

УДК(622.817:622.812:622.807)

Голинько В.И., д-р техн. наук, профессор,
Яворский А.В., канд. техн. наук, доцент,
Лебедев Я.Я., канд. техн. наук, доцент,
Яворская Е.А., канд. техн. наук, доцент
(Государственный ВУЗ «НГУ»)

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО
МАССИВА НА ЕГО ТЕПЛООБМЕН С ОКРУЖАЮЩЕЙ
МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СРЕДОЙ**

Голінько В.І., д-р техн. наук, професор,
Яворський А.В., канд. техн. наук, доцент,
Лебедев Я.Я., канд. техн. наук, доцент,
Яворська О.О., канд. техн. наук, доцент
(Державний ВНЗ «НГУ»)

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ ГАЗОНАСИЧЕНОГО МАСИВУ
НА ЙОГО ТЕПЛООБМІН З НАВКОЛИШНІМ МЕТАНОПОВІТРЯНИМ
СЕРЕДОВИЩЕМ**

Golinko V.I., D. Sc. (Tech.), professor,
Yavorsky A.V., Ph.D. (Tech.), Associate Professor,
Lebedev Ya.Ya., Ph.D. (Tech.), Associate Professor,
Yavorskaya Ye.A., Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(State H E I «NMU»)

**EFFECT OF GAS-SATURATED ROCK MASS FRAGMENTATION ON ITS
HEAT-EXCHANGE WITH AMBIENT METHANE-AIR ENVIRONMENT**

Аннотация. В статье приведены результаты исследований, направленных на повышение уровня безопасности ведения горных работ при разрушении газонасыщенного массива исполнительными органами добычных и проходческих комбайнов. Определена область эффективного использования мероприятий и средств предупреждения взрывов пылеметановоздушных смесей.

Разработана и теоретически обоснована математическая модель формализованного описания процесса передачи тепла в окружающую метановоздушную среду раскаленной поверхностью.

Получены зависимости для определения количества накопленного тепла и отданного в окружающую метановоздушную среду поверхностью взаимодействия режущего инструмента с газонасыщенным массивом, а также для расчета времени передачи тепла горючей смеси, позволяющих учитывать индукционные свойства метановоздушной среды.

Ключевые слова: газонасыщенный массив, теплообмен, метан, резец.

Постановка проблемы. Процесс разрушения горных пород, при взаимодействии режущего инструмента исполнительного органа комбайна с массивом, связан со значительными затратами энергии. Экспериментальными исследованиями [1] установлено, что на трение резца об уголь уходит до 46% энергии,

которая в итоге превращается в тепловую. В результате накопления тепла происходит нарастание контактной температуры, величина которой может превышать температуру воспламенения тройных пылеметановоздушных смесей в несколько раз. Этот факт, в условиях газонасыщенного массива, оказывает существенное влияние на безопасность ведения горных работ. Поэтому для разработки новых и определения области эффективного использования существующих мероприятий и средств предупреждения взрывов пылеметановоздушных смесей необходимо установить закономерности процесса отдачи тепла в окружающую пылеметановоздушную среду раскаленной поверхностью, образовавшейся при взаимодействии режущего инструмента исполнительного органа очистных и проходческих комбайнов с разрушаемым газонасыщенным массивом горных пород.

Актуальность. Анализ вспышек и взрывов метана и угольной пыли, происшедших в очистных и подготовительных выработках [2, 4, 7] свидетельствует о том, что применение выемочных и проходческих комбайнов действительно связано с опасностью фрикционного воспламенения пылеметановоздушных смесей, возникающего при разрушении массива горных пород. Так 08.02.1985 года, при комбайновой проходке горных выработок, произошел взрыв в шахте «Карагайлинская» ПО «Киселевскуголь». Воспламенение метана произошло от фрикционного выделения тепла, возникшего при трении режущих зубков о твердые включения в угольном пласте. Воспламенение метана перешло во взрыв угольной пыли. Было разрушено 630 м горных выработок.

Один из крупнейших взрывов метана произошел 2 декабря 1997 г. в шахте "Заряновская" в Кузбассе, при котором погибло 67 человек. Воспламенение метана произошло в очистном забое при работе выемочного комбайна, т.е. от фрикционного тепловыделения. На шахтах Западного Донбасса в разные периоды времени также происходили вспышки метана, вызвавшие пожары. Так 27 мая 2009 произошел пожар в лаве пласта C_{10}^B ПСП «Шахта «Западно-Донбасская» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь». Причиной аварии явилось возгорание метановоздушной смеси на выемочном участке 1021 лавы. На основании изучения всех материалов, экспертная комиссия пришла к выводу, что наиболее вероятным источником возгорания метановоздушной смеси в лаве явилось фрикционное искрение, возникшее в результате трения зубков шнека о включения пирита в угольном пласте. По этой же причине в 2011 году произошел пожар в 158 лаве пласта C_6 ПСП «Шахта Степная».

Фрикционное воспламенение пылеметановоздушных смесей занимает второе место среди всех возможных источников воспламенений в угольных шахтах [2]. Две трети всех воспламенений в очистных забоях угольных шахт происходило от фрикционного тепловыделения. Причем в 55% случаев причиной было трение зубков о пирит, находящийся в угольных пластах в виде включений, и в 15% случаев - резание песчаников. Несколько воспламенений было вызвано ударами стальных инструментов о крепкий глинистый сланец. Известен также взрыв метана от фрикционного искрения при трении зубков об известняк. Т.е. появление такого теплового источника как фрикционное тепловыделе-

ние во многом зависит от минералогического состава горных пород.

В целом по угольным бассейнам СНГ количество шахтопластов с боковыми породами, способными при трении образовывать взрывоопасное тепловыделение, около 19%, причем 38% всех 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 в пласте носит случайный характер.

В связи с вышеуказанным, изучение процесса фрикционного воспламенения пылеметановоздушных смесей и его предупреждение в угольных шахтах является актуальной задачей.

Анализ исследований. До настоящего времени механизм поджигания горючих смесей фрикционным тепловыделением остается малоизученным. Вместе с тем известно, что интенсивность и поджигающая способность фрикционного тепла зависит от режима трения и соударения двух тел, физико-механических и физико-химических свойств контактирующих поверхностей, а также целого ряда других факторов. Это означает, что механизм воспламенения смеси таким источником тепла зависит от его природы. Не любое фрикционное тепло способно поджечь пылеметановоздушную смесь. Одно время основной причиной воспламенения горючих смесей считались любые искры, вызываемые фрикционным трением или ударом резца о кварцсодержащий песчаник. Однако Бликенсдерфер, а также Бергесс и Уиллер в лабораторных условиях установили, что очень трудно воспламенить метановоздушную смесь с помощью такого искрения, так как 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], когда тепловая энергия и время действия искр достаточны для воспламенения взрывоопасной смеси метана или пыли с воздухом. Такие условия создаются при трении зубков (резцов) о кварц, песчаник, гранит и другие крупнозернистые крепкие ($f = 10...12$) 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 обладает источник фрикционного тепла, который получается от трения резцов о кварц и крупнозернистый песчаник крепостью (по шкале проф. М.М. Протодьяконова) $f = 10...12$. При трении резцов о мелкозернистый песчаник возникает много тонкодисперсной пыли, которая флегматизирует взрывчатую среду, в результате чего воспламенение ее не происходит (исследования показали, что при $f < 6$ воспламенение метана не происходит, при $f = 8...9$ вероятность воспламенения составляет 0,16).

Исследованиями было также установлено [2], что воспламенение метана

происходит при трении новых резцов, то есть когда изнашивается только вставка из твердого сплава, а стальная державка еще не приходит в соприкосновение 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°C). В процессе износа твердого сплава вслед за ним происходит трение стальной державки, в результате чего разрушается высокотемпературный след и тем самым улучшаются условия для его охлаждения до температуры, не воспламеняющей метан.

При трении зубков режущего органа о пирит, источником воспламенения пылегазовых смесей является воспламенившееся от фрикционного искрения облако сульфидной пыли при длине следа зубка не менее 10 см [3]. По данным скоростной киносъемки время горения облака ипритной пыли объемом 15...20 дм³ составляет 200...300 мс. Таким образом, при относительно низком значении минимальной температуры воспламенения аэровзвеси пирита (350...400°C) вспышка облака пиритной пыли по продолжительности, размерам нагретой поверхности и развиваемой температуре горения (свыше 1000°C) может рассматриваться как вторичный источник с более мощным поджигающим действием, чем само фрикционное искрение.

Таким образом, анализ выполненных ранее исследований свидетельствует о том, что тепло выделяемое в процессе трения при взаимодействии резцов исполнительного органа комбайна с массивом горных пород, передается в пылегазовоздушную среду с поверхности резца, его высокотемпературного следа и от поверхности нагретых частиц (искр). При определенных условиях эти источники могут выступать в роли инициатора воспламенения метана. Плотность теплового потока от указанных источников различна. Поэтому возникает необходимость оценки каждого из них с точки зрения возможности поджигания метановоздушной среды.

Основная часть. При оценке нестационарного режима теплообмена в условиях разрушения газонасыщенного массива режущим инструментом комбайна, задача расчета состоит в определении температурного состояния тела и количества отданной телом теплоты Q за определенный промежуток времени τ .

Рассмотрим однородный металлический шар радиуса r_0 при одномерном температурном поле. Распространение тепла в этом случае происходит только по радиусу шара. Изотермные поверхности представляют собой концентрические шаровые поверхности. Шар расположен внутри шаровидного пространства радиуса $r_{II} \rightarrow \infty$, заполненного пылеметановоздушной смесью.

Известно аналитическое решение задачи о температурном поле и количестве переданной теплоты в нестационарных условиях теплообмена для сплошного однородного шара радиуса r_0 .

Избыточная температура в любой точке шара на расстоянии r от центра в произвольный момент времени τ определяется выражением

$$T = t - t_{мвс}$$

где t – температура рассматриваемой точки; $t_{мвс}$ – температура метановоздушной среды.

Для начального момента времени

$$T_0 = t_0 - t_{мвс}$$

Математическая постановка задачи состоит в решении дифференциального уравнения теплопроводности для твердых тел

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \chi \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

которое для шара имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \chi \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right),$$

где χ – коэффициент температуропроводности.

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

где λ , ρ , c_p – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость шара.

Начальные и граничные условия: при $\tau = 0$ и $0 \leq r \leq r_0$ $T = T_0 = t_0 - t_{мвс}$; при $r = 0$ $\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} = 0$; при $r = r_0$ $\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda} T_{r=r_0}$.

Задача решается методом разделения переменных [5, 6] и конечным результатом является выражение, определяющее температурное поле шара

$$\theta = \frac{T}{T_0} = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\sin \mu_i - \mu_i \cos \mu_i)}{\mu_i - \sin \mu_i \cos \mu_i} \frac{\sin \left(\mu_i \frac{r}{r_0} \right)}{\mu_i \frac{r}{r_0}} \exp(-n_k^2 Fo)$$

где n_k – корни характеристического уравнения; $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots \mu_i$ – бесчисленное множество решений корней трансцендентного уравнения; Fo – критерий Фурье, определяемый из выражения

$$F_0 = \frac{\chi \tau}{r_0^2}$$

где τ – момент времени от начала процесса.

$$\operatorname{tg}(\mu) = -\frac{\mu}{Bi-1} \text{ или } \mu \cdot \operatorname{ctg} \mu = 1 - Bi$$

где Bi – критерий Био характеризующий соотношение между перепадом температуры в двух точках тела, находящихся на расстоянии друг от друга, и температурным напором между поверхностью тела и окружающей средой.

$$Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda_i}$$

При $Bi \rightarrow \infty$ ($Bi > 100$) $n_i = i\pi$, при этом уравнение для безразмерной избыточной температуры принимает вид

$$\theta = \sum_{k=1}^{\infty} 2(-1)^{i+1} \frac{r_0}{i\pi r} \sin\left(i\pi \frac{r}{r_0}\right) \exp(-n_k^2 Fo).$$

При $Bi \rightarrow 0$ ($Bi < 0,1$) $n^2 = 3Bi$, остается только первое слагаемое в решении и уравнение для безразмерной избыточной температуры

$$\theta = \frac{\sin\left(\sqrt{3Bi} \frac{r}{r_0}\right)}{\sqrt{3Bi} \frac{r}{r_0}} \exp(-3Bi \cdot Fo).$$

Если число Фурье превышает 0,25, то ряд становится настолько быстроходящимся, что ошибка не превышает 1%, если распределение температуры ограничить первым членом ряда, то

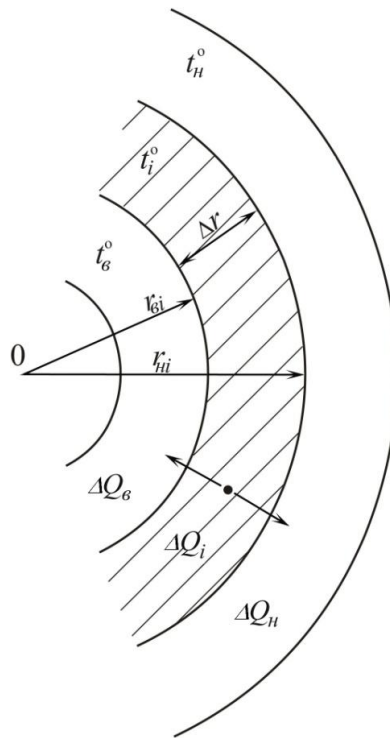
$$\theta = 2 \frac{(\sin \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1)}{\mu_1 - \sin \mu_1 \cos \mu_1} \frac{\sin\left(\mu_1 \frac{r}{r_0}\right)}{\mu_1 \frac{r}{r_0}} \exp(-n_1^2 Fo)$$

Температура в любой точке шара, отстоящей от центра на расстоянии r , в момент времени τ равна

$$t = t_{\text{мвс}} (1 - \bar{\theta}) + t_0 \bar{\theta}$$

При разрушении горного массива, взаимодействующие элементы имеют сложную форму тел, неоднородность их теплофизических характеристик, сложный характер граничных и временных условий однозначности, поэтому оценить температурные поля аналитическим методом весьма сложно. Для решения таких задач, как правило, используют численные методы расчета температурных полей. При этом анализируемое тело делят на элементы, а рассматриваемый отрезок времени – на небольшие периоды. В течение каждого периода времени теплообмен между соседними элементами тела или между поверхностью тела и окружающей средой принимается стационарным. Составляя баланс теплоты для каждого элемента тепла, определяется изменение его тепловой функции за каждый отрезок времени. Последовательный расчет температуры всех элементов позволяет определить температурное поле исследуемого тела при нестационарном режиме.

Для построения математической модели нестационарного теплообмена неоднородного шара рассмотрим многослойный неоднородный шар радиуса r , состоящий из n слоев (рис. 1).



Δr - постоянная толщина слоя, r_{gi} - внутренний радиус, r_{ni} - наружный радиус;
 t_i^o - температура слоя, t_g^o - температура внутреннего слоя, t_n^o - температура внешнего слоя в момент времени τ ; ΔQ_n - количество тепла, получаемое слоем от внешнего слоя, ΔQ_g - количество тепла, получаемое слоем от внутреннего слоя, ΔQ_i - количество тепла в слое

Рисунок 1 - Принципиальная схема теплообмена в неоднородном шаре

Каждый i -й слой в момент времени τ характеризуется внутренним и наружным радиусами r_{gi} и $r_{gi} + \Delta r = r_{ni}$ соответственно (первый слой имеет внутренний

нулевой радиус), температурой t_i удельной теплоемкостью c_i , плотностью ρ_i , теплопроводностью λ_i , влажностью w_i , плотностью тепловыделения $f(c_i, e_i, t, p)$ (p – мощность источника тепловыделения), т.е. количеством тепла, выделяемым i -ым слоем в единицу времени на единицу объема.

Пусть α – коэффициент теплоотдачи к наружной среде для внешнего i -го слоя; $t_{мвс}$ – температура окружающей среды; $\tau_{общ}$ – общее время нагрева шара; τ – текущее время; Δt – величина временного шага; $n = t / \Delta t$ – число шагов расчета.

При увеличении числа разбиений на элементы (в данном случае на слои) точность решения увеличивается.

Рассмотрим задачу распространения тепла в данном шаре.

Пусть постоянная толщина слоя – $\Delta r = r/n$. Объем произвольного шарового слоя может быть определен, как

$$\Delta W_i = \frac{4}{3} \pi \left[(r_{\text{вн}} + \Delta r)^3 - r_{\text{вн}}^3 \right],$$

откуда

$$\Delta W_i = \frac{4}{3} \pi (\Delta r) \left[3r_{\text{вн}}(r_{\text{вн}} + \Delta r) + (\Delta r)^2 \right].$$

Площади внутренней сферы радиуса $r_{\text{вн}}$ и наружной радиуса $r_{\text{вн}} + \Delta r$ вычисляются по формулам

$$S_{\text{вн}} = 4\pi r_{\text{вн}}^2; \quad S_{\text{нв}} = 4\pi (r_{\text{вн}} + \Delta r)^2,$$

или после несложных преобразований

$$S_{\text{нв}} = 4\pi \left[r_{\text{вн}}^2 + 2r_{\text{вн}}(\Delta r) + (\Delta r)^2 \right].$$

Количество тепла, получаемое k -м слоем от внешнего слоя

$$\Delta Q_n = \frac{t_n - t_i}{\Delta r} \lambda_n S_{\text{нв}},$$

или

$$\Delta Q_n = 4\pi \lambda_n dt \left[\frac{r_{\text{вн}}^2}{\Delta r} + 2r_{\text{вн}} + \Delta r \right],$$

а для внутреннего

$$\Delta Q_{\text{в}} = \frac{t_i - t_{\text{в}}}{\Delta r} \lambda_{\text{в}} S_{\text{вн}}$$

или

$$\Delta Q_{\text{в}} = 4\pi \lambda_{\text{в}} dt \frac{r_{\text{вн}}^2}{\Delta r}.$$

Тогда изменение температуры слоя за время $\Delta\tau$ составит

$$dt = \frac{\Delta Q_e + \Delta Q_n + \Delta Q_i}{(\Delta W) c \rho} \Delta \tau$$

Исключив, без ущерба для точности, величины высшего порядка малости $(\Delta r^2)(\Delta\tau)$, $(\Delta r)^3$ и $(\Delta r)^4$, получим выражение представляющее собой изменение температуры слоя

$$dt = \frac{(\Delta r)(\Delta Q)(\Delta\tau)}{4\pi \left[c\rho(\Delta r)^2 r_{bi}^2 - \lambda_g r_{bi}^2 (\Delta\tau) - \lambda_n r_{bi}^2 (\Delta\tau) - 2\lambda_n r_{bi} (\Delta r)(\Delta\tau) \right]} \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение (1) решается известными способами [7, 8]. Результатом его решения является выражение

$$\tau = \frac{Q^2 \left[1 - 50,24 \cdot \lambda_n Q r (t - t_{mвс}) + 2524,06 \cdot \lambda_n^2 r^2 (t - t_{mвс}) \right]}{10096,23 \cdot \lambda_n^2 (t - t_{mвс})^2} - \left[803,84 \cdot \lambda_n r (t - t_{mвс}) - 32 \right] + 16 \cdot \ln \left[\frac{Q}{12,56 \cdot c\rho (t - t_{mвс})} - \frac{2 \cdot \lambda_n r}{c\rho} \right] \quad (2)$$

Количество подведенной энергии Q может быть определено, исходя из следующего.

Пусть барабан исполнительного органа радиуса r_u внедряется с угловой скоростью ω_u в газонасыщенный массив по некоторой поверхности, которую можно считать абсолютно твердой. При этом колесо прижимается с силой P , направленной вдоль радиуса колеса (рис. 2).

Под воздействием силы P резцы расположенные на поверхности барабана прижимаются к массиву, в результате чего возникает трение с искрообразованием и интенсивным тепловыделением.

Интенсивность тепловыделения q_s при трении, с единицы поверхности в единицу времени, определяется равенством

$$q_s = f_{mp} \nu_p P, \quad (3)$$

где f_{mp} – коэффициент трения; p – удельное контактное давление, обусловленное воздействием силы P ; ν_p – результирующая скорость, определяемая подачей комбайна и скоростью вращения барабана.

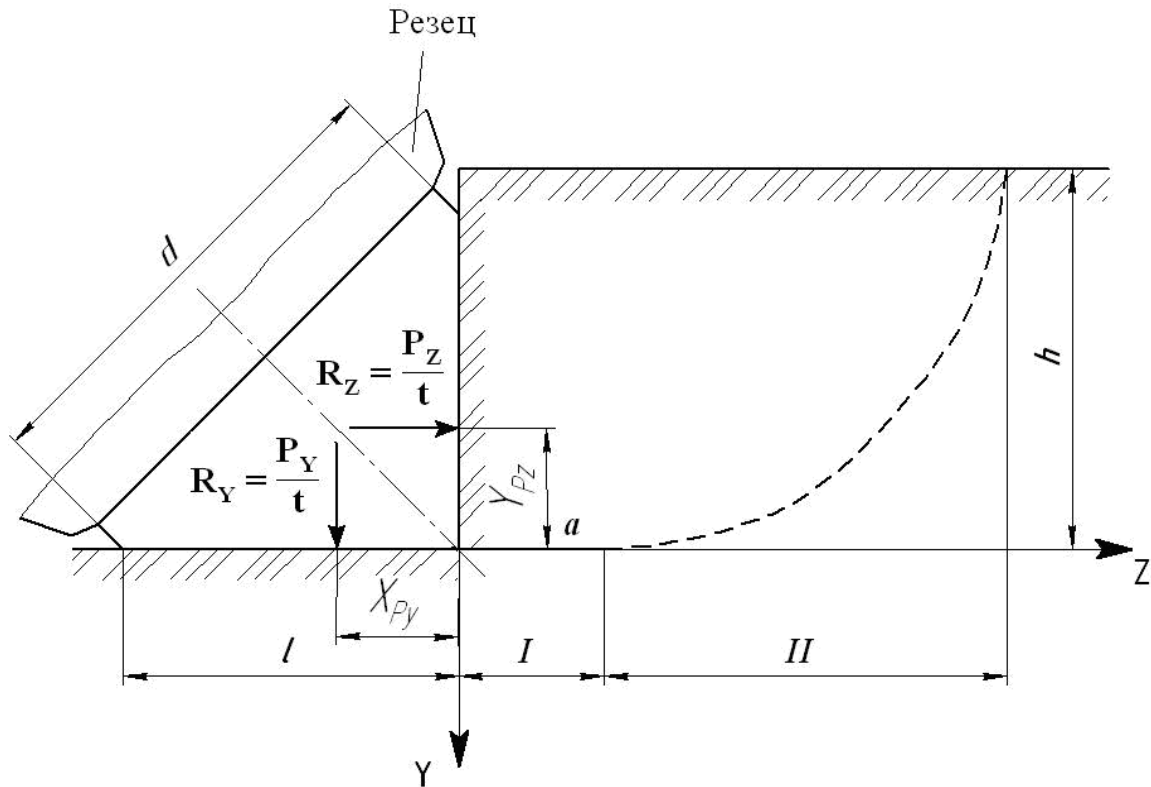
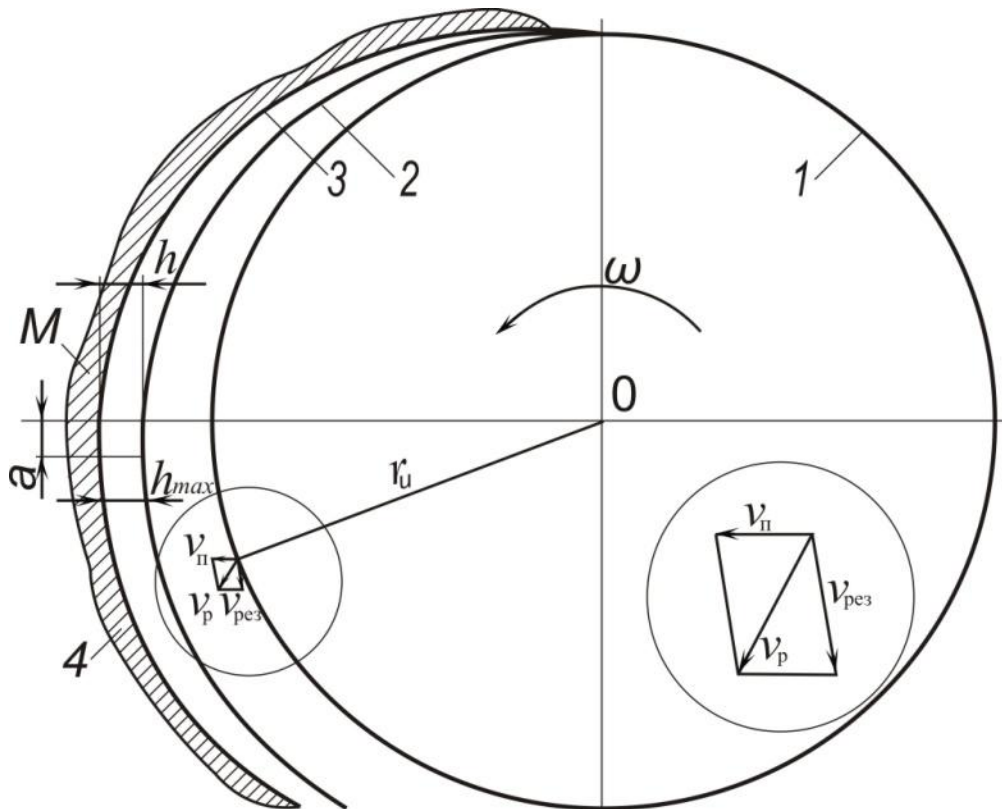


Рисунок 2 - Схема распределения усилий резания P_z и подачи P_y при нагружении массива горных пород режущим инструментом

По сравнению со скоростью резания, величина скорости подачи комбайна низкая, поэтому этим параметром можно пренебречь. Подача комбайна прижимает исполнительный орган к груди забоя, создавая при этом значительное статическое удельное контактное давление на конце резца. От величины скорости вращения исполнительного органа зависит величина кинетической энергии удара резца и эффективность разрушения. Поэтому при расчетах скорость подачи учитывается параметром p , а скорость резания линейной скоростью выраженной через угловую

$$v_p = v_{рез.} = \omega_u r_u \quad (4)$$

Непосредственно одновременно на забой воздействует половина резцов (от 20 до 30) [5], установленных на шнеке и через них вся мощность двигателей резания передается на разрушение массива, что позволяет судить о реальных нагрузках, испытываемых резцами. Максимальное давление на массив развивается резцами в различное время и в разных местах (места выпуклостей на груди забоя). Однако, в основном, наибольшее давление на массив развивается в местах наибольшего среза, т.е. при h_{max} (рис. 3).

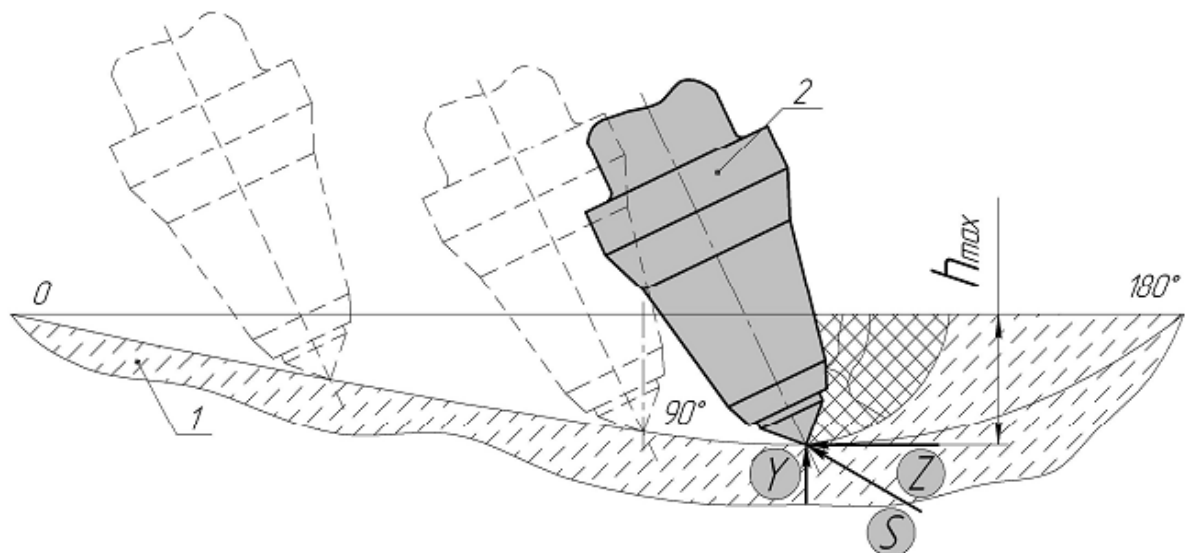


1 – траектория движения резцов при $v_{II} = 0$; 2, 3 – траектория вершин резцов при разрушении массива ($v_{II} \neq 0$); 4 – газонасыщенный массив; h – толщина стружки; v_{II} – скорость подачи; $v_{рез}$ – скорость резания; v_p – результирующая скорость; ω – угловая скорость; a – ордината точки с наибольшей толщиной стружки; r_u – радиус исполнительного органа комбайна (шнека)

Рисунок 3 - Кинематика перемещения режущего инструмента в призабойном пространстве

На рис. 4 показана схема сил, действующих на резец. Основными составляющими являются: сила сопротивления резанию Z , величина которой зависит от угловой скорости ω_u ; сила сопротивления подаче резца Y , зависящая от скорости подачи комбайна и создающая боковое усилие на резец. Все эти силы оказывают существенное влияние на величину трения при взаимодействии фрикционных пар (резец - газонасыщенный массив), а, следовательно, и на степень нагрева в области фактической площади касания этих пар.

Известно, что величины сил сопротивления и возникающей температуры при разрушении газонасыщенного массива в значительной степени зависят также от свойств пород входящих в состав массива.



1 - разрушаемая среда; 2 – режущий инструмент; Z – сопротивление резанию; Y – сопротивление подаче резца; S – результирующая сила

Рисунок 4 - Схема взаимодействия режущего инструмента с забоем:

Например, углы по сопротивляемости их резанию делятся на несколько категорий ($A = 110; 220; 330$ кН/м и т.д.), откуда следует, что максимальные значения сил p , действующих на резец при резании углей со стружкой от 2 до 14 см в указанном диапазоне сопротивляемости углей, находятся в диапазоне значений от 2 до 15 кН. Величину p можно определить по выражению

$$p = Ah_{max} \quad (5)$$

При дискретном контакте, источниками теплоты трения являются элементарные участки взаимодействующих фрикционных пар в области фактической площади касания [6], от которых теплота распространяется вглубь трущихся фрикционных пар и в окружающее пространство. Процесс возникновения и установления температуры на пятнах фактического контакта за время удара носит характер температурных вспышек, длящихся сотые доли секунды, максимальное значение которых может составлять тысячу и более градусов [3], в зависимости от подачи v_{II} и скорости $v_{рез}$.

Общее количество теплоты, выделяемое пятном контакта за период времени τ определяется с учетом и выражений (3), (4)

$$Q = \omega_u \tau r_u f_{mp} p \quad (6)$$

Наивысшая температура метановоздушной смеси достигается на поверхности пятна контакта.

Разницу между температурой окружающей метановоздушной среды $t_{мвс}$ и температурой на поверхности контакта фрикционных пар t можно представить

как приращение Δt полученное за счет трения.

С учетом вышеуказанного, выражения (6), а также того, что $\lambda_H = \lambda$, формула (2) примет вид

$$5 \cdot 10^{-3} \frac{\tau^3 (\omega_u r_u f_{mp} P)^3}{\Delta t \lambda} - 9,9 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\tau}{\Delta t} \right)^2 \left(\frac{\omega_u r_u f_{mp} P}{\lambda} \right)^2 - 0,25 \cdot \tau^2 (\omega_u r_u f_{mp} P)^2 r_u^2 + \tau =$$

$$= 32 - 803,84 \cdot \lambda r_u \Delta t - 16 \cdot \ln \left[\frac{\tau}{\Delta t} \frac{r_u}{c \rho} (0,08 \cdot \omega_u f_{mp} P - 2\lambda) \right] \quad (7)$$

Выражение (7) устанавливает взаимосвязь температуры нагрева метановоздушной смеси со скоростью резания исполнительного органа комбайна и коэффициентом трения резца о породу в процессе взаимодействия режущей поверхности отбойного органа с поверхностью газонасыщенного массива, учитывает ряд конструктивных особенностей исполнительного органа комбайна (радиус резания отбойного органа r_u , максимально возможную его конструктивную скорость резания v , теплопроводность метановоздушной смеси λ , а также нагрузку от исполнительного органа на грудь забоя P).

Так как $v_{рез.} = \omega_u r_u$ то равенство (7) с учетом (5) примет вид

$$5 \cdot 10^{-3} \frac{\tau^3 (v_{рез.} f_{mp} A h_{max})^3}{\Delta t \lambda} - 9,9 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\tau}{\Delta t} \right)^2 \left(\frac{v_{рез.} f_{mp} A h_{max}}{\lambda} \right)^2 - 0,25 \cdot \tau^2 (v_{рез.} f_{mp} A h_{max})^2 r_u^2 + \tau =$$

$$= 32 - 803,84 \cdot \lambda r_u \Delta t - 16 \cdot \ln \left[\frac{\tau}{\Delta t} \frac{r_u}{c \rho} \left(0,08 \cdot \frac{v_{рез.}}{r_u} f_{mp} A h_{max} - 2\lambda \right) \right] \quad (8)$$

Выводы. Температура на поверхности контакта фрикционных пар, образующейся при взаимодействии исполнительного органа комбайна с газонасыщенным массивом, значительно превышает температуру воспламенения метановоздушной смеси. При этом количества тепла, которое отдает поверхность контакта фрикционных пар в окружающую метановоздушную среду, может быть недостаточно для воспламенения горючей смеси в связи с необходимостью поддержания этого тепла в течение индукционного периода.

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

Разработана и теоретически обоснована математическая модель формализованного описания процесса передачи тепла в окружающую метановоздушную среду раскаленной поверхностью, образовавшейся при взаимодействии режущего инструмента исполнительного органа комбайна с разрушаемым газонасыщенным массивом горных пород, отличающаяся от известных тем, что учи-

тывает индукционные свойства метановоздушной среды и позволяет исследовать область опасных значений тепловых параметров удовлетворяющих условиям поджигания горючей смеси.

Для оценки влияния параметров разрушения газонасыщенного массива на его теплообмен с окружающей метановоздушной средой получена зависимость температуры нагрева метановоздушной смеси от скорости резания исполнительного органа комбайна и коэффициента трения резца о породу в процессе взаимодействия режущей поверхности отбойного органа с поверхностью газонасыщенного массива, учитывающая конструктивные особенности исполнительного органа комбайна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крестовоздвиженский, П.Д. Повышение прочности тангенциальных поворотных резцов горных очистных комбайнов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Крестовоздвиженский П.Д. – Новокузнецк: Кузбасский государственный технический университет, 2011. – 199 с.
2. Шевцов, Н.Р. Взрывозащита горных выработок (курс лекций): Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Н.Р. Шевцов. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 280 с.
3. Ткачук, С.П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / С.П. Ткачук, В.П. Колосюк, С.А. Ихно. – К.: Основа, 2000. – 694 с.
4. Софийский, К.К. Снижение газонасыщенности пологого угольного пласта i_3^1 гидродинамическим воздействием / К.К.Софийский, В.И.Гаврилов, В.В. Власенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – № 111. – С. 90 – 99.
5. Моисеенко, М. А. Математическое моделирование нестационарных температурных полей и напряжений в деталях дискового тормоза, обусловленных пульсирующим подводом тепловой мощности: автореф. дис... канд. техн. наук: 01.02.06 / Моисеенко М.А.. –Орел, 2012. – 20 с.
6. Справочник по триботехнике /Под общ. ред. М. Хебды, А. Чичинадзе. В 3т. Т.1. Теоретические основы. - М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
7. Davies, A.W. Investigation of a coal mine explosion and relevance of risk assessment / A.W.Davies, A.K.Isaac, P.M.Cook // Trans Inst Min Metall 109 (May-Aug)(Sect A), 2000. –p.61–69.

REFERENCES

1. Krestovozdvizhenskiy, P.D. (2011), “Increasing the strength of the tangential rotary cutters of mining shearers”, Ph.D. Thesis, Mining Machines, Kuzbass State Technical University, Novokuznetsk, Russia.
2. Shevtsov, N.R. (2002), *Vzryvozashchita gornykh vyrabotok (kurs lektsyy)* [Explosion protection of mine workings (lectures)], 2nd ed., Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine.
3. Tkachuk, S.P., Kolosyuk, V.P. and Ihno, S.A. (2000), *Vzryvopozharobezopasnost gornogo oborudovaniya* [Explosion and fire safety of mining equipment], Osнова, Kiev, Ukraine.
4. Sofiyskiy, K.K., Gavrilov, V.I. and Vlasenko, V.V. (2013), “Gas-saturation reduction in the flat coal seam i_3^1 by applying hydrodynamic impact”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 111, pp. 90 – 99.
5. Moiseenko, M.A. (2012), “Mathematical modeling of non-stationary temperature fields and stresses in parts of disc brake due to the pulsating application of thermal rating”, Abstract of Ph.D., Dynamics and strength of machines, devices and equipment, Orel, Russia.
6. Hebda, M. and Chichinadze, A. (1989), *Spravochnik po tribotehnike*, [Triboengineering handbook], in Hebda, M., Chichinadze, A. (ed.), V.1. The theoretical foundations, Mashinostroenie, Moscow, Russia.
7. Davies, A.W., Isaac, A.K., Cook, P.M. (2000), “Investigation of a coal mine explosion and relevance of risk assessment”, Trans Inst Min Metall 109 (May-Aug)(Sect A), pp. A61–A69.

Об авторах

Голинько Василий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэрологии и охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, golinko@nmu.org.ua.

Яворский Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подземной разработки месторождений Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, yavorskiyandrey@mail.ru.

Лебедев Яков Яковлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрологии и охраны труда Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, lebedev.1943@gmail.com.

Яворская Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрологии и охраны труда Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, lenayavorskay@mail.ru.

About the authors

Golinko Vasily Ivanovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Head of the Aerology and Labor Protection Department, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, golinko@nmu.org.ua.

Yavorsky Andrey Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of the Underground Mining Department, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, yavorskiyandrey@mail.ru.

Lebedev Yakov Yakovlevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of the Aerology and Labor Protection Department, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, lebedev.1943@gmail.com.

Yavorskaya Yelena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of the Aerology and Labor Protection Department, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, lenayavorskay@mail.ru.

Анотація. У статті наведено результати досліджень, спрямованих на підвищення рівня безпеки ведення гірничих робіт при руйнуванні газонасиченого масиву виконавчими органами видобувних і прохідницьких комбайнів. Визначена область ефективного використання заходів та засобів попередження вибухів пилометаноповітряних сумішей.

Розроблена і теоретично обґрунтована математична модель формалізованого опису процесу передачі тепла в навколишнє метаноповітряне середовище розпеченою поверхнею.

Отримано залежності для визначення кількості накопиченого тепла і відданого в навколишнє метаноповітряне середовище поверхнею взаємодії ріжучого інструмента з газонасичених масивом, а також для розрахунку часу передачі тепла горючої суміші, що дозволяють враховувати індукційні властивості метаноповітряного середовища.

Ключові слова: газонасичений масив, теплообмін, метан, різець.

Abstract. The article presents results of research on improving mining safety when gas-saturated rocks are broken by operating members of mining and tunneling machines. Fields of effective use of methods and means for preventing explosions of dust-methane-air mixtures are defined.

A mathematical model of formal description of heat transferring to the surrounding methane-air environment by hot surface was developed and theoretically substantiated.

Dependences were established to determine amount of heat accumulation and transfer to the surrounding methane-air environment by surface of interacting cutting tools with gas-saturated rocks, and to calculate duration of the heat transfer from combustible mixture with taking into account induction properties of the methane-air environment.

Keywords: gas-saturated rock, heat exchange, methane, cutter.

Стаття поступила в редакцію 23.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук М.С. Четвериком