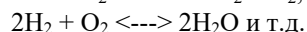
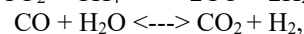
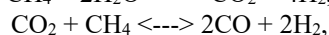
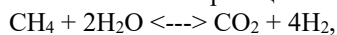


Сорбированная на углях вода оказывает заметное влияние на сорбцию метана, особенно при его повышенном давлении [9].

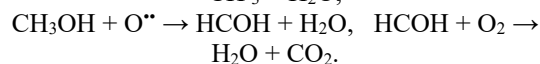
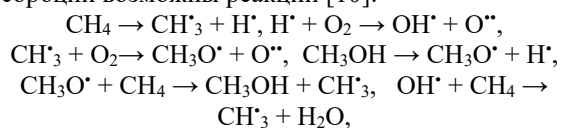
Реакции компонентов взрыва

Из рассмотрения свойств отдельных компонентов видно, что каждый из них имеет свои особенности, заключающиеся в образовании активных форм, вступающих во взаимодействие между собой и насыщенными молекулами, в результате чего возникают быстротекущие реакции типа цепных.

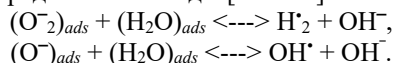
В технологии конверсии метана отмечаются следующие каталитические реакции:



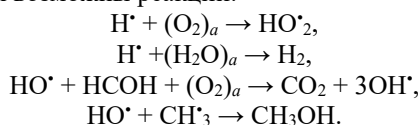
Эти реакции идут в присутствии катализаторов, на поверхности которых за счет сорбции возможны реакции [10]:



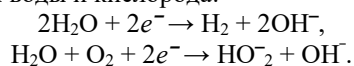
Считается [11], что молекулярный кислород пассивный, раскрытие двойной связи в его молекуле происходит при действии, оказываемом молекулой горючего вещества. Не отрицая этого влияния, полагаем, что основным возбудителем активности молекулы кислорода – сорбция, чему способствуют магнитные свойства молекулы благодаря наличию не спаренных электронов с разрыхляющей связью. В то же время активные, сорбированные формы кислорода, взаимодействуя с водой, порождают ее ионно-радикальные виды [12 – 14]:



На поверхности катализаторов в результате сорбции возможны реакции:



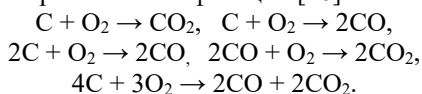
Необходимо также отметить многочисленные точечные катодные процессы на минеральных компонентах углей, в том числе породной пыли, с участием воды и кислорода:



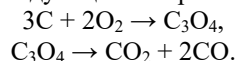
Анализируя значения электродных потенциалов указанных реакций, авторы работы [15] приходят к выводу, что нейтральная H_2O , насыщенная O_2 , является сильным окислителем.

Многообразие реакций активации молекул H_2O и O_2 позволяет утверждать, что химизм реакций при взрыве метана может быть обусловлен не только известными схемами. Характер взаимодействия ионно-радикальных форм воды и кислорода с метаном и угольной пылью, водородом и оксидами углерода может быть весьма разнообразным и требует дальнейшего изучения.

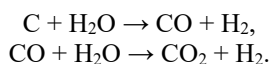
При взрыве угольной пыли, как и при горении угля, первоначально происходят реакции пиролиза и газификации [16]:



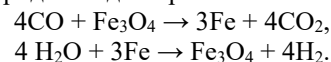
Предполагается, что при горении угля вначале происходит образование промежуточного углерод-кислородного комплекса с последующим его распадом:



Для вышеуказанной первоначальной реакции возможность ее возникновения имеет место только при сорбции кислорода на поверхности угля и появлении его активных форм. Взаимодействие углерода с сорбированной водой может происходить по схеме образования водяного газа:



Реакции углерода с кислородом и водой при наличии катализаторов вследствие явлений хемосорбции приобретают цепной характер, особенно в присутствии железа и его оксидов [2]. При этом не исключается образование промежуточных соединений. Так, реакция оксида углерода с водой протекает по стадиям:

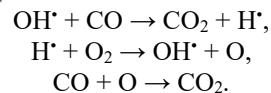


Окисление щавелевой кислоты на активных углях, содержащих железо, идет в 30 раз интенсивнее, а при сочетании железа, углерода и азота – в 800 раз.

Считается, что способность сорбированных ионов ускорять окислительно-восстановительные реакции существенно отличается от их активности в растворах [17]. При этом сорбирующими и катализирующими агентами являются как сама поверхность углей, так и минеральные компоненты [18].

В работе [19] изучено влияние хемосорбции кислорода на величину термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) графита и показано, что хемосорбция кислорода приводит к повышению ТЭДС, при этом катализатором в этом процессе выступает железо. В принципе следует ожидать, что на поверхности природных углей за счет минеральных компонентов, сорбции молекул воды и кислорода, в результате образования двойного электрического слоя, имеют место многочисленные точечные, короткозамкнутые гальванические элементы. Непродолжительное время их существование приводит к образованию активных ионно-радикальных форм, вступающих в быстросодействующие цепные реакции. В этой связи утверждения об инертности минеральных компонентов и петрографической группы фюзинита вряд ли являются необоснованными [5]. Адсорбция на многих углях осложняется наличием минеральных компонентов, которые также адсорбируют воду [20].

Сорбция воды на поверхности природных углей и образование радикалов $H^\cdot$ и $OH^\cdot$ позволили объяснить участие H_2O в процессе горения [21]. Первоначальным продуктом горения углерода является оксид CO , его окисление до CO_2 ускоряется присутствием радикалов воды:



Данные реакции удовлетворительно объясняют практику смачивания углей перед сжиганием, а также сжигание водоугольных суспензий [22].

Активная роль влаги в процессах окисления и самовозгорания углей неоднократно отмечалась специалистами [22, 23]. Отрицать эту роль в процессах, предшествующих взрыву

метана и угольной пыли, невозможно. Взрыв метаноугольной пыли является конечным результатом предварительной активации ее компонентов, для чего требуется время и определенные горно-технические условия, в том числе связанные с нарушением безопасных условий работы.

При комплексной механизированной выемке угля в очистном забое с большой нагрузкой необходим контроль содержания в шахтном воздухе не только метана, но и водорода и оксидов углерода, а также требуется соблюдать режим усиленного подавления пыли.

Выводы

1. Метан, водород, кислород и вода путем сорбции на поверхности угля и угольной пыли создают ряд активных ионно-радикальных форм, способствующих возникновению быстродействующих реакций, типа цепных.

2. Минеральные компоненты углей и петрографические ингредиенты группы фюзинита, обладающие высокой удельной поверхностью, следует рассматривать в качестве катализаторов реакций, предшествующих взрыву метана и угольной пыли.

3. Современная механизированная добыча способствует образованию высокодисперсной угольной пыли, по своим свойствам приближающейся к активным углям, что и обуславливает ее пирофорность. Снизить склонность угольной пыли к взрыву можно путем искусственного повышения ее зольности за счет внесения инертных пылевых сред, в частности инертной пыли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мясников А. А., Старков С. П., Чикунов В. И. Предупреждение взрывов газа и пыли в угольных шахтах. М. : Недра, 1985.
2. Томас Д., Томас У. Гетерогенный катализ. М. : Мир, 1969.
3. Игишев В. Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах. М. : Недра, 1987.
4. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л. : Химия, 1974.
5. Померанцев В. В. Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив. Л. : Энергия, 1978.
6. Грим Р. Минералогия и практическое

использование глин. М. : Мир, 1976.

7. Общая органическая химия / Под ред. Бартона Д., Оллиса У. Д. Т. 7. Металлорганические соединения / Под ред. Джонса Д. Н. Пер. с англ. / Под ред. Кочеткова Н. К., Стояновича Ф. М. М. : Химия, 1984.

8. Разумовский С. Д. Кислород – элементарные формы и соединения. М. : Химия, 1979.

9. Ван-Кревелен Д., Шуер Ж. Наука об угле. М. : Госгортехиздат, 1960.

10. Семенов Н. Н. Развитие цепной теории окисления углеводородов // Проблемы окисления углеводородов / Под ред. Сергиенко С. Р. М. : Изд-во АН СССР, 1954.

11. Бах Н. Н. Собрание трудов по химии и биохимии. М. : Изд-во АН СССР, 1950.

12. Карякин А. В., Кривенцова Г. А. Состояние воды в органических и неорганических соединениях. М. : Наука, 1973.

13. Крылов О. В., Киселев В. Ф. Адсорбция и катализ на переходных металлах и их оксидах. М. : Химия, 1981.

14. Марголис Л. Я. Гетерогенное каталитическое окисление углеводородов. Л. : Химия, 1981.

15. Коттон Ф., Уилкинсон Д. Основы неорганической химии. М. : Мир, 1979.

16. Лавров Н. В. Физико-химические основы горения и газификации топлив. М. : Metallurgizdat, 1957.

17. Тарковский И. А. Окисленный уголь. Киев: Наукова думка, 1981.

18. Каталитические свойства веществ. Справочник / Под ред. Ройтера В. А. Киев : Наукова думка, 1968.

19. Химические и физические свойства кислорода / Под ред. Уокера Ф. М. : Мир, 1969.

20. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М. : Мир, 1984.

21. Ахметов Н. С. Общая и неорганическая химия. М. : Высшая школа, 1988.

22. Линденау Н. И., Маевская В. И., Крылов В. Ф. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах. М. : Недра, 1977.

23. Кольцов К. С., Попов Б. Г. Самовозгорание твердых веществ и материалов и его профилактика. М. : Химия, 1978.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Заостровский Анатолий Николаевич, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, Советский пр., 18), канд. техн. наук, доцент, e-mail: catalys01@rambler.ru

Петрушина Анна Владимировна, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, Советский пр., 18), канд. пед. наук, доцент, e-mail: a-petrushina@inbox.ru
Нурмухаметов Денис Рамильевич, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, Советский пр., 18), докт. физ.-мат. наук, e-mail: nurmukhametovdr@ficuuh.ru

Заявленный вклад авторов:

Заостровский А. Н. – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; сбор и анализ данных; выводы, написание текста.

Петрушина А. В. – научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; сбор и анализ данных; выводы, написание текста.

Нурмухаметов Д. Р. – научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; анализ данных; выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

INITIATION OF EXPLOSION COMPONENTS ON THE SURFACE OF COAL DUST

Anatoly N. Zaostrovsky, Anna V. Petrushina,
Denis R. Nurmukhametov

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS

* for correspondence: catalys01@rambler.ru



Article info

Received:

18 April 2025

Accepted for publication:

22 June 2025

Accepted:

30 June 2025

Published:

28 August 2025

Keywords: coal dust, methane, sorption, fusinite, specific surface area, mine, explosion.

Abstract.

The physicochemical features of the explosion components are considered. It has been established that methane, hydrogen, oxygen and water vapor, being sorbed on the surface of coal dust, form ion-radical forms that contribute to the occurrence of a number of high-speed chain reactions; mineral components of coals and petrographic ingredients of the fusinite group, having a high specific surface area, act as catalysts.

Explosion and spontaneous combustion are preceded by latent activation of gaseous components, which leads them to an excited state due to sorption on the surface of coals and mineral components. The latter circumstance is the basis of reactions in heterogeneous catalysis and, to a certain extent, relates to explosions of methane and coal dust. The catalytic effect of many transition metal compounds in redox reactions depends on the activation of oxygen in its complexes. Complexation changes the nature of the oxygen molecule, bringing it closer to the excited state, and therefore the reactivity of oxygen increases significantly. The interaction of hydrogen with oxygen proceeds in the form of an extensive chain reaction and is highly exothermic. The active role of moisture in the processes of oxidation and spontaneous combustion of coals precedes the explosion of methane and coal dust. The explosion of methane-coal dust is the end result of the preliminary activation of its components, which requires time and certain mining and technical conditions, including those related to the violation of safe working conditions.

For citation: Zaostrovsky A.N., Petrushina A.V., Nurmukhametov D.R. Initiation of explosion components on the surface of coal dust. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 4(170):64-70. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-64-70, EDN: VBDTVN

REFERENCES

1. Myasnikov A.A., Starkov S.P., Chikunov V.I. Preduprezhdeniye vzryvov gaza i pyli v ugol'nykh shakhtakh. M.: Nedra; 1985.
2. Tomas D., Tomas U. Geterogenny kataliz. M.: Mir; 1969.
3. Igishev V.G. Bor'ba s samovozgoraniyem uglya v shakhtakh. M.: Nedra; 1987.
4. Kouzov P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chonnykh materialov. L.: Khimiya; 1974.
5. Pomerantsev V.V. Samovozgoraniye i vzryvy pyli natural'nykh topliv. L.: Energiya; 1978.
6. Grim R. Mineralogiya i prakticheskoye ispol'zovaniye glin. M.: Mir; 1976.
7. Obshchaya organicheskaya khimiya / Pod red. D. Bartona, U.D. Ollisa. T. 7. Metallorganicheskiye soyedineniya / Pod red. D.N. Dzhonsa. Per. s angl. / Pod red. N.K. Kochetkova, F.M. Stoyanovicha. M.: Khimiya; 1984.
8. Razumovskiy S.D. Kislorod – elementarnyye formy i soyedineniya. M.: Khimiya; 1979.
9. Van-Krevelen D., Shuyer Zh. Nauka ob ugle. M.: Gosgortekhzdat, 1960.
10. Semenov N.N. Razvitiye tsepnoy teorii okisleniya uglevodorodov // Problemy okisleniya uglevodorodov / Pod red. S.R. Sergiyenko. M.: Izd-vo AN SSSR; 1954.
11. Bakh N.N. Sobraniye trudov po khimii i biokhimii. M.: Izd-vo AN SSSR; 1950.
12. Karyakin A.V., Kriventsova G.A. Sostoyaniye vody v organicheskikh i neorganicheskikh soyedineniyakh. M.: Nauka, 1973.
13. Krylov O.V., Kiselev V.F. Adsorbtsiya i kataliz na perekhodnykh metallakh i ikh oksidakh. M.: Khimiya; 1981.
14. Margolis L.Ya. Geterogennoye kataliticheskoye okisleniye uglevodorodov. L.: Khimiya; 1981.
15. Kotton F., Uilkinson D. Osnovy neorganicheskoy khimii. M.: Mir; 1979.
16. Lavrov N.V. Fiziko-khimicheskiye osnovy gorennya i gazifikatsii topliv. M.: Metallurgizdat; 1957.
17. Tarkovskiy I.A. Okislenny ugol'. Kiyev: Naukova dumka; 1981.
18. Kataliticheskiye svoystva veshchestv. Spravochnik / Pod red. V.A. Roytera. Kiyev: Naukova dumka; 1968.
19. Khimicheskiye i fizicheskiye svoystva kisloroda / Pod red. F. Uokera. M.: Mir; 1969.
20. Greg S., Sing K. Adsorbtsiya, udel'naya poverkhnost', poristost'. M.: Mir; 1984.
21. Akhmetov N.S. Obshchaya i neorganicheskaya khimiya. M.: Vysshaya shkola; 1988.
22. Lindenau N.I., Mayevskaya V.I., Krylov V.F. Proiskhozhdeniye, profilaktika i tusheniye endogennykh pozharov v ugol'nykh shakhtakh. M.: Nedra; 1977.
23. Kol'tsov K.S., Popov B.G. Samovozgoraniye tvordyykh veshchestv i materialov i yego profilaktika. M.: Khimiya; 1978.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Anatoly N. Zaostrovsky, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky pr., 18), Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, e-mail: catalys01@rambler.ru

Anna V. Petrushina, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky pr., 18), Dr. Sc. in Pedagogy, Associate Professor, e-mail: a-petrushina@inbox.ru

Denis R. Nurmukhametov, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky pr., 18), Dr. Sc. in Physics and Mathematics, e-mail: nurmukhametovdr@ficuuh.ru

Contribution of the authors:

Anatoly N. Zaostrovsky – statement of the research problem, scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; data collection and analysis; conclusions, text writing.

Anna V. Petrushina – scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; data collection and analysis; conclusions, text writing.

Denis R. Nurmukhametov – scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; data analysis; conclusions, text writing

All authors have read and approved the final manuscript.

