# DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.31.51.005

УДК 622.272:516.02 © С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, П.В. Потапов, С.И. Голоскоков, К.С. Лебедев, Е.А. Шлапаков, 2021



**С.В. ЧЕРДАНЦЕВ** д-р техн. наук, ведущий 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



С.И. ГОЛОСКОКОВ канд. техн. наук, заведующий лабораторией АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово e-mail: s.goloskokov@nc-vostnii.ru



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



**П.В. ПОТАПОВ** канд. техн. наук, заведующий лабораторией АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово, e-mail: potapov1953@list.ru



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

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ И ВЫБРОСА СМЕСИ «ГАЗ–УГОЛЬ» В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ

Непременным атрибутом при разработке угольных месторождений подземным способом является метан, представляющий собой газообразную субстанцию, предрасположенную к различным аэро- и газодинамическим процессам, в первую очередь, к суфлярным выделением из подземных полостей и внезапным выбросам в горные выработки, которые традиционно относятся к опасным явлениям при отработке угольных пластов. В данной статье на базе допущений об идеальности и баротропности метана обсуждается задача о внезапных выбросах смеси «газ – уголь» в горные выработки. Представлена формула, определяющая скорость газа при его выбросе, построены графики зависимостей скорости газа от ряда его параметров. Найдена критическое начальное давление газа, при котором скорость газа при выбросе равна скорости звука в начальном состоянии.

Ключевые слова: ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ, СМЕСИ «ГАЗ – УГОЛЬ», УРАВНЕНИЯ НЕРАЗ-РЫВНОСТИ, ИМПУЛЬСОВ И ЭНЕРГИИ, УРАВНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВА–КЛАПЕЙРОНА, ВОЛНЫ ПОНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ВЫБРОСА, КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ГАЗА.

# ВВЕДЕНИЕ

Одной из отличительных особенностей разработки угольных месторождений подземным способом является наличие в шахтах метана, выделяемого в горные выработки из отрабатываемых угольных пластов. Наличие в шахте метана является основной причиной проявления в горных выработках опасных газодинамических явлений, которые могут происходить или в виде суфлярных выделений или в форме внезапных выбросов.

Суфлярные выделения газа характерны для всех газоносных угледобывающих районов. Известно [1], что механизм суфлярного выделения газа представляет собой истечение находящегося под давлением газа из трещин и полостей в породоугольном массиве при их вскрытии горными выработками или скважинами. Продолжительность суфлярных выделений составляет от нескольких часов до нескольких лет. Дебит газа достигает 8500 м<sup>3</sup> в сутки, а минимальное его давление составляет не менее 0,2 МПа. Причем плотность суфлярных выделений возрастает с увеличением глубины горных работ.

Проблеме суфлярных выделений посвящено достаточно много работ. Здесь мы отметим лишь некоторые. Так, в работе [2] рассмотрен и апробирован метод, базирующийся на базе нелинейной геомеханики и рудничной газодинамики, позволяющий с высокой степенью вероятности прогнозировать приток метана на выемочных участках. В статье [3] на базе экспериментальных данных исследованы процессы выделения метана из угольного пласта и условия его фильтрации в скважины большой длины в условиях шахт Кузбасса. Указаны рекомендации по определению опытным путем параметров метановыделения из угольного пласта.

Работы [4, 5] посвящены проблеме суфлярных выделений газа в горные выработки. В частности, в работах показано, что если подземные полости имеют расширяющиеся части в виде диффузоров, то скорости газа на выходе в горные выработки могут превышать локальные скорости звука в газе. В процессе исследования струйного сверхзвукового истечения газа из подземных полостей в выработки выявлено наличие «спутного» потока и вычислены параметры газа в зависимости от величины ударного фронта в газовоздушном потоке.

Значительно более опасными по сравнению с суфлярными выделениями являются внезапные выбросы угля и газа в горные выработки. Причем, выбросы происходят не только на угольных шахтах, но и на калийных, а также при сооружении тоннелей (например, в Армении) и при разработке якутских алмазных месторождений [1].

Механизм внезапных выбросов очень сложен и к настоящему времени еще недостаточно подробно изучен. Многочисленные исследования в этой области показали, что выбросоопасная обстановка обусловлена совокупностью напряженно-деформированного состояния породоугольного массива и давления порового метана в призабойной области пласта. Главными признаками внезапных выбросов угля и газа являются разрушение и последующее измельчение угля в областях примыкающих к краевым частям угольных пластов, образование полостей в массиве горных пород, выделение газа из измельченного угля, заключенного в пространстве между частицами раздробленного угля. Выброс происходит за счет энергии расширения сжатого газа.

На базе такого подхода в работах [6–8] исследованы закономерности массопереноса газа при формировании обнажений в угольных пластах. Приведены соотношения, определяющие величину давления газа в угольном пласте. Рассмотрена модель и алгоритм расчета истечения газа и выброса угля из зоны внезапного отжима с образованием полости. Рассмотрены закономерности десорбции газа из угля на базе модели диффузии. Приведен анализ альтернативных моделей и дана оценка их совместимости с классической моделью.

В работе [9] обсуждается математическая модель породоугольного массива, предрасположенного к внезапному выбросу, и показано, что выброс угля в выработку происходит в том случае, если возникает неустойчивое соотношение сил, вызывающих выброс, и сил, препятствующих ему. В частности, за критерий неустойчивости в работе принято условие, при котором не выполняется равновесие части пласта, находящейся под действием давления метана и сил трения между «слабым» слоем и угольным пластом. На базе этого критерия вычислена критическая дли-

42

на «слабого» слоя и показано, что увеличение мощности слоя приводит к увеличению критической длины.

На базе многочисленных натурных измерений и накопленного опыта по наблюдению за внезапными выбросами угля и газа в работе [10] 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 [11] приведена статистика внезапных выбросов на угольных шахтах России. Рассмотрены горно-геологические и горнотехнические условия возникновения внезапных выбросов в очистных забоях, отмечены отличительные особенности в факторах их возникновения и протекания. Сформулирована концепция возникновения внезапного выброса угля и газа в очистном забое.

Несмотря на многолетние и плодотворные исследования проблемы внезапных выбросов угля и газа, она исследована еще не в полной мере. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что механизм внезапных выбросов достаточно сложен, поскольку сам он состоит из нескольких взаимосвязанных между собой механизмов, каждый из которых имеет свои особенности. Поэтому, на наш взгляд, пока нет единой концепции и единых критериев в оценке внезапных выбросов, а некоторые их проявления пока не вполне объяснимы.

В этой статье мы не будем обсуждать процесс разрушения и измельчения угля в выбросоопасных зонах, а рассмотрим лишь модель процесса формирования и распространения волны понижения давления, которая обуславливает образование волны выброса угля и газа в горную выработку. При построении модели приняты следующие допущения [12, 13]:

1) процесс выброса угля и газа происходит, когда уголь уже раздроблен, а волна выброса распространяется за счет энергии расширения сжатого газа, заключенного в пространстве между частицами раздробленного угля и сорбированного на их поверхности;

 поскольку уголь раздроблен, то газ в каждой точке плоскости, перпендикулярной направлению выброса, имеет одно и то же давление;  в начальный момент выброса газ и уголь движутся в каждом сечении с одинаковой скоростью, не обгоняя друг друга.

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Пусть в некоторой области *AB* находятся раздробленный уголь и газ (рис. 1), давление которого будем считать постоянным.



область раздробленного угля

Рис. 1. К построению модели выброса угля и газа в горную выработку

Допустим, что стенка ВС внезапно разрушается, в связи с чем уголь и газ начнут выбрасываться из области АВ в горную выработку, причем в процессе выброса будет происходить выделение газа с поверхности угольных частиц вследствие падения давления. Пусть давление, плотность и температура газа до разрушения перегородки ВС были соответственно  $p_1, \rho_1, T_1, a$  скорость смеси газа и угля была и<sub>1</sub>. Поскольку перегородка ВС разрушилась, то справа от некоторой плоскости Е давление газа, плотность и температура уменьшаются до значений  $p_2$ ,  $\rho_2$ ,  $T_2$ , а скорость смеси газа и угля, наоборот, возрастает до значения и<sub>2</sub>, что сопровождается изменением содержания газа в угле на величину  $\Delta \rho_{y} = \rho_{y1} - \rho_{y2}.$ 

Таким образом, при разрушении перегородки *BC* давление будет падать в направлении от *B* к *A* и, следовательно, будет распространяться волна понижения давления, а в противоположном направлении будет распространяться волна сжатия, на фронте которой давление будет возрастать. Особенность распространения волн понижения давления и сжатия заключается в том, что их скорости равны по величине, но противоположны по направлению. Волна сжатия, с одной стороны, «питается» за счет волны понижения давления, а, с другой стороны, порождает волну выброса, несущую уголь и газ в горную выработку.

Из сказанного вытекает, что вначале удобнее рассмотреть задачу о волне разряжения, скорость распространения которой пусть будет равна D и направлена справа налево, и поэтому D < 0. Пусть масса смеси «газ – уголь», находящаяся в начальный момент времени  $t_0 = 0$  внутри области между сечениями G и E, за бесконечно малое время dt переместится в область между сечениями  $E_1$  и  $G_1$ .

Будем рассматривать единицу площади фронта волны, так как предполагаем, что по всей площади фронта параметры смеси распределены одинаково, и запишем уравнения законов сохранения массы, импульсов и энергии для смеси на единице площади фронта. Пусть в единице объема смеси угля и газа доля объема угля составляет  $\psi = V_y / V$ . Тогда объем угля в области *GE* будет:

$$GE = -(D - u_1)\psi_1 dt$$

Объем угля в областях GE и  $G_1E_1$  не изменяется, а объем смеси в области  $G_1E_1$  мы найдем следующим образом:

$$G_1E_1 = GE + EE_1 - GG_1 = -(D - u_2)\psi_2 dt$$
.

Следовательно, уравнение, выражающее сохранение объема угля, представляется в виде:

$$(D - u_1)\psi_1 = (D - u_2)\psi_2.$$
(1)

Поскольку изменение параметров происходит монотонно, то имеют место следующие соотношения:

$$u_2 = u_1 + du$$
,  $\psi_2 = \psi_1 + d\psi$ ,

подставив которые в равенство (1) и полагая  $u_1 = u, \psi_1 = \psi$ , получаем:

$$(D-u)d\psi = \psi du . \tag{2}$$

Далее составим уравнение:

$$(D-u_2)(1-\psi_2)\rho_2 = (D-u_1)(1-\psi_1)\rho_1 + + (D-u_1)\psi_1(\rho_{y1}-\rho_{y2}),$$
(3)

выражающее закон сохранения массы газа в областях соответственно  $G_1E_1$  и *GE* с учетом массы газа, выделившегося из угля при уменьшении давления.

Исключив из равенств (1) и (3) величину  $D-u_2$ , получим еще одно равенство:

$$\frac{1 - \psi_1}{\psi_1} \rho_1 + \rho_{y1} = \frac{1 - \psi_2}{\psi_2} \rho_2 + \rho_{y2} , \qquad (4)$$

показывающее, что величина

44

$$\frac{1-\psi}{\psi}\rho + \rho_y = \Omega \tag{5}$$

остается неизменной при переходе через фронт *Е* волны понижения давления.

На основании закона сохранения импульсов [14, 15] изменение количества движения угля и газа при переходе из области *GE* в область  $G_1E_1$  равно импульсу сил давления, что выражается следующим равенством:

$$p_1 - p_2 = -(D - u_1)[\psi_1 \rho_{y_1} + (1 - \psi_1)\rho_1](u_2 - u_1),$$
(6)

в котором мы пренебрегли силами трения поверхности движущегося газа и угля о неподвижный уголь по сравнению с силами давления. Уравнение (6) мы также можем представить в дифференциальной форме:

$$dp = (D - u)\psi\Omega du , \qquad (7)$$

как мы представили уравнение (1) в виде равенства (2).

В дополнение к уравнениям (1) и (6) составим еще одно уравнение, выражающее закон сохранения энергии [14, 15], показывающий, что работа сил давления газа и внутренняя энергия десорбированного газа при переходе из области *GE* в область  $G_1E_1$  равна изменению кинетической энергии угля и изменению внутренней энергии свободного газа. В силу сказанного имеем:

$$p_{1}u_{1} - p_{2}u_{2} - (D - u_{1})\psi_{1}(\rho_{y1} - \rho_{y2})c_{v}T_{\mu} =$$

$$= -(D - u_{1})\psi_{1}\Omega \frac{u_{2}^{2} - u_{1}^{2}}{2} -$$

$$-(D - u_{2})(1 - \psi_{2})\rho_{2}c_{v}T_{2} +$$

$$+(D - u_{1})(1 - \psi_{1})\rho_{1}c_{v}T_{1},$$
(8)

Ì

где  $c_v T$  — внутренняя энергия единицы массы газа,  $T_{_{\pi}}$  — температура газа, выделяющегося при десорбции, которая близка к начальной температуре угля.

Далее воспользуемся уравнением состояния Менделеева – Клапейрона:

$$p = R\rho T , \qquad (9)$$

• www.nc-vostnii.ru • 3-2021 • Вестник НЦ ВостНИИ

связывающее параметры газа, в котором газовая постоянная *R* определяется по формуле:

$$R = c_p - c_v, \qquad (10)$$

где  $c_p$ ,  $c_v$  — удельные теплоемкости соответственно при постоянном давлении и постоянном объеме, а их отношение представляет собой показатель адиабаты Пуассона  $k = c_p/c_v$ .

С помощью уравнения (6) и соотношений (9), (10), приведем уравнение (8) к виду:

$$p_{1}u_{1} - p_{2}u_{2} = \frac{u_{1} + u_{2}}{2}(p_{1} - p_{2}) - \frac{(D - u_{1})\psi_{1}}{k - 1} \cdot \left[\frac{1 - \psi_{2}}{\psi_{2}}p_{2} - \frac{1 - \psi_{1}}{\psi_{1}}p_{1} - (\rho_{y_{1}} - \rho_{y_{2}})RT_{\mu}\right], \quad (11)$$

которое при условии бесконечно малого изменения давления принимает вид:

$$pdu = \frac{(D-u)\psi}{k-1} \left( \frac{1-\psi}{\psi} dp - \frac{p}{\psi^2} d\psi + RT_{\rm d} d\rho_{\rm y} \right).$$
(12)

С помощью соотношения, вытекающего из равенства (2):

$$(D-u)\psi = \frac{\psi^2 du}{d\psi},$$

разделим переменные в уравнении (12) и приведем его к виду:

$$k\frac{d\psi}{\psi(1-\psi)} = \frac{dp}{p} + RT_{\mu}\frac{\psi}{1-\psi}\frac{d\rho_{y}}{p}.$$
 (13)

Поскольку выделение газа с поверхности угля происходит достаточно быстро, то теплообменом между поверхностью угля и свободным газом можно пренебречь. Поэтому десорбированный газ можно считать баротропным, плотность которого зависит только от давления, в силу чего, справедливо следующее соотношение:

$$d\rho_{\rm y} = \frac{\partial \rho_{\rm y}}{\partial p} dp \,,$$

с учетом которого уравнение (13) принимает вид:

$$k\frac{d\psi}{\psi(1-\psi)} = \frac{dp}{p} + RT_{\mu}\frac{\psi}{1-\psi}\frac{\partial\rho_{y}}{\partial p}\frac{dp}{p}.$$
 (14)

Таким образом, для описания волны понижения давления мы располагаем уравнениями (5), (7), (14) и вытекающим из равенства (2) уравнением:

$$\frac{d\psi}{\psi} = \frac{du}{D-u},\tag{15}$$

из сопоставления с которым уравнения (7) получим два соотношения:

$$du = \frac{1}{\sqrt{\Omega}} \sqrt{\frac{dp}{d\psi}} \cdot \frac{d\psi}{\psi}, \ D - u = \frac{1}{\sqrt{\Omega}} \sqrt{\frac{dp}{d\psi}}.$$
 (16)

Введем в рассмотрение еще одну переменную:

$$\vartheta = \frac{1 - \psi}{\psi}, \quad d\vartheta = \frac{-d\psi}{\psi^2}, \quad (17)$$

с помощью которой уравнение (14) сначала преобразуем к виду:

$$-k\frac{d\vartheta}{\vartheta} = \frac{dp}{p} + RT_{\mathrm{f}}\frac{1}{\vartheta}\frac{\partial\rho_{\mathrm{y}}}{\partial p}\frac{dp}{p}$$

а затем приведем к следующему линейному дифференциальному уравнению 1-го порядка:

$$k\frac{d\Theta}{dp} + \frac{\Theta}{p} = -RT_{\mathrm{A}}\frac{\partial\rho_{\mathrm{y}}}{\partial p}\frac{1}{p}.$$
 (18)

Используя метод вариации произвольной постоянной [16] и граничное условие

$$\Theta|_{p=p_0} = \Theta_0,$$

найдем частное решение уравнения (18):

$$\vartheta = \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{k}} \left[ \vartheta_0 - \frac{RT_{\pi}}{kp_0} \int_{p_0}^p \left(\frac{p}{p_0}\right)^{-\frac{k-1}{k}} \frac{\partial \rho_y}{\partial p} dp \right],$$

которое с помощью соотношений

$$\rho = \rho_{y0} - \rho_y = b\rho_0, \ d\rho = \rho_0 db, \ d\rho_y = -\rho_0 db,$$

$$p = \beta p_0, \ dp = p_0 d\beta, \ \frac{d\rho_y}{dp} = \frac{\rho_0}{p_0} \left(-\frac{db}{d\beta}\right) \ (19)$$

и закона Менделеева – Клапейрона (9) приведем к более удобному виду:

$$\vartheta = \beta^{-1/k} \left( \vartheta_0 + \frac{T_{\pi}}{kT_0} \int_{p_0}^p \beta^{-\frac{k-1}{k}} \frac{db}{d\beta} d\beta \right), \quad (20)$$

где  $p_0$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_{y0}$  — соответственно давление, плотность свободного газа и плотность угля в начальном (исходном) состоянии.

Следуя рекомендациям работы [13], будем полагать функцию  $b = b(\beta)$  линейной, представив ее следующим образом:

$$b = v(1 - \beta), \qquad (21)$$

где v — некоторый безразмерный коэффициент. Из формулы (21) вытекает соотношение:

$$\frac{db}{d\beta} = -\nu, \qquad (22)$$

в силу которого интеграл в формуле (20) может быть приведен к квадратуре:

$$\int_{p_0}^{p} \beta^{-\frac{k-1}{k}} \frac{db}{d\beta} d\beta = -\nu \int_{p_0}^{p} \beta^{-\frac{k-1}{k}} d\beta =$$
$$-\nu k \beta^{1/k} \Big|_{p_0}^{p} = -\nu k \left[ \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1/k} - \left( \frac{p_0}{p_0} \right)^{1/k} \right] =$$
$$= \nu k (1 - \beta^{1/k})$$

46

и тогда формула представляется следующим образом:

$$\vartheta = \beta^{-1/k} \left[ \vartheta_0 + v \frac{T_{\pi}}{T_0} (1 - \beta^{1/k}) \right].$$
(23)

Для определения скорости движения газа воспользуемся вторым равенством (16) и второй формулой (17), откуда следует соотношение:

$$D - u = \frac{1}{\sqrt{\Omega}} \frac{1}{\psi} \sqrt{-\frac{dp}{d\vartheta}}, \qquad (24)$$

в котором производную  $dp/d\vartheta$  мы найдем из уравнения (18) с учетом последней формулы (19):

$$\frac{dp}{d\vartheta} = -\frac{kp}{\vartheta + v\frac{T_{\pi}}{T_0}}.$$
(25)

Учитывая полученное соотношение (25), перепишем формулу (24) следующим образом:

$$D - u = \frac{1}{\sqrt{\Omega} \cdot \psi} \sqrt{\frac{kp}{\vartheta + v \frac{T_{\pi}}{T_0}}}.$$
 (26)

Далее из равенства (7) находим выражение:

$$du = \frac{dp}{(D-u)\psi\Omega},$$

которое с помощью формул (19) и (26) сначала перепишем в виде:

$$du \, \overline{p} \, \frac{1}{\sqrt{\Omega}} \sqrt{\left(\vartheta + v \frac{T_{\pi}}{T_0}\right) \frac{p_0}{k\beta}} \cdot d\beta,$$

а затем с помощью формул (5), (17) и (23) преобразуем к удобному для интегрирования виду:

$$du = \frac{a_0}{k\sqrt{9_0 + \frac{\rho_{y_0}}{\rho_0}}}.$$
(27)

$$\cdot \sqrt{\left\{\beta^{-1/k} \left[\vartheta_0 + \nu \frac{T_{\pi}}{T_0} (1 - \beta^{1/k})\right] + \nu \frac{T_{\pi}}{T_0}\right\} \frac{1}{\beta}} \cdot d\beta$$

где  $a_0$  — скорость звука в газе в начальном (исходном) состоянии. Выполнив в (27) процедуру интегрирования, найдем искомую скорость газа:

$$u = \frac{2a_0}{(k-1)\cdot\sqrt{9_0 + \frac{\rho_{y_0}}{\rho_0}}} \cdot \sqrt{\left(9_0 + v\frac{T_{\pi}}{T}\right)} \left(1 - \beta\frac{k-1}{2k}\right)}.$$
 (28)

В процессе интегрирования (27) мы учли, что  $\beta|_{p=p_0} = 1$ .

Если десорбция отсутствует, то b = 0 и, следовательно, db = 0, а из формулы (22) вытекает, что v = 0. В силу этого, формула (23) упрощается:

$$\vartheta = \vartheta_0 \beta^{-1/k}, \qquad (29)$$

что приводит также к упрощению формулы (28):

$$u = \frac{2a_0\sqrt{9_0}}{(k-1)\sqrt{\frac{\rho_{y_0}}{\rho_0} + 9_0}} \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{2k}}\right).$$
(30)

Формула (28) (или (30)) определяет скорость течения газа в процессе его выброса

в горную выработку из области дробления угля *АВ* (см. рис. 1).

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По формуле (28) выполнены вычислительные процедуры и построены графики, показанные на рис. 2, 3. В качестве исходных данных приняты следующие параметры:  $p_0 = 2$  МПа;  $\rho_{y0} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ar} = 0,668$  кг/ м<sup>3</sup>;  $T_{\pi} = 300$  °K, T = 290 °K; k = 1,3; v = 0,8;  $a_0 = 441,93$  м/с;  $\psi_0 = 0,05$ . Здесь мы ввели дополнительные параметры, обозначающие  $p_{ar}$  — атмосферное давление,  $\rho_{ar}$  — плотность метана при атмосферном давлении.

Вычислительные процедуры мы выполнили в следующей последовательности. Вначале вычисляем параметр 9<sub>0</sub> по первой формуле (17):

$$\vartheta_0 = \frac{1 - \psi_0}{\psi_0} = 19,$$

затем с помощью уравнения Менделеева – Клапейрона (9) находим соотношение между начальными параметрами газа и параметрами при атмосферном давлении:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{p_{\rm aT}} \rho_{\rm aT},\tag{31}$$

где мы учли, что  $T \approx T_{ar}$ .

Подставив в (31) исходные величины, получаем  $\rho_0 = 13,364 \text{ кг/м}^3$ .

Теперь по формуле (28) мы можем вычислить скорость газа при любом значении  $\beta = p/p_0$ . Например, при  $\beta = 0.5$  скорость газа при выбросе равна u = 104,101 м/с.

По результатам вычислений построены графики функций  $\overline{u}(\beta)$  и  $\overline{u}(\overline{\rho})$  (рис. 2, 3).



Рис. 2. Графики зависимости относительной скорости газа от параметра  $\beta$ 

На рис. 2, 3 безразмерные величины  $\overline{u}$ ,  $\overline{\rho}$  представляют собой соответственно относительную скорость и относительную плотность газа, определяемые по формулам:

$$\overline{u} = \frac{u}{a_0}, \ \overline{\rho}_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{\mathrm{aT}}}.$$

Анализируя рис. 2, замечаем, что графики функции  $\overline{u}(\beta)$  — монотонно убывающие вогнутые кривые, не имеющие экстремальных точек. При этом, чем больше параметр  $\Psi_0$ , тем меньше скорость газа, особенно при больших значениях  $\beta$ . Это значит, что с увеличением содержания угля в составе смеси «газ – уголь» скорость газа существенно уменьшается.

Наоборот, чем больше начальная плотность газа в зоне выброса, тем выше его скорость. Графики функции  $\overline{u}(\overline{\rho})$ , построенные для ряда значений показателя адиабаты Пуассона, представляют собой слабо выпуклые монотонно возрастающие кривые. При этом, скорость газа при прочих равных условиях тем выше, чем меньше показатель адиабаты Пуассона (рис. 3).

48



Рис. 3. Графики зависимости относительной скорости газа от  $\overline{\rho}_0$ 

Далее выясним, при каком значении параметра  $\beta$  скорость газа становится критической, равной скорости звука в газе  $u = a_0$ , при условии, что  $p = p_{ar}$ . Для этой цели преобразуем формулу (28) к следующему уравнению:

$$\frac{2}{(k-1)\cdot\sqrt{\vartheta_0 + \frac{\rho_{y_0}}{\rho_0}}}\sqrt{\left(\vartheta_0 + v\frac{T_{\mathcal{A}}}{T}\right)}\left(1 - \beta^{\frac{k-1}{2k}}\right) = 1, (32)$$

где параметры  $\beta$  и  $\rho_0$  заменим их критическими значениями  $\beta_{kp}$ ,  $\rho_{0 kp}$ , которые могут быть выражены друг через друга с помощью формул (31):

$$\rho_{0,kp} = \frac{p_{0,kp}}{p_{aT}} \rho_{aT} = \frac{1}{\frac{p_{aT}}{p_{0,kp}}} \rho_{aT} = \frac{\rho_{aT}}{\beta_{kp}}.$$
 (33)

Подставив формулу (33) в уравнение (32), приведем его к виду: 2k

$$\left(1 - \frac{(k-1)\sqrt{9_0 + \frac{\rho_{y_0}}{\rho_{ar}}\beta_{kp}}}{2\sqrt{9_0 + \nu \frac{T_{\pi}}{T}}}\right)^{\frac{2k}{k-1}} - \beta_{kp} = 0, (34)$$

решение которого, ввиду его трансцендентности, найти в аналитическом виде не представляется возможным. Поэтому решение уравнения (34) построено графически, для чего сформирована функция *y*(β), представляющая собой левую часть уравнения (34). График функции  $y(\beta)$ , построенный при исходных данных, показан на рис. 4. Точка пересечения графика  $y(\beta)$  с осью абсцисс представляет собой корень уравнения, равный  $\beta_{kp} = 0,042$ , которому соответствует начальное критическое давление  $p_{0,kp} = 2,362$  МПа.



Рис. 4. К определению критических значений параметра  $\beta_{kp}$ 

Выполнив аналогичные вычислительные процедуры при других значениях параметра  $\Psi_0$ , получим следующие результаты: при  $\Psi = 0,1$ :  $\beta_{kp} = 0,028$ ;  $p_{0,kp} = 3,627$  МПа; при  $\Psi_0 = 0,15$ :  $\beta_{kp} = 0,021$ ;  $p_{0,kp} = 4,737$  МПа. Полученные результаты показывают, что с увеличением параметра  $\Psi_0$ , характеризующего долю объема угля в единице объема смеси «газ — уголь», увеличиваются параметр  $\beta_{kp}$  и соответствующее ему критическое значение начального давления.

# выводы

 Сформулирована задача о течении газа при его выбросе в горную выработку в составе смеси «газ – уголь» и показано ее решение. Построены графики зависимостей скорости газа от ряда его параметров, анализ которых выявил:

 – с увеличением содержания угля в составе смеси «газ – уголь» скорость газа существенно уменьшается;

 чем больше начальная плотность газа в зоне выброса и меньше показатель адиабаты Пуассона, тем выше скорость газа.

2. Получено трансцендентное уравнение для определения критического значения начального давления, при котором скорость газа в волне выброса равна начальной скорости звука.

3. Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением доли угля в единице объема смеси «газ – уголь» увеличивается критическое значение начального давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большинский М.И., Лысиков Б.А., Каплюхин А.А. Газодинамические явления в шахтах. Севастополь: Вебер, 2003. 284 с.

2. Полевщиков Г.Я. Деформационно-волновые. процессы в массиве горных пород при движении очистного забоя в угольных пластах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 50–60.

3. Шевченко Л.А. Газодинамические процессы в зонах влияния дегазационных скважин //

Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 6. С. 85–90.

4. Черданцев Н.В., Черданцев С.В., Ли Хи Ун, 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. С. 64–68.

5. 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.

6. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Газодинамика угольного пласта. Ч. 1: Математическое описание кинетики десорбции // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 1. С. 6–14.

7. Трофимов В.А. Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S1. C. 391–405.

8. Трофимов В.А. Определение давления газа в угольном пласте // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № S1. C. 324–345.

9. Черданцев Н.В. Об одном подходе к расчету выброса угля из газоносного пласта, вмещающего геологические нарушения // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 8. С. 13–18.

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

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

12. Христианович С.А. О волне выброса // Известия АН СССР. 1953. № 12. С. 1679–1688.

13. Христианович С.А. Распределение давления газа вблизи движущейся свободной поверхности угля // Известия АН СССР. 1953. № 12. С. 1673–1678.

14. Рахматуллин Х.А., Сагомонян А.Я., Бунимович А.И., Зверев Н.Н. Газовая динамика. М.: Высшая школа, 1965. 723 с.

15. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 336 с.

16. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений. М.: Физматгиз, 1959. 468 с.

# DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.31.51.005

UDC 622.272:516.02 © S.V. Cherdantsev, P.A. Shlapakov, P.V. Potapov, S.I. Goloskokov, K.S. Lebedev, E.A. Shlapakov, 2021

#### 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

# **P.V. POTAPOV**

Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory JSC «NC VostNII», Kemerovo e-mail: potapov1953@list.ru

#### S.I. GOLOSKOKOV

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

# **K.S. LEBEDEV**

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

# E.A. SHLAPAKOV

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

# MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FORMATION AND DISCHARGE OF THE GAS-COAL MIXTURE INTO MINING WORKS

An indispensable attribute in the development of coal deposits by the underground method is methane, which is a gaseous substance predisposed to various aero- and gas-dynamic processes, primarily to sufflar release from underground cavities and sudden emissions to mining, which traditionally relate to hazardous phenomena during the development of coal seams. In this article, on the basis of assumptions about the ideality and barotropy of methane, the task of sudden emissions of the gas-coal mixture into mining is discussed. The formula determining the gas velocity at its emission is presented, graphs of gas velocity dependencies on a number of its parameters are plotted. Critical initial gas pressure found at which the emission gas velocity is equal to the initial sound velocity.

Keywords: MINING OPERATIONS, GAS-COAL MIXTURES, EQUATIONS OF CONTINUITY, PULSES AND ENERGY, MENDELEEV-VALVE EQUATION, PRESSURE AND EMISSION REDUCTION WAVES, CRITICAL GAS VELOCITY.

# REFERENCES

1. Bolshinsky M.I., Lysikov B.A., Kaplyukhin A.A. Gas-dynamic phenomena in mines. Sevastopol: Weber, 2003. 284 p. [In Russ.].

2. Polevshchikov G.Ya. Deformation-wave. Processes in the rock mass during the movement of the stope in coal seams // Physical and technical problems of the development of useful minerals [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2013. No. 5. P. 50–60. [In Russ.].

3. Shevchenko L.A. Gas-dynamic processes in zones of influence of degassing wells // Proceedings of higher educational institutions. Mining Journal [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal]. 2015. No. 6. P. 85–90. [In Russ.].

4. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V., Lee Hee Un, Filatov Yu.M., Shlapakov P.A., Lebedev K.S. On one approach to the description of prompted gas emissions from the reservoirs of a coal massif into mine workings // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 64–68. [In Russ.].

5. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V., Lee Hee Un, Lebedev K.S., Lee K.Kh., Haymin S.A. Determination of the parameters of prompted gas emissions from a 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.].

6. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. Gas dynamics of a coal seam. Part 1: Mathematical description of the kinetics of desorption // Physical and technical problems of the development of useful minerals [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2009. No. 1. P. 6–14. [In Russ.].

7. Trofimov V.A. Sudden outburst of coal and gas. Removal of coal and gas into the workedout area // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)]. 2011. No. S1. P. 391–405. [In Russ.].

8. Trofimov V.A. Determination of gas pressure in a coal seam // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)]. 2012. No. S1. P. 324–345. [In Russ.].

9. Cherdantsev N.V. On one approach to calculating the emission of coal from a gas-bearing seam containing geological disturbances // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 8. P. 13–18. [In Russ.].

10. Zykov V.S. On the mechanism of the formation of an outburst hazardous situation in the face of a coal mine // Mine surveyor [Marksheyderskiy vestnik]. 2016. No. 5. P. 44–48. [In Russ.].

11. Zykov V.S., Filatov Yu.M. Hazard manifestation of gas-dynamic phenomena in working faces of coal mines // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. 2018. No. 4. P. 441–445. [In Russ.].

12. Khristianovich S.A. On the ejection wave // News of the USSR Academy of Sciences [Izvestiya AN SSSR]. 1953. No. 12. P. 1679–1688. [In Russ.].

13. Khristianovich S.A. Gas pressure distribution 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.].

14. Rakhmatullin Kh.A., Sagomonyan A.Ya., Bunimovich A.I., Zverev N.N. Gas dynamics. M.: Higher school, 1965. 723 p. [In Russ.].

15. Ovsyannikov L.V. Lectures on the basics of gas dynamics. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Research, 2003. 336 p. [In Russ.].

16. Stepanov V.V. Differential Equations Course. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 468 p. [In Russ.].