



В. И. ГОЛИНЬКО,
доктор техн. наук
(Национальный горный университет)



А. В. ЯВОРСКИЙ,
канд. техн. наук
(Национальный горный университет)



Я. Я. ЛЕБЕДЕВ,
канд. техн. наук
(Национальный горный университет)



Е. А. ЯВОРСКАЯ,
канд. техн. наук
(Национальный горный университет)

УДК 622.817:622.812:622.807

Оценка опасности воспламенения метановоздушной смеси при разрушении газонасыщенного массива

Приведены результаты исследований, направленных на повышение уровня безопасности ведения горных работ при разрушении газонасыщенного массива исполнительными органами добычных и проходческих комбайнов.

Ключевые слова: метановоздушная смесь, комбайн, газонасыщенный массив, температура пятна контакта, фрикционное искрение, трение.

Контактная информация: golinko@nmu.org.ua

На теплофизические процессы, происходящие при взаимодействии режущих инструментов исполнительного органа комбайна с массивом горных пород, влияет значительное количество факторов, которые можно разделить на три основные группы: свойства разрушаемых горных пород; свойства материала и геометрические параметры инструмента; параметры режима работы исполнительного органа комбайна.

При «работе» твердых сплавов в условиях трения важную роль играют их физические свойства, особенно теплопроводность. Высокая теплопроводность способствует быстрому отводу теплоты от режущих кромок инструмента и снижению интенсивности нарастания контактной температуры. Если твердый сплав имеет низкую теплопроводность, то выделяющаяся теплота накапливается на режущей кромке резца, вследствие чего наблюдается стремительный рост контактной температуры.

В пределах одной группы сплавов теплопроводность зависит от количества карбидной фазы и пористости, с уменьшением которых теплопроводность возрастает. Вольфрамкобальтовые сплавы более теплопроводны, чем титановольфрамкобальтовые. Теплопроводность сплавов группы ВК в 2–3 раза выше, чем быстрорежущей стали. Определенная по методу Кольрауша, для сплавов с 4 % кобальта теплопроводность составляет 50,24 Вт/(м·К) и с 15 % – 66,99 Вт/(м·К) [1]. С повышением температуры она снижается.

В результате накопления теплоты нарастает контактная температура, которая зависит от параметров режима работы исполнительного органа комбайна (скорость, усилие резания и др.). С увеличением скорости резания повышаются контактные температуры и возникает искрообразование. Фрикционные искры образуются при ударе, трении, в процессе разрушения массива горных пород и связаны с превращением части кинетической энергии механического взаимодействия в теплоту с последующим экзотермическим окислением и разогревом частиц.

Искры представляют собой обломки раскаленных породных зерен и частиц металла (температура 500–700 °С). В случае дальнейшего воз-

растания скорости увеличиваются температура искр (достигает 700–1400 °С) и искровой поток [2].

Интенсивность фрикционного искрообразования при взаимодействии исполнительных органов комбайнов с массивом горных пород зависит от свойств пород, слагающих разрушаемый массив. Распределение в горном массиве пород, вызывающих искрообразование, относится к случайным процессам.

Анализ вспышек и взрывов метана, а также угольной пыли, произошедших в очистных и подготовительных выработках [2], показал, что фрикционное искрение, возникающее при разрушении массива горных пород, может привести к авариям с тяжелыми материальными и социальными последствиями. Так, 8 февраля 1985 г. во время комбайновой проходки выработок произошел взрыв в шахте «Карагайлинская» ПО «Киселевскуголь» (Россия). Метан воспламенился от фрикционного искрения, возникшего при трении режущих зубков рабочего органа комбайна о твердые включения в угольном пласте. Воспламенение метана перешло во взрыв угольной пыли. Было разрушено 630 м горных выработок. Один из крупнейших взрывов метана зафиксирован 2 декабря 1997 г. в шахте «Заряновская» (Кузбасс, Россия), погибло 67 человек. Метан воспламенился в очистном забое во время работы выемочного комбайна.

На шахтах Западного Донбасса в 2009 и в 2011 гг. также произошли аварии, где источником возгорания метановоздушной смеси стало фрикционное искрение, возникшее в результате трения зубков шнека исполнительного органа очистного комбайна о включения пирита в угольном пласте [3].

Фрикционное искрение занимает второе место среди всех возможных источников воспламенений в угольных шахтах [2], две трети – от фрикционного искрения. Причем в 55 % случаев причиной было трение зубков о пирит, находящийся в угольных пластах в виде включений, и в 15 % случаев – при резании песчаников. Несколько воспламенений вызвано ударами стальных инструментов о крепкий глинистый сланец. Известен также взрыв метана от фрикционного искрения при трении зубков об известняк. Таким образом, появление такого теплового источника, как фрикционное искрение во многом зависит от минералогического состава горных пород.

В угольных бассейнах СНГ насчитывается около 19 % шахтопластов с боковыми породами, способными при трении образовывать взрывоопасное искрение, причем 38 % вмещающих пород составляют песчаники [2]. Угольные пласты как правило содержат включения пирита, встречающегося в виде линз и конкреций различных размеров, и другие твердые включения, распределение которых носит случайный характер.

До настоящего времени механизм поджигания горючих смесей фрикционным искрообразованием остается малоизученным. Вместе с тем известно, что на интенсивность и поджигающую способность фрикционных искр влияют режим трения и соударения двух тел, физико-механические и физико-химические свойства контактирующих поверхностей и другие факторы. Это означает, что механизм воспламенения смеси такими искрами зависит от их теплофизических параметров.

Не все фрикционные искры способны поджечь пылеметановоздушную смесь. Основной причиной воспламенения горючих смесей считались любые искры, вызываемые фрикционным трением или ударом резца о кварцсодержащий песчаник [3, 4]. Однако Бликенсдерфер, а также Бергесс и Уиллер в лабораторных условиях установили, что трудно воспламенить метановоздушную смесь с помощью такого искрения, поскольку отдельные искры обычно не обладают достаточным сочетанием продолжительности, температуры и площади поверхности для воспламенения.

Газы с низкой температурой воспламенения, типа водорода, воспламеняются довольно легко от одиночных искр. Метан же обладает свойством запаздывания воспламенения при появлении теплового источника, поэтому по отношению к пылеметановоздушной смеси фрикционные искры могут быть воспламеняющими только при определенных условиях [2], т. е. когда тепловая энергия и время действия искр достаточны для воспламенения взрывоопасной смеси метана или пыли с воздухом.

Указанные условия создаются при трении зубков (резцов) рабочего органа комбайна о кварц, песчаник, гранит и другие крупнозернистые крепкие (по шкале М. М. Протождяконова $f = 10...12$) породы, когда на трущейся поверхности остаются раскаленные тонкодисперсные частицы металла в виде ярко-белого следа длиной 8–10 мм, светящегося в течение 5 мс, с температурой 1200–1250 °С, который и является источником воспламенения метановоздушной смеси.

Наиболее высокой воспламеняющей способностью обладают искры, которые возникают от трения резцов о кварц и крупнозернистый песчаник крепостью $f = 10...12$. При трении резцов о мелкозернистый песчаник образуется много тонкодисперсной пыли, которая флегматизирует взрывчатую среду, в результате она не воспламеняется (исследования показали, что при $f < 6$ воспламенение метана не происходит, при $f = 8...9$ вероятность составляет 0,16 %).

Кроме того, установлено [2], что метан воспламеняется при трении новых резцов, т. е. когда изнашивается только вставка из твердого сплава,

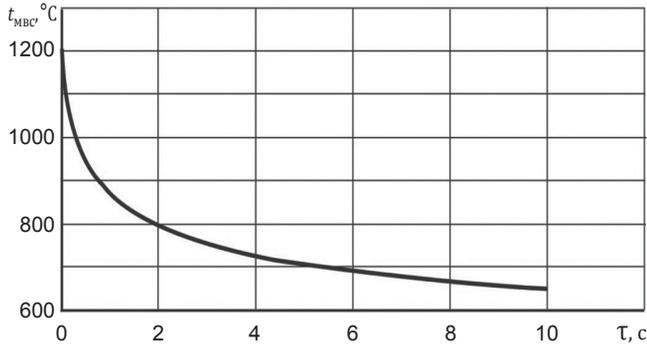


Рис. 1. Зависимость температуры воспламенения $t_{\text{мвс}}$ метановоздушной смеси от времени соприкосновения с источником высокой температуры $T_{\text{и}}$.

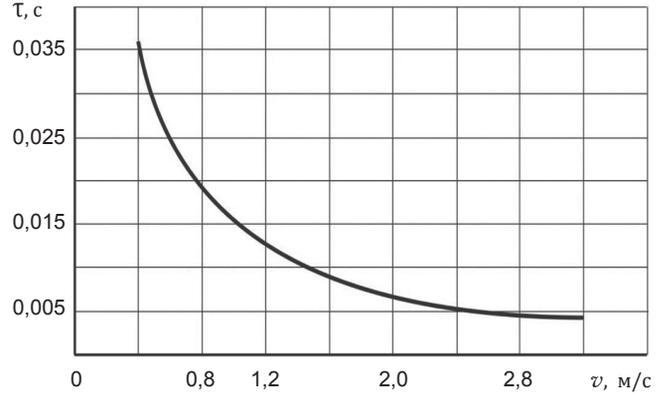


Рис. 2. Зависимость времени нагрева τ от скорости резания v .

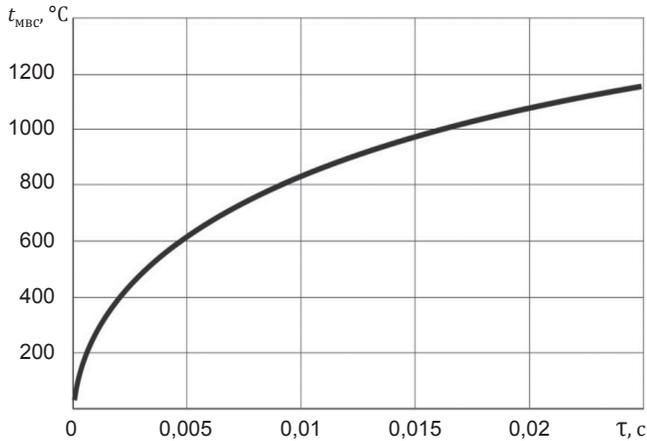


Рис. 3. Зависимость температуры $t_{\text{мвс}}$ метановоздушной смеси от времени нагрева τ .

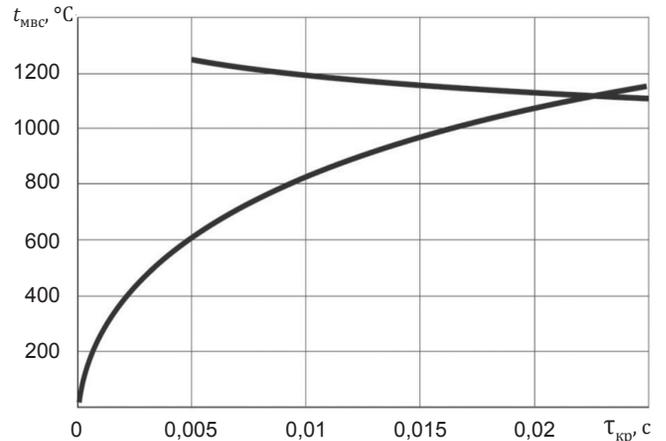


Рис. 4. Определение критического времени $\tau_{\text{кр}}$ нагрева метановоздушной смеси.

а стальная державка еще не соприкасается с породой. При этом твердый сплав при трении и соударении вследствие износостойкости оставляет на поверхности породы раскаленные тонкодисперсные частицы в виде ярко-белого следа, температура которого близка к температуре плавления сплава (1300–1350 °С). В процессе износа твердого сплава происходит трение стальной державки резца о газонасыщенный массив, в результате чего разрушается высокотемпературный след и тем самым улучшаются условия для его охлаждения до температуры, не воспламеняющей метан.

Теплота, выделяемая в процессе трения при взаимодействии резцов исполнительного органа комбайна с массивом горных пород, передается в пылегазовоздушную среду с нагретой поверхности (следа).

Наивысшая температура метановоздушной смеси наблюдается на поверхности пятна контакта резца с массивом, максимальная температура этого пятна за время контакта τ резца с газонасыщенным массивом

определяется из выражения, полученного в неявном виде [3, 4]:

$$5 \cdot 10^{-3} [\tau^3 / (t - t_{\text{мвс}}) (v_p f_{\text{тр}} A h_{\text{max}})^3 / \lambda] - 9,9 \cdot 10^{-5} [\tau / (t - t_{\text{мвс}})]^2 [(v_p f_{\text{тр}} A h_{\text{max}}) / \lambda]^2 - 0,25 \cdot \tau^2 (v_p f_{\text{тр}} A h_{\text{max}})^2 r_{\text{и}}^2 + \tau = 32 - 803,84 \cdot \lambda r_{\text{и}} (t - t_{\text{мвс}}) - 16 \cdot \ln[(\tau/t)(r_{\text{и}}/c_m \cdot \rho)(0,08(v_p/r_{\text{и}})f_{\text{тр}} A h_{\text{max}} - 2\lambda)], \quad (1)$$

где t – температура поверхности контакта резца и газонасыщенного массива, °С;

$t_{\text{мвс}}$ – температура метановоздушной среды, °С;

A – сопротивляемость массива резанию, кН;

h_{max} – место наибольшего среза массива с наибольшим давлением на него (наибольшая толщина стружки), м;

λ – коэффициент теплопроводности метановоздушной смеси, Вт/(м · °С);

v_p – скорость резания, м/с;

$f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения;

r_n – радиус исполнительного органа комбайна (шнека), м;

ρ и c_m – плотность, кг/м³, и удельная теплоемкость метановоздушной среды, Дж/(кг · °С).

Выражение (1) устанавливает взаимосвязь температуры нагрева метановоздушной смеси со скоростью резания исполнительного органа комбайна и коэффициентом трения резака о породу в процессе взаимодействия режущей поверхности отбойного органа с поверхностью газонасыщенного массива, учитывает ряд конструктивных особенностей исполнительного органа комбайна (радиус резания отбойного органа, максимально возможную конструктивную скорость резания, теплопроводность метановоздушной смеси, а также нагрузку от исполнительного органа на забой).

Температура, образующаяся на поверхности контакта фрикционных пар, при взаимодействии исполнительного органа комбайна с газонасыщенным массивом значительно превышает температуру воспламенения метановоздушной смеси. При этом теплоты, которую отдает поверхность контакта фрикционных пар в окружающую метановоздушную среду, может быть недостаточно для воспламенения горючей смеси из-за необходимости ее поддержания в течение индукционного периода.

Воспламенение метановоздушной смеси возможно при условии, что суммарное количество теплоты, отданное поверхностью контакта фрикционных пар в окружающую метановоздушную среду, удовлетворяет условиям поджигания горючей смеси.

Согласно тепловой теории самовоспламенения газов минимальная температура, при которой выделение теплоты превышает ее отвод, является температурой самовоспламенения, или температурой вспышки, или критической температурой [2].

Известно, что при действии на горючую смесь источника воспламенения реакция на протяжении определенного промежутка времени протекает без внешних признаков, в частности, без возникновения пламени. Промежуток времени скрытого (без возникновения пламени) протекания реакции воспламенения называют периодом индукции или задержкой воспламенения, определяемой по зависимости [2]

$$\tau_{ин} = 7994 \cdot \exp(-0,0113 \cdot t), \quad (2)$$

где t – температура источника воспламенения, °С.

Период индукции означает, что воспламенения не произойдет при любой температуре источника воспламенения, если $\tau_{ди} < \tau_{ин}$, где $\tau_{ди}$ – время действия источника воспламенения. Зависимость воспламенения метановоздушной смеси от времени со-

прикосновения с источником высокой температуры представлена на рис. 1.

Для заданных значений параметров, входящих в выражение (1), зависимость времени нагрева до критической температуры от скорости резания имеет вид, приведенный на рис. 2. Кривая изменения температуры нагрева метановоздушной смеси для $f_{тр} = 0,95$ будет иметь вид, приведенный на рис. 3.

При совмещении кривых (см. рис. 1 и 3) оценивается критическое время нагрева метановоздушной смеси (рис. 4), которое составляет порядка 23 мс. Критическое время ($\tau_{кр} = 23$ мс) соответствует максимально допустимой скорости резания исполнительного органа комбайна $v_{р.кр} \approx 0,7$ м/с, при которой температура нагрева метановоздушной смеси не достигнет температуры воспламенения.

Выводы. Температура нагретых поверхностей, образующихся при взаимодействии исполнительного органа комбайна с газонасыщенным массивом, значительно превышает температуру воспламенения метановоздушной смеси. Количество теплоты, которое отдает нагретая поверхность в окружающую метановоздушную среду, может быть достаточно для воспламенения горючей смеси в случае поддержания в течение индукционного периода.

В настоящее время практически для всего диапазона скоростей резания комбайнов возможно достижение критических, с точки зрения самовоспламенения горючих смесей, температур метановоздушной смеси.

Для оценки влияния нагретой поверхности взаимодействия режущего инструмента с газонасыщенным массивом горных пород на воспламенение метановоздушной смеси предложен графический метод определения критического времени нагрева метановоздушной смеси в разных условиях динамических нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорешок А. А. Горные машины и оборудование подземных горных работ. Режущий инструмент горных машин: учеб. пособие / А. А. Хорешок, Л. Е. Маметьев, А. М. Цехин, А. Ю. Борисов. – Кемерово: КузГТУ, 2012. – 288 с.
2. Шевцов Н. Р. Взрывозащита горных выработок (курс лекций): учеб. пособие для вузов / Н. Р. Шевцов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 280 с.
3. Голинько В. И. Влияние параметров разрушения газонасыщенного массива на его теплообмен с окружающей метановоздушной средой / В. И. Голинько, А. В. Яворский, Я. Я. Лебедев, Е. А. Яворская // Геотехнічна механіка. – 2014. – Вип. 117. – С. 161 – 175.
4. Голинько В. И. Оценка влияния фрикционного искрообразования на воспламенение метановоздушной смеси при разрушении газонасыщенного массива / В. И. Голинько, А. В. Яворский, Я. Я. Лебедев, Е. А. Яворская // Наук. вісник НГУ. – 2013. – № 6. – С. 31 – 37.