

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.18.86.007

УДК 622.272:516.02

© С. В. Черданцев, П. А. Шлапаков, К. С. Лебедев, В. В. Колыхалов, Е. А. Шлапаков,  
С. А. Хаймин, А. Ю. Ерастов, 2023

**С.В. ЧЕРДАНЦЕВ**

д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: svch01@yandex.ru



**П.А. ШЛАПАКОВ**

канд. техн. наук,  
заведующий лабораторией  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: shlapak1978@mail.ru



**К.С. ЛЕБЕДЕВ**

старший научный сотрудник  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: lebedevks1987@yandex.ru



**В.В. КОЛЫХАЛОВ**

старший научный сотрудник  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: X77kem@mail.ru



**Е.А. ШЛАПАКОВ**

научный сотрудник  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: lairxx@yandex.ru



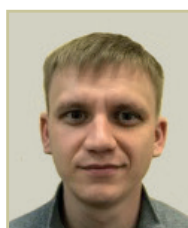
**С.А. ХАЙМИН**

старший научный сотрудник  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: hsa007@mail.ru



**А.Ю. ЕРАСТОВ**

старший научный сотрудник  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: eractov\_a\_y@mail.ru



## ТЕЧЕНИЕ ГАЗОУГОЛЬНОЙ СМЕСИ В ПОДЗЕМНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ, ОБРАЗОВАВШЕЙСЯ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ВЫБРОСЕ

К числу особо опасных явлений при разработке угольных месторождений подземным способом относятся внезапные выбросы угля, породы и газа, сопровождающиеся образованием полостей в угольном массиве и интенсивным выделением из них газоугольных смесей в горные выработки. В рамках принятых в статье допущений о вязких свойствах газоугольной смеси рассмотрена задача о её одномерном стационарном течении в подземной полости цилиндрической формы, образующейся в процессе внезапного выброса. На базе уравнения движения вязкого газа и уравнения неразрывности сформулирована задача Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка. В результате решения задачи Коши получено трансцендентное уравнение относительно приведенной скорости. Корни трансцендентного уравнения найдены с помощью программного пакета MathCAD. Найденная приведенная скорость позволила определить основные параметры смеси: давление, плотность, температуру и приведенный расход газоугольной смеси в различных поперечных сечениях подземной полости. Построены графики, на основе которых выявлен ряд закономерностей одномерного стационарного течения вязкой газоугольной смеси в цилиндрической области.

Ключевые слова: ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ВНЕЗАПНЫЕ ВЫБРОСЫ, ГАЗОУГОЛЬНЫЕ СМЕСИ, УРАВНЕНИЯ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ, ПРИВЕДЕННАЯ СКОРОСТЬ, ПРИВЕДЕННЫЙ РАСХОД.

### ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях, разрабатывающих угольные месторождения подземным способом, регулярно проявляются негативные факторы, существенно сдерживающие добычу угля. К числу таких факторов относятся различные газодинамические процессы, в первую очередь, внезапные выбросы угля, пород и газа [1, 2]. И хотя к настоящему времени накоплены и систематизированы многочисленные факты реализации внезапных выбросов, разработаны их различные физические модели, единая теория, описывающая причинно-следственные связи протекания внезапных выбросов с единых методологических позиций, пока не создана.

Известно, что в основе механизма внезапных выбросов лежит целый ряд взаимосвязанных между собой явлений и факторов. Ряд авторов [3, 4] обоснованно утверждает, что для объективного описания внезапных выбросов следует найти решения трех взаимосвязанных между собой задач. Решение первой из этих задач описывает фильтрацию газа в угольном пласте, вторая — исследует

напряженно-деформированное состояние пласта, условия его разрушения и образование подземных полостей, в которых скапливается газ. Картину выбросов и течения газоугольных потоков в образовавшихся полостях описывает третья задача.

Особо отметим, что в едином комплексе эти задачи еще не рассматривались. Вместе с тем, каждая из указанных задач в отдельности подробно обсуждалась, что внесло значительный вклад в решение проблемы внезапных выбросов на угольных предприятиях.

В первую очередь, отметим работы [5, 6]. В частности, в работе [5] рассматриваются геомеханические и физико-химические процессы в многофазных угольных пластах на базе аналитического «операторного продолжения», связывающего уравнение Ленгмюра и кинематическое уравнение для волн маятникового типа. В статье [6] представлена математическая модель и ее асимптотические варианты для описания фильтрации и диффузии свободного и сорбированного газа в угольных пластах при разных видах изотермы сорбции.

В работе [7] показано, что выброс угля и газа осуществляется за счет энергии первоначально сжатого газа, заполняющего пространство между нераздробленными частицами угля и энергии сорбированного газа. В статье [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. В работе [9] сформулированы условия возникновения газодинамических явлений, проявляющихся в форме образования сначала магистральной трещины в пласте со свободным метаном, затем формированием в нем волны дробления с последующим выбросом в выработку перемишки и смеси раздробленного угля и газа.

В работе [10] показано, что если подземная полость состоит из сужающейся и расширяющейся частей, то выброс газа из полости может произойти со сверхзвуковой скоростью и образованием ударной волны в выработке [11].

На основе многочисленных натуральных измерений в работе [12] выявлены отличительные особенности в формировании выбросоопасного состояния угольного массива в очистных забоях по сравнению с забоями подготовительных пластовых выработок. В работе описаны условия и уточнен механизм внезапных выбросов угля и газа в очистных забоях угольных шахт, а в статье [13] приведена статистика внезапных выбросов на угольных шахтах России и сформулирована

концепция возникновения внезапного выброса угля и газа в очистном забое.

В данной статье обсуждается задача о внезапном выбросе при следующих допущениях:

1) после внезапного выброса на крупные фракции угля кроме аэродинамических сил действует сила тяжести, которая тормозит движение крупных фракций и быстро их останавливает;

2) в совместном течении газа и угольных частиц участвуют только пылевидные частицы, которые, ввиду малости, будут двигаться со скоростью газа. В связи с этим совокупность газа и пылевидных угольных частиц в статье будем считать однокомпонентной политропной газугольной смесью;

3) газугольная смесь является вязким газом, течение которой мы полагаем одномерным и стационарным.

Из первых двух допущений следует, что масса выброшенного угля составляет лишь часть от массы всего угля в зоне выброса, а масса выброшенного газа определяется его содержанием во всей зоне выброса. Следовательно, объем газа значительно превышает объем крупных угольных фракций. Поэтому после выброса крупных фракций угля процесс истечения газугольной смеси из образовавшейся подземной полости будет продолжаться еще некоторое время.

Из анализа форм подземных полостей и каверн [1, 2], вытекает, что подземные полости можно представить в виде совокупности нескольких геометрических фигур. В данной статье рассматривается подземная полость, состоящая из двух частей, в одной из которых находится покоящийся газ, а по второй части, имеющей форму цилиндра, газ начинает движение в сторону выработки (рис. 1).

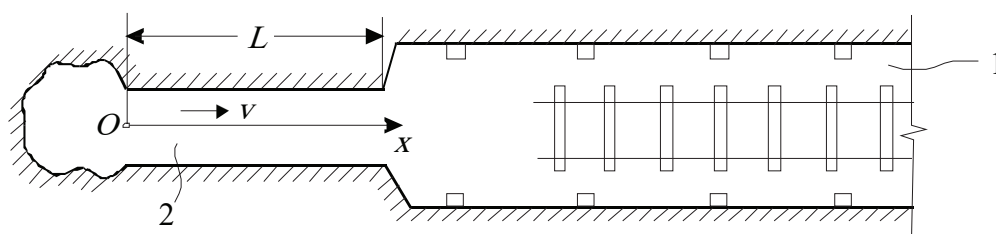


Рис. 1. Форма подземной полости, образовавшейся при внезапном выбросе угля и газа; 1 — горная выработка, 2 — подземная полость.

## ПОСТАНОВКА И ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ ГАЗА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ

Адиабатическое течение газа является предельной идеальной схемой. Для его описания в трубах, соплах и насадках часто используется одномерное стационарное уравнение Эйлера [14]:

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

где  $v$ ,  $\rho$ ,  $p$  — скорость, плотность и давление газозольной смеси в полости;  $x$  — декартова координата (рис. 1).

В реальных условиях необходимо учитывать вязкие и теплопроводные свойства газа. При расчете коротких труб, сопел и диффузоров почти всегда можно пренебрегать теплопередачей.

В частности, для вязких нетеплопроводных жидкостей и газов в правую часть уравнения (1) следует добавить силу сопротивления, отнесенную к единице массы газа в выработке, определяемую по формуле [15]:

$$f = \zeta \cdot \frac{v^2}{2D}, \quad (2)$$

где  $D$  — диаметр подземной полости, а величина  $\zeta$  представляет собой коэффициент сопротивления полости, который в общем случае зависит от числа Рейнольдса  $Re$ , числа Маха  $M$  и показателя адиабаты Пуассона  $k$ .

Однако, если перепад давления вдоль полости невелик, то изменение температуры газа вдоль продольной оси полости будет также небольшим и, следовательно, не будет оказывать существенного влияния на течение газа. В этом случае коэффициент сопротивления  $\zeta$  не зависит от числа Маха  $M$  и показателя адиабаты Пуассона  $k$ , а зависит только от числа Рейнольдса  $Re$ , являясь его функцией [15]:

$$\zeta = \zeta(Re)$$

Подставив формулу (2) в уравнение (1), получим уравнение:

$$v dv = -\frac{1}{\rho} dp - \zeta(Re) \frac{v^2}{2D} dx, \quad (3)$$

описывающее одномерное течение вязкого нетеплопроводного газа.

Далее воспользуемся уравнением неразрывности [14]:

$$Q = S \rho v = \text{const}, \quad (4)$$

выражающий закон сохранения массы газа  $Q$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения цилиндрической полости и уравнением Бернулли [14]:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} = \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0}, \quad (5)$$

в котором  $p_0$ ,  $\rho_0$  — соответственно давление и плотность в покоящейся смеси.

Учитывая, что скорость звука  $a_0$  в покоящейся смеси может быть определена по одной из ниже приведенных формул [14]

$$a_0 = \sqrt{k \frac{p_0}{\rho_0}}, \quad a_0 = \sqrt{kRT_0}, \quad (6)$$

где  $R = 287$  Дж/(кг·К) — газовая постоянная;  $T_0$  — температура в покоящейся смеси и учитывая соотношение [14]:

$$\frac{a_{kp}}{a_0} = \sqrt{\frac{2}{k+1}}, \quad (7)$$

Перепишем уравнение (5) следующим образом:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} = \frac{a_{kp}^2 (k+1)}{2(k-1)}, \quad (8)$$

где  $a_{kp}$  — критическая скорость звука, когда она становится равной скорости течения смеси  $v_{kp}$ .

Из уравнения (4) выразим плотность:

$$\rho = \frac{Q}{S \cdot v} = \frac{Q}{S \cdot a_{kp} \cdot \lambda}, \quad (9)$$

а из уравнения (8) найдем давление смеси:

$$p = \rho \frac{k+1}{2k} a_{kp}^2 \left( 1 - \lambda^2 \cdot \frac{k-1}{k+1} \right), \quad (10)$$

где величина

$$\lambda = \frac{v}{a_{kp}}, \quad (11)$$

является приведенной скоростью смеси.

В силу формулы (9) выражение (10) можно преобразовать к следующему виду:

$$p = \frac{k+1}{2k} \cdot \frac{a_{kp} \cdot Q}{S} \cdot \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2}{\lambda}, \quad (12)$$

Подставив формулы (9), (10) и (11) в уравнение (3):

$$\begin{aligned} & a_{kp} \lambda \cdot d(a_{kp} \cdot \lambda) = \\ & = -\frac{1}{\rho} d \left( \frac{k+1}{2k} \cdot \frac{a_{kp} \cdot Q}{F} \cdot \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2}{\lambda} \right) - \\ & \quad - \zeta(\text{Re}) \cdot \frac{(a_{kp} \cdot \lambda)^2}{2D} dx \end{aligned}$$

и выполнив в полученном уравнении преобразования, получим уравнение:

$$\frac{k+1}{k} \left( \frac{1}{\lambda^2} - 1 \right) \cdot \frac{d\lambda}{\lambda} = \zeta(\text{Re}) \frac{dx}{D}, \quad (13)$$

искомая величина  $\lambda$  в котором должна удовлетворять граничному условию:

$$\lambda|_{x=0} = \lambda_0, \quad (14)$$

Из полученного уравнения (13) вытекает, что при  $\lambda < 1$ ,  $d\lambda/dx > 0$ , т. е. скорость вдоль полости возрастает, а при  $\lambda > 1$ ,  $d\lambda/dx < 0$ , т. е. скорость убывает вдоль полости. Если скорость в полости возрастет до скорости звука, то она уже не может дальше расти и, следовательно, не может перейти в сверхзвуковую скорость. При этом течение смеси со звуковой скоростью может установиться только в выходном сечении полости.

Поскольку переменные в уравнении (13) разделены, то оно может быть проинтегрировано в пределах длины полости:

$$\int \frac{k+1}{k} \left( \frac{1}{\lambda^2} - 1 \right) \frac{d\lambda}{\lambda} = \int \zeta(\text{Re}) d\bar{x} + C, \quad (15)$$

где  $C$  — постоянная интегрирования,  $\bar{x} = x/D$  — безразмерная координата. Интеграл в левой части уравнения (15) сводится к двум табличным интегралам:

$$\begin{aligned} & \int \frac{k+1}{k} \left( \frac{1}{\lambda^2} - 1 \right) \frac{d\lambda}{\lambda} = \\ & = \frac{k+1}{k} \left( \int \frac{d\lambda}{\lambda^3} - \int \frac{d\lambda}{\lambda} \right) = \frac{k+1}{k} \left( -\frac{1}{2\lambda^2} - \ln \lambda \right), \quad (16) \end{aligned}$$

а интеграл в правой части (15) мы найдем позже, так как функция  $\zeta(\text{Re})$  нам пока неизвестна.

Подставляя выражение (16) в граничное условие (14), и учитывая, что в начале координат интеграл в правой части (15) равен нулю, найдем постоянную интегрирования:

$$C = \frac{k+1}{k} \left( -\frac{1}{2} \frac{1}{\lambda_0^2} - \ln \lambda_0 \right)$$

с учетом которой равенство (15) приобретает вид:

$$\chi(\lambda_0) - \chi(\lambda) = \int \zeta(\text{Re}) d\bar{x}, \quad (17)$$

где

$$\chi(\lambda_0) = \frac{k+1}{2k} \left( \frac{1}{\lambda_0^2} + 2 \ln \lambda_0 \right),$$

$$\chi(\lambda) = \frac{k+1}{2k} \left( \frac{1}{\lambda^2} + 2 \ln \lambda \right), \quad (18)$$

Решение уравнения (18) построим численно, но вначале определим основные параметры газоугольной смеси.

Для этой цели сначала разделим обе части равенства (10) на  $p_0$  и с учетом первой формулы (6) и соотношения (7) преобразуем равенство (10) к виду:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right), \quad (19)$$

и далее учтем, что давление и плотность газа связаны между собой адиабатой Пуассона [14, 15]:

$$p = D\rho^k, \quad D - \text{const}, \quad (20)$$

в силу которой, формула (19) приводится к виду:

$$\bar{p} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{k/(k-1)}, \quad (21)$$

где  $\bar{p} = p/p_0$  — безразмерное давление, отнесенное к давлению  $p_0$  в покоящемся газе.

Подставляя далее в полученную формулу (21) выражение (20), найдем безразмерную плотность  $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$ :

$$\bar{\rho} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{1/(k-1)}, \quad (22)$$

а принимая во внимание уравнение Менделеева – Клапейрона [14, 15]:

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

найдем безразмерную температуру  $\bar{T} = T/T_0$ :

$$\bar{T} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2, \quad (23)$$

Известно, что плотность потока  $\rho v$  представляет собой расход смеси на единицу площади поперечного сечения в произвольном сечении полости

$$\rho \cdot v = \frac{Q}{S}, \quad (24)$$

тогда критический расход при равенстве скорости газа и скорости звука определим по аналогии

$$\rho_{kp} \cdot a_{kp} = \frac{Q_{kp}}{S}, \quad (25)$$

а приведенный расход газа  $q$ , представляющий собой отношение расхода газа в произвольном сечении к критическому расходу будет равен:

$$q = \frac{\rho \cdot v}{\rho_{kp} \cdot a_{kp}}, \quad (26)$$

Подставляя сюда формулы (22), (11) и выполняя преобразования, получим:

$$q = \lambda \left(\frac{k+1}{2}\right)^{1/(k-1)} \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{1/(k-1)}, \quad (27)$$

Как ранее уже было сказано, коэффициент сопротивления  $\zeta$  зависит только от числа Рейнольдса  $Re$ , которое по определению представляет собой величину [15]:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad (28)$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости. Далее подставим выражения (26), (6), (7) в формулу (28) и преобразуем ее к виду:

$$Re = \frac{q \cdot \rho_{kp} \cdot a_{kp} \cdot D}{\mu} = \frac{q \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{2(k-1)} \cdot \sqrt{kRT_0} \cdot D}{\mu} \quad (29)$$

Обратим внимание, что вследствие изменения скорости смеси по длине полости изменяется его температура, следовательно, и коэффициент вязкости  $\mu$ , а вместе с ним и число Рейнольдса  $Re$ . Коэффициент вязкости  $\mu$  связан с температурой следующей зависимостью [15]:

$$\mu = \mu^{(0)} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/4}, \quad (30)$$

где  $\mu^{(0)}$  — коэффициент динамической вязкости при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$ .

Функция  $\zeta(Re)$  очень сильно зависит от вида течения. Если при ламинарном течении коэффициент сопротивления определяется теоретической формулой:

$$\zeta(Re) = \frac{64}{Re},$$

то при турбулентном течении коэффициент сопротивления определяется эмпирическими или полуэмпирическими формулами. На наш взгляд, наиболее приемлемой является формула, предложенная Никурадзе [15]:

$$\zeta(\text{Re}) = 0,0032 + \frac{0,221}{(\text{Re})^{0,237}}, \quad (31)$$

Анализируя формулы (27), (29) и (31), замечаем, что они не содержат координату  $x$  и, следовательно, не зависят от неё. Поэтому величина  $\zeta(\text{Re})$  в правой части уравнения (17), может быть вынесена за знак интеграла, в связи с чем, уравнение (17) представляется в виде:

$$\chi(\lambda_0) - \chi(\lambda) = \zeta(\text{Re}) \cdot \bar{x}, \quad (32)$$

где функции  $\chi(\lambda_0)$ ,  $\chi(\lambda)$  определяются по формулам (18).

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании вышеизложенного материала, нам представляется следующая схема и алгоритм численной реализации рассматриваемой задачи о течении вязкой газугольной смеси в цилиндрической области.

Вначале задаемся в точке  $x = 0$  начальным значением параметра  $\lambda_0 = 0,75$  и вычисляем по первой формуле (18) функцию  $\chi(\lambda_0) = 1,031$ .

Затем разбиваем точками  $x_k$  область выброса  $x \in [0; L]$  на  $n = 10$  участков, на каждом из которых находим решение уравнения (32). Поскольку это уравнение после подстановки в него формул (29), (30) и (31) становится трансцендентным и достаточно громоздким, то его решение не может быть построено в замкнутом виде. В связи с этим в данной статье мы использовали численные методы, встроенные в математический программный пакет MathCAD.

В результате вычислительных процедур, выполненных при  $D = 1$  м;  $L = 10$  м;  $k = 1,4$ ;  $R = 287$  Дж/(кг·К);  $\mu^{(0)} = 10,39 \cdot 10^6$  Па·с;  $T_0 = 288$  °К, найдены корни уравнения (32), которые в сечениях  $x = 1$  м; 5 м; 10 м оказались равными  $\lambda = 0,754$ ; 0,773; 0,8.

Зная  $\lambda_k$ , по формулам (21) – (23) и (27), вычисляем значения искоемых параметров газугольной смеси в различных поперечных сечениях подземной полости, графики которых показаны на рис. 2.

Из анализа графиков следует, что с ростом координаты  $x$  приведенная скорость  $\lambda$  и приведенный расход  $q$  смеси увеличиваются, при

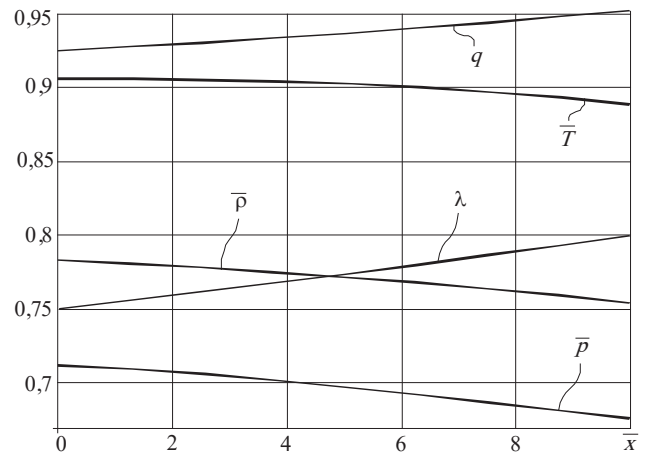


Рис. 2. Распределение параметров смеси вдоль продольной оси цилиндрической полости

этом график функции  $\lambda(x)$  практически линейный, а график функции  $q(x)$  имеет очень слабую вогнутость.

Другие параметры газа: давление, плотность и температура с ростом координаты  $x$  уменьшаются. При этом графики функций  $\bar{p}(\bar{x})$ ,  $\bar{\rho}(\bar{x})$ ,  $\bar{T}(\bar{x})$  представляют собой слабо выпуклые кривые, практически параллельные друг другу.

Обратим внимание, что в процессе течения газугольной смеси в подземной полости ее параметры изменяются незначительно. Так, например, давление и плотность смеси на выходе из полости в выработку по сравнению с их значениями в начале течения уменьшились соответственно на 4,89 %, 3,514 %, а температура уменьшилась всего на 1,42 %.

Далее найдем длину подземной цилиндрической полости при условии, что на выходе из нее скорость газа будет критической, т. е. равной скорости звука. Для этого воспользуемся уравнением (32), а входящие в него функции  $\chi(\lambda)$ ,  $\zeta(\text{Re})$  и значения величин  $q$  и  $\text{Re}$  вычислим при  $\lambda = 1$ , что соответствует критической скорости газа. В этом случае уравнению (32) становится простейшим алгебраическим уравнением первого порядка, из которого определяем искомую безразмерную координату  $\bar{L} = \bar{x}$ :

$$\bar{L} = \bar{x} = \frac{\chi(\lambda_0) - \chi(\lambda)}{\zeta(\text{Re})}, \quad (33)$$

которая при тех же исходных данных оказалась равна  $\bar{x} = 37,011$ . Если начальное

значение приведенной скорости равно  $\lambda_0 = 0,5$ , то длина подземной полости составляет  $\bar{L} = \bar{x} = 295,066$ , что в реальных условиях не имеет места.

Таким образом, мы видим, что в реальных условиях в горных выработках и в подземных полостях, имеющих цилиндрическую форму достижение звуковой скорости, практически, неосуществимо. Для того, чтобы скорость газугольной смеси достигла скорости звука, а затем превысила ее, необходимо, чтобы подземная полость имела форму сопла Лаваля, состоящего из конфузора и диффузора, соединенных между собой горловиной [14].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе преобразования уравнения течения вязкого газа и уравнения неразрывности получено обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, для которого сформулирована задача Коши.

2. В процессе решения задачи Коши получено трансцендентное уравнение относительно приведенной скорости, корни которого найдены с помощью математического программного пакета MathCAD.

3. Представлены формулы для вычисления основных параметров газугольной смеси: давления, плотности, температуры и приведенного расхода смеси в подземной цилиндрической полости.

4. Построены графики распределения основных параметров смеси вдоль продольной оси цилиндрической полости, анализ которых показал:

- с ростом продольной координаты приведенная скорость и приведенный расход газугольной смеси увеличиваются, при этом график приведенной скорости практически линейный, а график приведенного расхода имеет слабую вогнутость;

- давление, плотность и температура с ростом продольной координаты уменьшаются, а графики их функций представляют собой слабо выпуклые кривые, практически параллельные друг другу;

- в процессе течения газугольной смеси в подземной полости параметры смеси изменяются незначительно. Давление и плотность смеси уменьшились соответственно на 4,89 %, 3,514 %, а температура уменьшилась всего на 1,42 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. М.: Госгортехиздат, 1961. 363 с.
2. Большинский М. И., Лысиков Б. А., Каплюхин А. А. Газодинамические явления в шахтах. Севастополь: Вебер, 2003. 284 с.
3. Христианович С. А. Распределение давления газа вблизи движущейся свободной поверхности угля // Известия АН СССР. 1953. № 12. С. 1673–1678.
4. Трофимов В. А. Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S1. С. 391–405.
5. Oparin V. N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams // Journal of Mining Science. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 201–215.
6. Fedorov A. V., Fedorchenko I. A. Mathematical model of methane flow in coal beds // Journal of Mining Science. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 9–21.
7. Fedorov A. V. Shock wave in a coal bed under nonuniform desorption // Journal of Mining Science. 2014. Vol. 50. No. 1. P. 38–42.
8. Черданцев Н. В. Результаты численного решения уравнений предельного состояния краевой зоны пласта и их аппроксимация полиномами // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 6. С. 7–13.
9. Черданцев Н. В. Об одном подходе к построению решения задачи о выбросе угля и метана из краевой части пласта // Прикладная математика и механика. 2023. № 1. С. 81–111.



10. Черданцев С. В., Черданцев Н. В., Ли Хи Ун, 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. С. 26–33.

11. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., 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. С. 40–52.

12. Зыков В. С. О механизме формирования выбросоопасной ситуации в очистном забое угольной шахты // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5. С. 44–48.

13. Зыков В. С., Филатов Ю. М. Проявление опасности по газодинамическим явлениям в очистных забоях угольных шахт // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 441–445.

14. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Газовая динамика сопел. М.: Наука. 1990. 368 с.

15. Христианович С. А., Гальперин В. Г., Миллиончиков М. Д., Симонов Л. А. Прикладная газовая динамика. М.: Изд-во ЦАГИ. 1948. 148 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.18.86.007

UDC 622.272:516.02

© S. V. Cherdantsev, P. A. Shlapakov, K. S. Lebedev, V. V. Kolykhalov, E. A. Shlapakov, S. A. Khaymin, A. Y. Erastov, 2023

**S. V. CHERDANTSEV**

Doctor of Engineering Sciences,  
Leading Researcher  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
e-mail: svch01@yandex.ru

**P. A. SHLAPAKOV**

Candidate of Engineering Sciences,  
Head of Laboratory  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
e-mail: shlapak1978@mail.ru

**K. S. LEBEDEV**

Senior Research Associate  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
e-mail: lebedevks1987@yandex.ru

**V. V. KOLYKHALOV**

Senior Research Associate  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
e-mail: X77kem@mail.ru

**E. A. SHLAPAKOV**

Researcher  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
e-mail: lairxx@yandex.ru

**S. A. KHAYMIN**

Senior Research Associate  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
e-mail: hsa007@mail.ru

**A. Yu. ERASTOV**

Senior Research Associate  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
e-mail: eractov\_a\_y@mail.ru

## FLOW OF GAS-COAL MIXTURE IN UNDERGROUND CYLINDRICAL CAVITY FORMED DURING SUDDEN RELEASE

*Among the particularly dangerous phenomena in the development of coal deposits by underground method are sudden emissions of coal, rock and gas, accompanied by the formation of cavities in the coal massif and intensive release of gas-coal mixtures from them into mine workings. Within the framework of the assumptions adopted in the article on the viscous properties of a gas-coal mixture, the problem of its one-dimensional stationary flow in an underground cylindrical cavity formed during a sudden release is considered. Based on the equation of motion of viscous gas and the continuity equation, the Cauchy*

problem for the ordinary differential equation of the first order is formulated. As a result of solving the Cauchy problem, a transcendental equation is obtained with respect to the reduced speed. Transcendental Equation Roots Found Using MathCAD Software Package. The found reduced velocity made it possible to determine the main parameters of the mixture: pressure, density, temperature and reduced flow rate of the gas-coal mixture in various cross sections of the underground cavity. Graphs were built, on the basis of which a number of regularities of a one-dimensional stationary flow of a viscous gas-coal mixture in a cylindrical region were revealed.

Keywords: MINING, COAL SEAM, SUDDEN EMISSIONS, GAS-COAL MIXTURES, EQUATIONS OF GAS DYNAMICS, REDUCED SPEED, REDUCED FLOW RATE.

## REFERENCES

1. Khodot V. V. Sudden emissions of coal and gas. Moscow: Gosgortehizdat, 1961. 363 p. [In Russ.].
2. Bolshinsky M. I., Lysikov B. A., Kaplyukhin A. A. Gas-dynamic phenomena in mines. Sevastopol: Weber, 2003. 284 p. [In Russ.].
3. Khristianovich S. A. Distribution of gas pressure near the moving free surface of coal // News of the USSR Academy of Sciences [Izvestiya AN SSSR]. 1953. No. 12. P. 1673–1678. [In Russ.].
4. Trofimov V. A. Sudden release of coal and gas. Removal of coal and gas into the developed space // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)]. 2011. No. S1. P. 391–405. [In Russ.].
5. Oparin V. N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams // Journal of Mining Science. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 201–215. [In Russ.].
6. Fedorov A. V., Fedorchenko I. A. Mathematical model of methane flow in coal beds // Journal of Mining Science. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 9–21.
7. Fedorov A. V. Shock wave in a coal bed under nonuniform desorption // Journal of Mining Science. 2014. Vol. 50. No. 1. P. 38–42.
8. Cherdantsev N. V. Results of numerical solution of the equations of the limiting state of the boundary zone of the formation and their approximation by polynomials // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 6. P. 7–13. [In Russ.].
9. Cherdantsev N. V. On one approach to constructing a solution to the problem of coal and methane emission from the marginal part of the reservoir // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2023. No. 1. P. 81–111. [In Russ.].
10. Cherdantsev S. V., Cherdantsev N. V., Li Hee Un, Lebedev K. S., Li K. H., Khaimin S. A. Determination of parameters of souffle gas emissions from coal seam into mine workings // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2017. No. 1. P. 26–33. [In Russ.].
11. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Goloskokov S. I., Lebedev K. S., Shlapakov E. A. Mathematical modeling of the process of formation and release of the gas — coal mixture into mine workings // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2021. No. 3. P. 40–52. [In Russ.].
12. Zykov V. S. On the mechanism of formation of an explosive situation in the treatment face of a coal mine // Surveying Bulletin [Marksheyderskiy vestnik]. 2016. No. 5. P. 44–48. [In Russ.].
13. Zykov V. S., Filatov Yu. M. Manifestation of danger by gas-dynamic phenomena in the treatment faces of coal mines // High-tech technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. 2018. No. 4. P. 441–445. [In Russ.].
14. Pirumov U. G., Roslyakov G. S. Gas dynamics of nozzles. M.: Nauka, 1990. 368 p. [In Russ.].
15. Khristianovich S. A., Galperin V. G., Millionshchikov M. D., Simonov L. A. Applied gas dynamics. Moscow: TsAGI Publishing House, 1948. 148 p. [In Russ.].