

Анализ внезапного выброса газугольной смеси из полости конической формы, сформированной в процессе выброса

С.В. Черданцев✉, П.А. Шлапаков, К.С. Лебедев

АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Российская Федерация
✉ svch01@yandex.ru

Резюме: Непременными атрибутами при добыче угля подземным способом являются метан и угольная пыль различной дисперсности. При их смешивании образуются газугольные смеси, предрасположенные к различным опасным и особо опасным газодинамическим явлениям, в первую очередь к внезапным выбросам, сопровождающимся образованием полостей в угольном массиве и интенсивным выделением из них газугольных смесей в выработки. В статье рассматривается задача об одномерном стационарном течении газугольной смеси в подземной полости конусообразной формы, образующейся в процессе внезапного выброса. В качестве базовых уравнений используются уравнение движения Эйлера и уравнение неразрывности. В результате их преобразования получено обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, для которого сформулирована задача Коши. Решением задачи Коши является трансцендентное уравнение относительно искомого числа Маха. Корни трансцендентного уравнения вычислены с помощью математического программного пакета MathCAD. После нахождения чисел Маха определены остальные параметры смеси: давление, плотность и температура газугольной смеси в любой точке конической области, включая их критические значения. Построены графики, на основе которых установлены некоторые закономерности одномерного стационарного течения газугольной смеси в конической области. В частности, выявлено, что с ростом числа Маха параметры газугольной смеси нелинейно уменьшаются, а с увеличением показателя адиабаты Пуассона давление и температура уменьшаются, а плотность увеличивается.

Ключевые слова: горные выработки, угольный пласт, внезапные выбросы, газугольные смеси, уравнения газовой динамики, число Маха, критические параметры

Для цитирования: Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Лебедев К.С. Анализ внезапного выброса газугольной смеси из полости конической формы, сформированной в процессе выброса. *Горная промышленность*. 2023;(6):109–115. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-109-115>

Analysis of a sudden release of a gas-coal mixture from a conical cavity formed during the gas outburst

S.V. Cherdantsev✉, P.A. Shlapakov, K.S. Lebedev

Scientific Centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry JC (JC NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation
✉ svch01@yandex.ru

Abstract: Indispensable attributes in underground coal mining are methane and coal dust of various particle sizes. When they are mixed, coal-gas mixtures are formed, predisposed to various hazardous and extremely hazardous gas-dynamic phenomena, primarily to sudden emissions, accompanied by formation of cavities in the coal massif and intensive release of coal-gas mixtures from these cavities into the mine workings. The article deals with the problem of a one-dimensional stationary flow of a gas-coal mixture in an underground cone-shaped cavity formed during a sudden release. The Euler equation of motion and the continuity equation are used as the basic equations. As a result of their transformation, an ordinary differential equation of the first order is obtained, for which the Cauchy problem is formulated. The solution to the Cauchy problem is a transcendental equation with respect to the desired Mach numbers. The roots of the transcendental equation are calculated using the MathCAD mathematical software suite. Upon finding the Mach numbers, the remaining parameters of the mixture are determined, i.e. the pressure, density and temperature of the gas-coal mixture at any point in the conical region, including their critical values. Graphs are constructed that were used as the basis to establish some regularities of the one-dimensional stationary flow of a gas-coal mixture in a conical region. In particular, it was found that with an increase in the Mach number, parameters of the gas-coal mixture decrease non-linearly, and with an increase in the Poisson's adiabatic index, the pressure and temperature decrease, and the density increases.

Keywords: mining, coal seam, sudden emissions, coal gas mixtures, gas dynamics equations, Mach number, critical parameters

For citation: Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Lebedev K.S. Analysis of a sudden release of a gas-coal mixture from a conical cavity formed during the gas outburst. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):109–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-109-115>

Введение

Внезапные выбросы угля и газа в угольных шахтах происходят в течение многих десятилетий, практически во всех угледобывающих странах [1]. За этот период времени были накоплены и систематизированы многочисленные факты реализации внезапных выбросов. Однако к настоящему времени пока не создана единая теория внезапных выбросов угля и газа, описывающая их причинно-следственные связи протекания с единых методологических позиций.

Дело в том, что механизм внезапных выбросов очень сложен и обусловлен целым рядом сопряженных между собой явлений и факторов. По мнению ряда авторов [1–3], для корректного описания процесса внезапного выброса необходимо совместно сформулировать и найти решения, по крайней мере, трех задач. Первая из этих задач описывает фильтрацию газа в угольном пласте, вторая – рассматривает напряженно-деформированное состояние пласта, его разрушение вблизи забоя и образование подземных полостей и каверн. И, наконец, третья задача описывает особенности течения газозольного потока в образовавшейся полости и его последующего выброса. Особо отметим, что все эти задачи тесно связаны между собой.

В первую очередь необходимо учесть, что непосредственно перед выбросом угольный пласт в краевой части вследствие процессов разрушения и трещинообразования значительно увеличивает свою проницаемость. В этом случае формируется мощный фильтрационный поток свободного газа, содержащегося в порах и трещинах, направленный из пласта к угольному обнажению, а затем в горную выработку. Таким образом, чтобы установить параметры фильтрационного потока перед выбросом необходимо определить параметры трещиноватости в краевой части разрушающегося пласта. К сказанному добавим, что форму и размеры образующейся в результате выброса полости можно установить только в результате решения второй задачи о напряженно-деформированном состоянии пласта и лишь после этого можно рассмотреть третью задачу о течении газозольного потока внутри полости.

Обратим внимание, что все три указанные задачи в едином комплексе еще не обсуждались, ввиду очевидной сложности. Однако следует отметить ряд работ, которые внесли существенный вклад в решение каждой из этих задач.

Так, в статьях [4; 5] рассматриваются различные подходы к решению первой задачи. В частности, в статье [4] для описания геомеханических и физико-химических процессов в многофазных угольных пластах представлено так называемое аналитическое «операторное продолжение», связывающее между собой уравнение Ленгмюра и кинематическое уравнение для волн маятникового типа в напряженных геосредах. В статье [5] обсуждается математическая модель для описания фильтрации и диффузии свободного и сорбированного газа в угольном пласте. Рассмотрены ее асимптотические варианты, рассматриваю-

щие равновесное движение газа в порах при разных видах изотермы сорбции.

В рамках решения второй задачи отметим работы [6–8]. Например, в работе [6] показано, что выброс угля и газа осуществляется за счет энергии первоначально сжатого газа, заполняющего пространство между нераздробленными частицами угля и энергии сорбированного газа, способного к быстрому выделению из разрушенного угля. А в работах [7; 8] рассмотрена математическая модель породугольного массива, предрасположенного к внезапному выбросу. За критерий выброса угля и газа принято условие, при котором не выполняется равновесие части пласта, находящейся под действием давления метана и сил трения между угольным пластом и «слабым» слоем, критическая длина которого вычислена в работе [8].

Третья задача обсуждалась в работах [9–12]. В работах [9; 10] показано, что если подземная полость состоит из сужающейся и расширяющейся частей, то выброс газа из подземной полости может произойти со сверхзвуковой скоростью и образованием ударной волны в выработке [11]. В работе [12] показано, что объемная доля пылевидного угля в двухфазном потоке является существенным фактором, влияющим на процесс затухания ударной волны, обусловленной внезапным выбросом.

В данной статье обсуждается третья задача о внезапных выбросах в рамках следующих допущений:

- 1) течение газозольной смеси мы полагаем одномерным и стационарным;
- 2) если частицы угля пылевидные, то ввиду их малости мы пренебрегаем весом частиц и полагаем, что они и дальше будут двигаться со скоростью газового потока. Если же угольные частицы достаточно крупные, то кроме аэродинамических сил, на них действует сила тяжести, которая тормозит движение крупных частиц и быстро их останавливает, в то время как процесс истечения газа и пылевидных угольных частиц из полости продолжается еще некоторое время;

3) поскольку в работе рассматриваются только пылевидные частицы, то на основании второго допущения вместо двухкомпонентной смеси мы будем рассматривать однокомпонентную смесь, в силу чего газозольную смесь будем полагать идеальным, политропным газом.

Из второго допущения следует, что количество выброшенного угля составляет лишь часть от массы всего угля в зоне отжима, а количество выброшенного газа определяется его содержанием во всей зоне отжима, из которой он выйдет полностью за определенный промежуток времени. Поэтому объем газа значительно превышает объем крупных угольных частиц.

Анализ форм подземных полостей и каверн, представленных в монографии [1], позволяет аппроксимировать некоторые виды подземных полостей совокупностью двух-трех геометрических фигур. В этой связи в данной статье подземная полость, образующаяся в результате выброса, рассматривается как область, состоящая из двух частей,

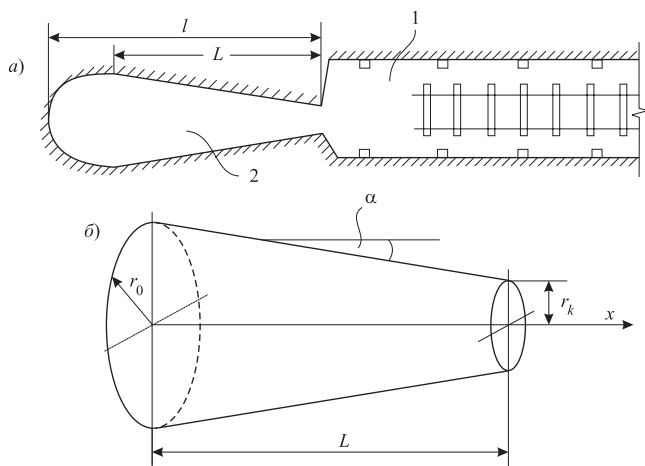


Рис. 1
Форма подземной полости, образовавшейся при внезапном выбросе угля и газа: 1 – горная выработка, 2 – подземная полость

Fig. 1
The shape of the underground cavity formed by sudden coal and gas release: 1 – a mine workings, 2 – an underground cavity

одна из которых имеет форму, близкую к полусфере, а вторая представляет собой круговой усеченный конус (рис. 1).

В процессе построения расчетной модели будем использовать аналогию между течением газа в подземной полости и течением в конфузоре энергетического сопла [13–15].

Постановка задачи о течении газозольной смеси внутри подземной полости

На основании первого и третьего допущений для описания течения газозольной смеси внутри подземной полости воспользуемся уравнением движения Эйлера и уравнением неразрывности. При стационарном, одномерном течении газа уравнение Эйлера имеет вид [13–15]

$$v \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}, \quad (1)$$

где v , ρ , p – скорость, плотность и давление газозольной смеси в полости; x – декартова координата (см. рис. 1).

Уравнение неразрывности запишем в следующем виде [13–15]:

$$\rho v S = \text{const}, \quad (2)$$

где S – площадь произвольного поперечного сечения полости, координата которого x .

Продифференцировав уравнение (2) по x и подставив в уравнение (1), имеем

$$\frac{v^2}{\rho} \frac{1}{a^2} \frac{dp}{dx} + \frac{v^2}{S} \frac{dS}{dx} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}. \quad (3)$$

В формуле (4), (3) величина a – является скоростью звука в газе, определяемая как [13]

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}, \quad (4)$$

где k – показатель адиабаты Пуассона. Поскольку величина $M = v/a$ является числом Маха, то равенство (3) сначала преобразуем к виду

$$(1 - M^2) \frac{dp}{dx} = \rho \frac{v^2}{S} \frac{dS}{dx}, \quad (5)$$

а затем с помощью (1) получим соотношение

$$(M^2 - 1) \frac{dv}{v} = \frac{dS}{S}. \quad (6)$$

Отметим, что уравнение (1) устанавливает зависимость между производными dv/dx и dp/dx , уравнение (5) связывает между собой производные dp/dx и dS/dx , а уравнение (6) устанавливает связь между dv/v и dS/S . Из анализа этих уравнений вытекают следующие выводы.

1. Если число Маха $M < 1$, то $1 - M^2 > 0$, и поэтому из уравнения (5) следует, что знаки производных dp/dx и dS/dx совпадают. Следовательно, если сечение полости S сужается ($dS/dx < 0$), то давление газозольной смеси падает ($dp/dx < 0$), а скорость, как это следует из уравнения (1), увеличивается ($dv/dx > 0$). Если же площадь S увеличивается ($dS/dx > 0$), то давление p тоже возрастает ($dp/dx > 0$), а скорость v уменьшается ($dv/dx < 0$).

2. Если $M < 1$, то величина $1 - M^2 < 0$, и, следовательно, знаки производных dp/dx и dS/dx будут противоположными. В силу этого, если сечение уменьшается ($dS/dx < 0$), то давление возрастает ($dp/dx > 0$), а скорость уменьшается ($dv/dx < 0$). Если же площадь увеличивается ($dS/dx > 0$), то давление падает ($dp/dx < 0$), а скорость – увеличивается ($dv/dx > 0$).

3. Если $M = 1$, то $1 - M^2 = 0$, и из уравнения (5) следует, что в некоторой точке x производная $dS/dx = 0$, и поэтому площадь сечения S в этой точке имеет экстремальное значение.

Из уравнения (6) следует, что если $M < 1$, то приращение скорости потока сопровождается уменьшением площади полости, а при $M > 1$, наоборот, рост скорости потока возможен только при увеличении сечения полости. Поэтому в точке $x = x_{кр}$ значение площади сечения полости должно быть минимальным – $S = S_{\min}$. При этом условии скорость газозольного потока в точке $x = x_{кр}$ становится равной скорости звука ($M = 1$), в связи с чем ее называют критической скоростью $v = v_{кр} = a_{кр}$, а сечение S_{\min} называют соответственно критическим сечением $S_{кр}$.

Таким образом, чтобы получить сверхзвуковую скорость смеси, необходимо наличие в подземной полости трех элементов: суживающейся части (конфузора), горловины, в которой площадь $S = S_{\min}$, и расширяющейся части (диффузора). Именно так и устроены энергетические сопла, предназначенные для получения потоков со сверхзвуковыми скоростями [13–15].

Решение задачи о течении газозольной смеси внутри подземной полости конической формы

Для получения количественных оценок воспользуемся уравнением Бернулли [13]

$$\frac{v^2}{2} + \frac{a^2}{k-1} = \frac{a_0^2}{k-1}, \quad (7)$$

где a_0 – скорость звука в покоящемся газе.

Продифференцировав уравнение (7) и выполнив преобразования, получим равенство

$$\frac{dv}{v} = \frac{dM}{M \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)}, \quad (8)$$

связывающее скорость течения газа с числом Маха и показателем адиабаты Пуассона.

Найденное из формулы (8) отношение dv/v подставляем в (6) и после преобразования приходим к дифференциальному уравнению

$$\frac{2(M^2 - 1)}{2 + M^2(k - 1)} \frac{dM}{M} = \frac{dS}{S}, \quad (9)$$

в котором переменные разделены. Поскольку область течения газозольной смеси представляет собой круговой усеченный конус, то

$$S = \pi r^2; \quad dS = 2\pi r dr,$$

и тогда уравнение (9) приводится к виду

$$\frac{(M^2 - 1)dM}{2M + M^3(k - 1)} = \frac{dr}{r}. \quad (10)$$

Если на выходе смеси из конической полости $M = 1$, то имеет место следующее условие:

$$M|_{r=r_k} = 1, \quad (11)$$

где r_k – радиус малого поперечного сечения конической полости.

Условие (11) можно рассматривать в качестве граничного условия для уравнения (10), в силу чего уравнение (10) и граничное условие (11) представляют собой задачу Коши.

Поскольку в уравнении (10) переменные разделены, то, интегрируя его и учитывая условие (11), имеем

$$M^{-2(k-1)} [2 + M^2(k - 1)]^2 k = (C \cdot r)^{4(k-1)}. \quad (12)$$

Подставляя условие (11) в (12), приходим к уравнению

$$(k + 1)^2 k = (C \cdot r_k)^{4(k-1)},$$

из которого находим постоянную интегрирования

$$C = \frac{1}{r_k} \left[(k + 1)^2 k \right]^{1/4(k-1)}. \quad (13)$$

Поскольку полость имеет форму усеченного конуса, то между текущим радиусом поперечного сечения r и координатой x имеет место следующее соотношение:

$$r = r_k + (L - x) \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (14)$$

содержащее радиус выходного сечения полости r_k , ее длину L и угол конусности α .

Подставив формулу (14) в равенство (12), получим уравнение

$$M^{-2(k-1)} [2 + M^2(k - 1)]^2 k = \left\{ C [r_k + (L - x) \operatorname{tg} \alpha] \right\}^{4(k-1)}, \quad (15)$$

левая часть которого зависит только от числа Маха, а правая – только от координаты x . Поэтому для отыскания решения уравнения (15) мы поступим следующим образом. Вначале вычислим в ряде точек $x = 0, 1, 2, \dots, 10$ м значения функции

$$X(x) = \left\{ C [r_k + (L - x) \operatorname{tg} \alpha] \right\}^{4(k-1)}, \quad (16)$$

представляющей собой правую часть уравнения (15).

Затем, подставив найденные значения $X(x)$ в (15), получим уравнение

$$M^{-2(k-1)} [2 + M^2(k - 1)]^2 k = X(x) \quad (17)$$

относительного искомого числа Маха. Количество уравнений (17) соответствует количеству выбранных точек x .

Поскольку уравнение (17) трансцендентное, то найти его решение в замкнутом виде невозможно. Поэтому в данной работе использовался математический программный пакет MathCAD, в котором решение уравнения найдено численно с использованием связки функций Given–Find. Так, например, при $k = 1,4$; $\alpha = 5^\circ$; $r_k = 0,5$ м; $L = 10$ м числа Маха, найденные из уравнения (17) в точках $x = 0; 2; 8$ м, оказались равными соответственно $M = 0,084; 0,111; 0,373$.

Чтобы найти давление, плотность, температуру и скорость газозольной смеси, воспользуемся уравнением Бернулли (7), из которого с помощью формулы (4), получим соотношение

$$\frac{p_0}{\rho_0} \frac{\rho}{p} = \frac{k-1}{2} M^2 + 1. \quad (18)$$

Поскольку согласно четвертому допущению газ политропный, то, учитывая формулу адиабаты Пуассона [13]

$$p = D \rho^k, \quad (19)$$

где D – некоторая постоянная величина, после преобразования сначала получим формулу для определения давления газозольной смеси в конической части подземной полости

$$\frac{p}{p_0} = \bar{p} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{-k/(k-1)}, \quad (20)$$

а затем и формулу для плотности газа

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \bar{\rho} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{-1/(k-1)}. \quad (21)$$

Учитывая уравнение Менделеева–Клапейрона $\frac{p}{\rho} = RT$ и принимая во внимание, что скорость звука в газе может быть определена по формуле $a = \sqrt{kRT}$, находим относительную температуру газозольной смеси

$$\frac{T}{T_0} = \bar{T} = \frac{2}{2 + (k-1)M^2}. \quad (22)$$

Из уравнения Бернулли и формул (20), (21) нетрудно получить формулу для скорости истечения газа из подземной полости

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[1 - \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{-1} \right]}, \quad (23)$$

где \bar{v} – скорость газозольной смеси, отнесенная к скорости звука в покоящемся газе a_0 , т.е.

$$\bar{v} = v / a_0, \quad (24)$$

откуда получаем формулу

$$a = \frac{\bar{v} \cdot a_0}{M} \quad (25)$$

для определения скорости звука a в произвольном сечении конической области.

Анализ полученных результатов

Вышеприведенные рассуждения позволяют нам составить алгоритм вычисления искомых параметров газозольной смеси вдоль конической части подземной полости, который представляется в следующем виде.

Вначале разбиваем длину L конической полости точками x_i на n участков. В каждой точке x_i определяем значение функции $X(x_i)$ по формуле (16), затем отыскиваем решение трансцендентного уравнения (17), корнями которого являются числа Маха M_i . Для каждого числа M_i по формулам (20) – (23), (25) вычисляем соответственно давление \bar{p}_i , плотность $\bar{\rho}_i$, температуру \bar{T}_i , скорость \bar{v}_i газозольной смеси и скорость звука в ней a_i . По вычисленным значениям можно построить графики искомых параметров смеси.

В данной статье вычислительные процедуры выполнены при исходных данных, указанных ранее. На рис. 2 показаны графики некоторых параметров газозольной смеси вдоль конической части подземной полости.

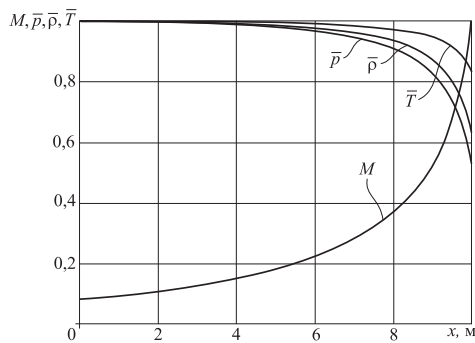


Рис. 2
Распределение параметров газозольной смеси вдоль продольной оси полости

Fig. 2
Distribution of the gas-coal mixture parameters along the longitudinal axis of the cavity

Анализируя представленные графики, замечаем, что на выходе из полости (в точке $x = 10$ м) число Маха достигает единицы и, следовательно, скорость газозольной смеси имеет критическое значение. Функция $M(x)$ на рассматриваемом участке $x \in [0; 10\text{м}]$ всюду монотонно растет, а ее график представляет собой сильно вогнутую кривую. Напротив, функции $\bar{p}(x)$, $\bar{\rho}(x)$, $\bar{T}(x)$, на участке $x \in [0; 10\text{м}]$ монотонно уменьшаются, особенно при значениях $x > 8$ м, а их графики являются выпуклыми кривыми.

Обратим внимание, что искомые параметры газозольной смеси являются функциями числа Маха и показателя адиабаты Пуассона. Их графики показаны на рис. 3, а и 3, б.

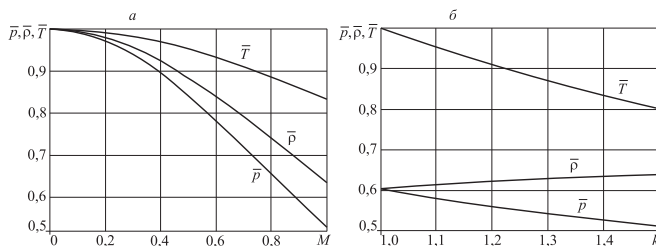


Рис. 3
Графики зависимостей параметров смеси от числа Маха при $k = 1,4$ (а) и графики зависимостей параметров смеси от показателя адиабаты k при $M = 1$ (б)

Fig. 3
Graphs of the mixture parameters dependence on the Mach number at $k = 1,4$ (а) and graphs of the mixture parameters dependence on the adiabatic index k at $M = 1$ (б)

Анализируя графики на рис. 3, а, замечаем, что они качественно схожи, поскольку на рассматриваемом отрезке $M \in [0; 1]$ все графики выпуклы и монотонно убывают, причем особенно интенсивно убывает функция $\bar{p}(M)$, характеризующая давление газозольной смеси. Графики функций $\bar{p}(k)$, $\bar{\rho}(k)$, $\bar{T}(k)$, показанные на рис. 3, б, построены при $M = 1$. Анализ графиков показывает, что на рассматриваемом отрезке $k \in [1; 1,5]$ функция $\bar{p}(k)$ монотонно уменьшается, а ее график представляет собой прямую линию. Напротив, функция $\bar{\rho}(k)$ монотонно возрастает, но ее график также является прямой линией. График же функции $\bar{T}(k)$ представляет слабо вогнутую кривую, характеризующую монотонное убывание функции.

Приведенный анализ графиков на рис. 2, 3, а и 3, б показывает, что с увеличением числа Маха давление, плотность и температура газозольной смеси нелинейно уменьшаются, причем особенно сильно – давление. С увеличением же показателя адиабаты Пуассона k уменьшаются только давление и температура, а плотность, наоборот, увеличивается.

Подставив в формулы (20) – (23) значение числа Маха $M = 1$, определим сначала критические параметры газозольной смеси:

$$p_{kp} = p_0 \left(1 + \frac{k-1}{2}\right)^{-k/(k-1)}, \quad \rho_{kp} = \rho_0 \left(1 + \frac{k-1}{2}\right)^{-1/(k-1)},$$

$$T_{kp} = T_0 \frac{2}{k+1}, \quad v_{kp} = a_{kp} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k+1}},$$

а затем по формуле (2) вычислим массу газозольной смеси Q_{kp} в процессе выброса из подземной полости в горную выработку

$$Q_{kp} = \rho_{kp} v_{kp} S_{kp} = \rho_0 \left(1 + \frac{k-1}{2}\right)^{-1/(k-1)} \cdot a_0 \sqrt{\frac{2}{k+1}} \cdot \pi r_{kp}^2 = \rho_0 a_0 \pi r_{kp}^2 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/[2(k-1)]} \quad (26)$$

Из формулы (26) видно, что масса смеси, выброшенной из подземной полости, зависит только от состояния смеси внутри полости и не зависит от параметров смеси вне полости.

Заключение

- Основные результаты работы сводятся к следующему:
 - сформулирована задача, описывающая одномерное, стационарное течение газозольной смеси в подземной полости конической формы;
 - в процессе построения решения сформулированной задачи получено трансцендентное уравнение относительно числа Маха, корни которого вычислены с помощью математического программного пакета MathCAD;
 - найденные числа Маха позволили определить основные параметры газозольной смеси: давление, плотность, температуру, в том числе и критические их значения;
 - по вычисленным значениям параметров построены их графики вдоль продольной оси полости, а также в зави-

симости от значения числа Маха и показателя адиабаты Пуассона. Анализ графиков позволил установить:

а) числа Маха на участке $x \in [0; L]$ всюду монотонно возрастают, а давление, плотность и температура, наоборот, монотонно уменьшаются, особенно заметно при $x > 8$ м;

б) с увеличением числа Маха давление, плотность и температура смеси нелинейно уменьшаются, причем особенно сильно уменьшается давление. С увеличением же показателя адиабаты Пуассона k уменьшаются только давление и температура, а плотность увеличивается.

Список литературы

1. Ходот В.В. *Внезапные выбросы угля и газа*. М.: Госгортехиздат; 1961. 363 с.
2. Христианович С.А. Распределение давления газа вблизи движущейся свободной поверхности угля. *Известия АН СССР*. 1953;(12):1673–1678.
3. Трофимов В.А. Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(S1):391–405.
4. Oparin V.N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams. *Journal of Mining Science*. 2018;53(2):201–215. <https://doi.org/10.1134/S1062739117022031>
5. Fedorov A.V., Fedorchenko I.A. Mathematical modeling of methane flow in coal beds. *Journal of Mining Science*. 2009;45(1):9–21. <https://doi.org/10.1007/s10913-009-0002-0>
6. Fedorov A.V. Shock wave in a coal bed under nonuniform desorption. *Journal of Mining Science*. 2014;50(1):38–42. <https://doi.org/10.1134/S1062739114010062>
7. Черданцев Н.В., Черданцев С.В., Зыков В.С. Моделирование геомеханического состояния породного массива, вмещающего выработку и дизъюнктивное нарушение. *Маркшейдерский вестник*. 2017;(3):51–55.
8. Черданцев Н.В. Результаты численного решения уравнений предельного состояния краевой зоны пласта и их аппроксимация полиномами. *Безопасность труда в промышленности*. 2019;(6):7–13. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-6-7-13>
9. Черданцев С.В., Черданцев Н.В., Ли Х.У., Лебедев К.С., Ли К.Х., Хаймин С.А. Определение параметров суфлярных выделений газа из угольного пласта в горные выработки. *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2017;(1):26–33.
10. Черданцев Н.В., Черданцев С.В., Ли Х.У., Филатов Ю.М., Шлапаков П.А., Лебедев К.С. Об одном подходе к описанию суфлярных выделений газа из резервуаров угольного массива в горные выработки. *Безопасность труда в промышленности*. 2017;(3):45–52. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-3-45-52>
11. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Потапов П.В., Голоскоков С.И., Лебедев К.С., Шлапаков Е.А. Математическое моделирование процесса формирования и выброса смеси «газ-уголь» в горные выработки. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2021;(3):40–52. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.31.51.005>
12. Zhou A.T., Wang K., Oparin V.N. Regularities of two-phase gas flow under coal and gas outbursts in mines. *Journal of Mining Science*. 2018;53(3):533–543. <https://doi.org/10.1134/S1062739117032476>
13. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. *Газовая динамика сопел*. М.: Наука; 1990. 368 с.
14. Ilakkiya S., Sridhar B.T.N. Study of decay, spread, and shock structure of a supersonic jet issuing from a C-D nozzle with semi-circular grooves. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2022;29(3):327–346. <https://doi.org/10.1134/S0869864322030027>
15. Gromyko Yu.V., Tsyryulnikov I.S., Maslov A.A. Development of a method for determining flow parameters in impulse wind tunnels. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2022;29(5):659–672. <https://doi.org/10.1134/S0869864322050043>

References

1. Khodot V.V. *Sudden emissions of coal and gas*. Moscow: Gosgortehizdat; 1961. 363 p. (In Russ.)
2. Khristianovich S.A. Distribution of gas pressure near the moving free surface of coal. *Izvestiya AN SSSR*. 1953;(12):1673–1678. (In Russ.)
3. Trofimov V.A. Sudden release of coal and gas. Removal of coal and gas into the developed space. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(S1):391–405. (In Russ.)
4. Oparin V.N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams. *Journal of Mining Science*. 2018;53(2):201–215. <https://doi.org/10.1134/S1062739117022031>
5. Fedorov A.V., Fedorchenko I.A. Mathematical modeling of methane flow in coal beds. *Journal of Mining Science*. 2009;45(1):9–21. <https://doi.org/10.1007/s10913-009-0002-0>

6. Fedorov A.V. Shock wave in a coal bed under nonuniform desorption. *Journal of Mining Science*. 2014;50(1):38–42. <https://doi.org/10.1134/S1062739114010062>
7. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V., Zykov V.S. Modeling of the geomechanical state of the rock mass, including the development and disjunctive dislocation. *Mine Surveying Bulletin*. 2017;(3):51–55. (In Russ.)
8. Cherdantsev N.V. The results of the numerical solution of the equations of the limit state of the seam marginal zone and their approximation by the polynoms. *Occupational Safety in Industry*. 2019;(6):7–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-6-7-13>
9. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V., Li Kh.U., Lebedev K.S., Lee K.H., Khaymin S.A. Determination of gas blowing emission parameters from coal massif into mine openings. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2017;(1):26–33. (In Russ.)
10. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V., Lee Kh.U., Filatov Yu.M., Shlapakov P.A., Lebedev K.S. About one approach to the description of blow of methane from the coal massif to the mine workings. *Occupational Safety in Industry*. 2017;(3):45–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-3-45-52>
11. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Potapov P.V., Goloskokov S.I., Lebedev K.S., Shlapakov E.A. Mathematical modeling of the process of formation and discharge of the gas-coal mixture into mining works. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2021;(3):40–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.31.51.005>
12. Zhou A.T., Wang K., Oparin V.N. Regularities of two-phase gas flow under coal and gas outbursts in mines. *Journal of Mining Science*. 2018;53(3):533–543. <https://doi.org/10.1134/S1062739117032476>
13. Pirumov U.G., Roslyakov G.S. *Gas dynamics of nozzles*. Moscow: Nauka; 1990. 368 p. (In Russ.)
14. Ilakkiya S., Sridhar B.T.N. Study of decay, spread, and shock structure of a supersonic jet issuing from a C-D nozzle with semi-circular grooves. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2022;29(3):327–346. <https://doi.org/10.1134/S0869864322030027>
15. Gromyko Yu.V., Tsyryulnikov I.S., Maslov A.A. Development of a method for determining flow parameters in impulse wind tunnels. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2022;29(5):659–672. <https://doi.org/10.1134/S0869864322050043>

Информация об авторах

Черданцев Сергей Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: svch01@yandex.ru

Шлапаков Павел Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: shlapak1978@mail.ru

Лебедев Кирилл Сергеевич – старший научный сотрудник, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: lebedevks1987@yandex.ru

Information about the authors

Sergei V. Cherdantsev – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Scientific Centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry JC (JC NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: svch01@yandex.ru

Pavel A. Shlapakov – Can. Sci. (Eng.), Laboratory Head, Scientific Centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry JC (JC NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: shlapak1978@mail.ru

Kirill S. Lebedev – Senior Researcher, Scientific Centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry JC (JC NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: lebedevks1987@yandex.ru

Article info

Received: 21.09.2023

Revised: 24.10.2023

Accepted: 03.11.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.09.2023

Поступила после рецензирования: 24.10.2023

Принята к публикации: 03.11.2023