



I ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.28.26.001

УДК 622.411.332

© Д.В. Ботвенко, В.Г. Казанцев, 2020

Д.В. БОТВЕНКО

канд. техн. наук,
заведующий отделом
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: d.botvenko@nc-vostnii.ru



В.Г. КАЗАНЦЕВ

д-р техн. наук,
заведующий кафедрой
БТИ АлтГТУ, г. Бийск
e-mail: wts-01@mail.ru



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ФРИКЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

Приведены энергетические и фрикционные источники воспламенения метановоздушной смеси при ведении горных работ на угольных шахтах, необходимость дальнейшего изучения которых обусловлена обеспечением экологичности и безопасности горного производства.

Ключевые слова: ТЕХНОГЕННЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНОГО МАССИВА, ВСПЫШКИ И ВЗРЫВЫ, ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ, ФРИКЦИОННОЕ ТРЕНИЕ.

Сегодня не вызывает сомнений очевидный факт, что источником воспламенения пыле- и метановоздушных смесей (МВС) на угольных шахтах являются техногенные (природные) проявления при ведении горных работ, вытягивающие за собой цепочку опасностей в результате разрушения углепородного массива. Поскольку добыча угля невозможна без разрушения горного массива, то для устранения или минимизации негативных проявлений – вспышек, возгораний и взрывов рудничных газов необходимо подвергнуть тщательному изучению как сами процессы разрушения, так и начинающиеся

при этом явления, провоцирующие возникновение горения.

Одним из основных провоцирующих факторов, вызывающих воспламенение МВС, «является фрикционное трение разрушенных частей горных пород в результате обрушения кровли, вывалов породы, горных ударов и выбросов» [1].

В исследовании фрикционной опасности горных пород большое значение имеют работы таких российских и зарубежных ученых, как Поздняков Г.А., Лихачев Л.Я., Глатман Л.Б., Мерзляков В.Г., Позин Е.З., Кирин Б.Ф., Трубицын А.В., Кочерга Н.Г., Мела-

мед В.З., Липин Ю.И., Ищук И.Г., Чирков С.Е. и другие [2].

Уже в 1887 году Прусская комиссия по рудничному газу указала на то, что при обрушениях кровли в результате трения породы о породу может случиться воспламенение газов. В качестве причины возгорания называлось выделение большого количества тепла при трении породных отдельностей из-за оседания кровли в выработанное пространство или при ее внезапных обрушениях [3].

Первые из опытов, подтверждающие возможность возгорания горючих газов в смеси с воздухом при трении породы о породу, были осуществлены, по-видимому, еще в 1913 году в связи со взрывами на руднике «Бельвю» (Канада) в 1912 году Стерлингом и Кадманом. С песчаником проводились опыты, в каждом из которых при трении пород возникало воспламенение газов. Впоследствии установили, что температура воспламенения смеси газов, возникающая в результате трения, заметно понижается, если в состав рудничного газа наряду с метаном входят этан, пропан, бутан [1, 2].

За период с 1980 по 1989 г. в угольных шахтах ЮАР произошло 57 взрывов газа и пыли, 75 % из которых произошли в забоях, в частности от фрикционного трения [3].

В 1970–1998 гг. в угольных шахтах СССР (СНГ, Россия) было 282 взрыва пылеметановоздушной смеси [4]. В результате фрикционного — 36 случаев, 18 из которых произошли с 1990 по 1998 г.

В последние годы проблема фрикционного воспламенения стоит наиболее остро по причине произошедших на «Воркутинской», «Антоновской» и «Красногорской» шахтах взрывов. В качестве причины аварий было названо фрикционное воспламенение при обрушении пород кровли без наличия контакта с металлическими конструкциями [3].

Учеными особое внимание было обращено на фрикционное воспламенение метановоздушных смесей вследствие повышения температуры в зоне контактирования режущего инструмента с углепородным массивом. Экспериментальные исследования с исполь-

зованием видеосъемки процессов резания показали, что источник воспламенения представляет собой раскаленный след резца на породе, который примыкает к резцу и перемещается вместе с ним.

При этом установлено, что «чем выше скорость резания, тем длиннее раскаленный след резца, что возможно только при увеличении мощности резания, так как толщина горячего следа должна оставаться постоянной. В этом случае опасность фрикционного воспламенения метана возрастает. При скорости резания, меньшей 0,5 м/с, невозможно возникновение фрикционного воспламенения метана» [1, 5, 6].

Можно полагать очевидным факт воспламенений метановоздушных смесей, источником которых является трение инструмента о породу при разрушении массива в результате снятия стружки.

Вместе с тем до настоящего времени проблеме теплового воспламенения за счет трения отдельных частей разрушаемого массива — трение породы о породу — не уделялось должного внимания. При этом выводы, основанные на экспериментах, носят скорее интуитивный характер, поскольку из-за сложности проблемы моделирования процессов перехода механической энергии в тепловую при трении остаются не выясненными.

Известна попытка рассмотрения механизма возникновения вспышки метановоздушной смеси вследствие фрикционного трения пород на базе моделирования зажигания смеси, в основе чего лежит двухтемпературная теплодиффузионная модель горения [1].

В некоторых работах ставится задача разработки феноменологической модели для изучения закономерностей процесса фрикционного контактирования резца с породой с целью установления механизма возникновения высокотемпературного источника [1, 7, 8].

Оба подхода заслуживают внимания, обнаруживают свою потенциальную пригодность, однако нуждаются в дальнейшем развитии.

Обобщая и анализируя результаты вышеприведенного обзора относительно фрик-

ционного воспламенения рудничных газов, заметим, что те представления о фрикционных воспламенениях, которые выработаны в теории и практике, не дают возможности установить единую методологическую основу решения указанной задачи. Также следует отметить, что в ряде известных работ отмечалось отсутствие детального изучения механизмов образования воспламеняющего искрения при ударах и трении резцов о породы [4, 9].

Таким образом, до настоящего времени физика механизма воспламенения горючих смесей за счет фрикционного трения инструмента о породу остается малоизученной, а механика фрикционного воспламенения при динамическом взаимодействии разрушенных частей горных пород, изученная и того менее, требует пристального внимания.

Вместе с тем, рассматривая вероятные источники воспламенения рудничных газов в результате разрушения горных пород, следует отметить, что уже на стадии формирования повреждений в массиве (трещинообразование в массиве перед его финальным разрушением) выявляются новые источники воспламенения. Так, например, из результатов работ [10–12] следует, что на берегах существующих и вновь образующихся трещин при деформировании массива возникают электрические заряды противоположных знаков. Факт возникновения электрического поля установлен фиксируемым электромагнитным излучением (ЭМИ) при испытаниях образцов пород в условиях одноосного сжатия [10]. Причем с увеличением микроразрушений увеличивается и число импульсов ЭМИ. По данным работ [10, 13] напряженность поля в трещинах может достигать 10^7 – 10^8 В/см. В соответствии с законом Пашена разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления газа в трещине на расстояние между берегами трещины. Стало быть, при определенном сочетании напряженности электрического поля и расстоянии между берегами трещины и пластовым давлением рудничного газа, в трещине возможен электрический пробой (разряд).

Для справки: «пробойное» напряжение воздуха между параллельными пластинами при стандартных условиях соответствует величине $U[\text{кВ}] = p[\text{атм}] \times s[\text{см}] + 6,4(ps)^{1/2}$, где p — давление; s — расстояние между пластинами. Заметим также, что диэлектрическая проницаемость метановоздушной смеси в 1,7 раза выше, чем у воздуха.

Таким образом, если рудничный газ в полости трещины находится во взрывоопасной концентрации, то электрический разряд между берегами трещины может вызвать вспышку (взрыв) газовой смеси.

В результате шахтных наблюдений установлено [14], что по мере приближения к забою по выработке число импульсных ЭМИ увеличивается.

Это означает не что иное, как увеличение хаотических повреждений в углепородном массиве вследствие увеличения уровня опорного давления.

В этой связи оказывается важным при ведении горных работ устанавливать очаги повышенных концентраций НДС у выработок, очистных забоев, по протяженности нависающей кровли и т. п. областей массива как областей потенциально опасных по взрывам метановоздушных смесей.

Поскольку природа возникновения ЭМИ все еще не изучена, остается невыясненным вопрос относительно механизма накопления зарядов на берегах растущих и вновь образующихся множественных нарушений (трещин) в массиве горных пород.

Нами установлено [3, 15–17], что одной из вероятных причин возникновения и накопления зарядов на берегах трещин является пьезоэлектрический эффект как отклик массива на его деформирование.

Рассмотренные в работах [3, 15–17] способы выявления и получения пьезоэлектрического эффекта горных пород, измерение электрических напряжений при деформировании горных пород, в том числе на третьей стадии ползучести, вероятность искрообразования вследствие фрикционного трения, вклад в искрообразование статического электричества могут быть отнесены к факторам возникновения взрывов рудничного газа при обруше-

ниях и вывалах горных пород, обрушениях кровли при выемке угля. Это, в свою очередь, имеет важное практическое значение для улучшения методологии прогностической системы и технологии угледобычи. В таком ключе отмеченная проблема как в России, так и в других странах не рассматривалась, поэтому ее можно назвать новой [3].

Еще одна из причин локального повышения температуры в массиве проявляется в результате разрушения массива горных пород (МГП). Вместе с тем экспериментальные исследования Середина В.В. на образцах из гипса и цемента марок М100 и М400 показали незначительное увеличение температуры массива в зоне разрушения [18]. При этом установлено, что максимальным является увеличение температуры при одноосном сжатии для всех исследуемых материалов, тогда как при растяжении наблюдаются меньшие значения изменения температуры. Возрастание температуры материалов в зоне разрушения наблюдается при увеличении прочности на сжатие образцов. Например, в образцах из цемента марки М100 при средней прочности на сжатие 4,52 МПа в зоне разрушения наблюдается изменение температуры материала, равное 0,88 °С. В случае увеличения прочности образцов до 34,38 МПа (цемент М400) температура увеличивается в 5,8 раза, изменения равны 5,06 °С. Данная закономерность характерна и для материалов, которые находятся в условиях одноосного растяжения. Например, если средняя прочность на растяжение образцов цемента М100 составляла 0,081 МПа, изменение температуры материала было равно 0,16 °С; если прочность возрастала до 0,520 МПа (цемент М400), температура увели-

чивалась в 1,4 раза, изменение равно 1,22 °С.

Таким образом, рассматривая физические свойства материалов горных пород, можно полагать, что вспышки метановоздушной смеси могут быть вызваны четверкой явлений или их комбинацией: в результате местного нагрева при фрикционном трении разрушаемых частей горных пород, а также при трении зубков режущих частей горных машин в контакте с углепородным массивом, либо трении крепи о массив и т. п.; вследствие искрообразования как результат фрикционного трения; вследствие электрического разряда через поверхности радела массива в процессе хаотического накопления повреждений — трещин, ветвящихся трещин и т. п., в результате реализации пьезоэлектрического эффекта в горных породах при деформировании массива.

Заметим также, что все четыре выделенных нами явления нуждаются в дальнейшей тщательной проработке, поскольку, несмотря на продолжительную историю их проявления, изучение перечисленных выше техногенных опасностей находится в начальной стадии, зачастую на уровне не вполне доказанных предположений как у нас в стране, так и за рубежом. Как следствие, отсутствуют единые методологические подходы к оценке причин воспламенения метановоздушных смесей в горных выработках, а также единая система классификации перечисленных опасностей.

В этой связи вызывает затруднение разработка нормативно-методической базы по контролю и предупреждению геодинамических явлений как фактора инициатора воспламенений рудничных газов на угольных шахтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботвенко Д.В. Разработка методики оценки и классификации фрикционной опасности горных пород: дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Ботвенко. Кемерово, 2004. 167 с.
2. Цольвег Н.К. Результаты опытных исследований за границей в области изучения воспламенения гремучего газа от трения // Уголь. 1931. № 5. С. 71–72.
3. Ботвенко Д.В. Проблема фрикционного воспламенения метановоздушной смеси в современных условиях угледобычи // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2012. № 2. С. 48–50.

4. Трубицын А.А., Ишук И.Г., Трубицына Н.В., Подображин С.Н. Оценка опасности горных пород по фрикционному воспламенению метановоздушной смеси // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 1. С. 25–26.
5. Леман Х. Орошение борозд резания резцами коронок комбайнов избирательного действия // Глюкауф. 1987. № 12. С. 3–7.
6. Thomas W.G., Datey U.V. The incendivity of frictional sparks // Colliery Engineering. 1963. Vol. 477. P. 18–21.
7. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
8. Катков Г.И. Исследование горного давления с применением фотоупругих элементов. М.: Наука, 1978. 216 с.
9. Ботвенко Д.В., Попов В.Б., Ермолаев А.М., Казанцев В.Г. Исследования возможности и причин искрообразования при деформировании и разрушении горных пород // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 10. С. 62–64.
10. Егоров П.В., Колмагоров В.М., Денисенко С.И., Малютин Б.В., Егоров О.П., Старков С.П. О механизме инициирования внезапных выбросов породы, угля и газа естественным электрическим зарядом // Физические основы горного производства. Томск, 1979. С. 14–17.
11. Егоров П.В., Васильев С.Б., Корнейчиков В.П. Явление возникновения объемного разряда в горных породах при их механическом нагружении // ФТПРПИ. 1978. № 5. С. 101–103.
12. Корнфельд М.И. Электрические разряды на поверхности щелочно-голоидного кристалла // ФТТ. 1971. Т. 13. № 2. С. 474–479.
13. Воробьев А.А. Преобразование видов энергии в земной коре, электризация пород и разряд в них // Материалы научно-технической конференции ТВН. Томск, 1973.
14. Егоров П.В., Денисенко С.И., Малютин Б.В., Егоров О.П., Старков С.П. Напряженное состояние массива и инициирование внезапных выбросов породы, угля и газа естественным электрическим зарядом // Физические процессы горного производства. 1980. С. 18–20.
15. Ботвенко Д.В., Сазонов М.С., Казанцев В.Г., Высоцкий В.В. Исследование пьезоэлектрического эффекта горных пород // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 5. С. 49–55.
16. Ботвенко Д.В., Казанцев В.Г., Сазонов М.С., Высоцкий В.В. Экспериментальные исследования пьезоэлектрического эффекта горных пород // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2014. № 2. С. 16–22.
17. Ботвенко Д.В., Казанцев В.Г., Сазонов М.С., Высоцкий В.В. О возможности воспламенения метановоздушной смеси от пьезоэлектрического эффекта горных пород // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2014. № 1. С. 96–98.
18. Лемес Ф. Резцедержатели с эжекторными оросителями борозды резания // Глюкауф. 1999. № 1. С. 28–33.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.28.26.001

UDC 622.411.332

© D.V. Botvenko, V.G. Kazantsev, 2020

D.V. BOTVENKO

Candidate of Engineering Sciences,

Head Of Department

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: d.botvenko@nc-vostnii.ru

V.G. KAZANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,
Head Of Department
BTI AltSTU, Biysk
e-mail: wts-01@mail.ru

ENERGY AND FRICTION SOURCES OF METHANE-AIR MIXTURE IGNITION IN CASE OF CARBON-GAS MASS DESTRUCTION

Energy and friction sources of methane-air mixture ignition during mining operations at coal mines are presented, the need for further study of which is due to ecological compatibility and safety of mining production.

Keywords: TECHNOGENIC MANIFESTATIONS, DESTRUCTION OF THE MASSIF, FLARES AND EXPLOSIONS, IGNITION OF GAS MIXTURES, FRICTIONAL FRICTION.

REFERENCES

1. Botvenko D.V. Development of a technique for assessing and classifying the frictional hazard of rocks: dis. ... cand. tech. sciences. Kemerovo, 2004. 167 p. (In Russ.).
2. Tsolveg N.K. The results of experimental studies abroad in the field of studying the ignition of explosive gas from friction // Coal [Ugol]. 1931. No. 5. P. 71–72. (In Russ.).
3. Botvenko D.V. The problem of frictional ignition of a methane-air mixture in modern coal mining // Bulletin of the Scientific Center for Coal Safety [Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2012. No. 2. P. 48–50. (In Russ.).
4. Trubitsyn A.A., Ischuk I.G., Trubitsina N.V., Podobrazin S.N. Hazard assessment of rocks by friction ignition of methane-air mixture // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2004. No. 1. P. 25–26. (In Russ.).
5. Leman H. Irrigation of furrows by cutting cutters of crowns of selective-action combines // Glukauf [Glyukauf]. 1987. No. 12. P. 3–7. (In Russ.).
6. Thomas W.G., Datey U.V. The incendivity of frictional sparks // Colliery Engineering. 1963. Vol. 477. P. 18–21.
7. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. ANSYS for Engineers: Reference Guide. M.: Mechanical Engineering-1, 2004. 512 p. (In Russ.).
8. Katkov G.I. Investigation of rock pressure using photoelastic elements. M.: Nauka, 1978. 216 p. (In Russ.).
9. Botvenko D.V., Popov V.B., Ermolaev A.M., Kazantsev V.G. Studies of the possibility and causes of sparking during deformation and destruction of rocks // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2016. No. 10. P. 62–64. (In Russ.).
10. Egorov P.V., Kolmagorov V.M., Denisenko S.I., Malutin B.V., Egorov O.P., Starkov S.P. On the mechanism of initiation of sudden emissions of rock, coal and gas by natural electric charge // Physical bases of mining production. Tomsk, 1979. P. 14–17. (In Russ.).
11. Egorov P.V., Vasilyev S.B., Korneuchikov V.P. The phenomenon of occurrence of volumetric discharge in rocks during their mechanical loading // FTPrPI. 1978. № 5. P. 101–103. (In Russ.).
12. Kornfeld M.I. Electric discharges on the surface of alkaline-holoid crystal // PTT. 1971. T. 13. No. 2. P. 474–479. (In Russ.).
13. Vorobiev A.A. Transformation of energy types in the Earth's crust, electrocution of rocks and discharge in them // Materials of the scientific and technical conference of TVN. Tomsk, 1973. (In Russ.).
14. Egorov P.V., Denisenko S.I., Malyutin B.V., Egorov O.P., Starkov S.P. The stress state of the massif and the initiation of sudden outbursts of rock, coal and gas by a natural electric charge // Physical processes of mining [Fizicheskiye protsessy gornogo proizvodstva]. 1980. P. 18–20. (In Russ.).

15. Botvenko D.V., Sazonov M.S., Kazantsev V.G., Vysotsky V.V. The study of the piezoelectric effect of rocks // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2014. No. 5. P. 49–55. (In Russ.).

16. Botvenko D.V., Kazantsev V.G., Sazonov M.S., Vysotsky V.V. Experimental studies of the piezoelectric effect of rocks // Bulletin of the Scientific Center for Coal Safety [Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2014. No. 2. P. 16–22. (In Russ.).

17. Botvenko D.V., Kazantsev V.G., Sazonov M.S., Vysotsky V.V. On the possibility of igniting a methane-air mixture from the piezoelectric effect of rocks // Bulletin of the Scientific Center for Coal Safety [Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2014. No. 1. P. 96–98. (In Russ.).

18. Lemes F. Tool holders with ejector irrigators cutting furrows // Glukauf [Glyukauf]. 1999. No. 1. P. 28–33. (In Russ.).