



I РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.29.27.005

УДК 622.272:516.02

© С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, С.И. Голоскоков, К.С. Лебедев, В.В. Сатонин, 2020

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



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



В.В. САТОНИН

заместитель заведующего лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: v.satonin@nc-vostnii.ru



ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА В ГОРНУЮ ВЫРАБОТКУ ИЗ ПОДЗЕМНОГО РЕЗЕРВУАРА С ДОЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

При разработке угольных месторождений на более глубоких горизонтах негативные факторы проявляются в большей степени, что существенно сдерживает добычу угля и безопасность подземных горных работ. К этим факторам относятся, в первую очередь, выделения метана в горные выработки, происходящие либо в форме внезапных выбросов, либо в виде суффлярных выделений. В статье обсуждается одна из задач суффлярных выделений метана в горную выработку из подземного резервуара. На базе фундаментальных законов сохранения массы, импульсов и энергии получены формулы для определения параметров газовой смеси в выработке при истечении метана из подземного резервуара с дозвуковой скоростью. Построены графики зависимостей параметров газовой смеси от соотношения площадей поперечного сечения горной выработки и подземного резервуара. Выявлены некоторые закономерности струйного течения газовой смеси в выработке.

Ключевые слова: ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ, ПОДЗЕМНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ, СУФЛЯРНЫЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗА, ГАЗОВОЗДУШНЫЕ СМЕСИ, ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ МАССЫ, ИМПУЛЬСОВ И ЭНЕРГИИ, ЭНТАЛЬПИЯ, ЭНТРОПИЯ, ПОКАЗАТЕЛЬ АДИАБАТЫ ПУАССОНА.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке угольных месторождений, особенно на глубоких горизонтах, как правило, происходят различного рода газодинамические процессы, негативно влияющие на безопасность и производительность горных работ. Причиной газодинамических процессов являются выделения метана в горные выработки, характерные для всех газоносных угледобывающих районов [1–5]. Газодинамические явления происходят в различных формах, главными из которых являются внезапные выбросы газа и суффлярные выделения газа в горные выработки.

Механизм внезапных выбросов очень сложен и к настоящему времени еще полностью не изучен. Исследования в этой области показали [6, 7], что выбросоопасная ситуация является совокупностью напряженно-деформированного состояния породугольного массива и давления порового метана в призабойной части угольного пласта, что характеризуется неустойчивым соотношением сил, обуславливающих внезапный выброс, и сил, препятствующих возникновению внезапного выброса.

В рамках этой концепции в работе [6] рассмотрена концептуальная модель и численный алгоритм расчета истечения газа и выброса угля из зоны внезапного отжима с образованием полости выброса. В работе [7] представлена модель состояния угольного пласта, вмещающего «слабый» слой и геологическое нарушение, а в качестве условия выброса угля в горную выработку принято нарушение равновесия той части пласта, которая находится под действием давления метана и сил трения по контакту слоя и угольного пласта. В работе обнаружена критическая длина «слабого» слоя, увеличивающаяся с ростом параметра, характеризующего увеличение порового давления метана, и показано, что с увеличением мощности слоя значения критической длины также увеличиваются.

Суффлярные выделения газа характерны для всех газоносных угледобывающих районов. Механизм суффлярного выделения газа представляет собой истечение находящегося под давлением газа из трещин, полостей и резервуаров в породугольном массиве при их вскрытии горными выработками или скважинами. В работах [8, 9] показано, что в суффляроопасных зонах значения начального га-

зовыделения также имеют высокие значения, но без характерного для выбросоопасных зон изменения вглубь массива. Кроме того, в отличие от выбросоопасных зон, газовыделение снижается во времени очень медленно, что объясняется наличием в этих зонах больших объемов скопившегося в пустотах и трещинах газа.

При исследовании суфлярных выделений, как правило, определяют только дебит газа и продолжительность выделений [4, 5]. В частности, установлено, что их продолжительность составляет от нескольких часов до нескольких лет. Дебит газа достигает 8500 м^3 в сутки, а минимальное его давление составляет не менее $0,2 \text{ МПа}$. Причем плотность суфлярных выделений возрастает с увеличением глубины горных работ.

В работах [10, 11] обсуждаются условия, при которых суфлярные выделения газа из подземных резервуаров происходят со сверх-

звуковой скоростью. В этом случае в горных выработках образуются скачки уплотнения, сопровождаемые, так называемыми, спутными потоками, движущимися с ураганной скоростью.

Здесь мы рассмотрим задачу об истечении газа из подземного резервуара в горную выработку с дозвуковой скоростью. Задачу сформулируем следующим образом.

Пусть из подземного резервуара, площадь поперечного сечения которого S_1 , втекает газ со скоростью значительно меньшей, чем скорость распространения звука, в горную выработку сечением S_2 , причем $S_2 > S_1$, а изменение сечения S_1 происходит скачкообразно (рис. 1). Параметры газа в сечении (1) будем обозначать индексами 1, а в сечении (2) — индексами 2. Зная параметры газа: давление p_1 , плотность ρ_1 , скорость v_1 в сечении (1), требуется найти параметры газа p_2, ρ_2, v_2 в сечении (2).

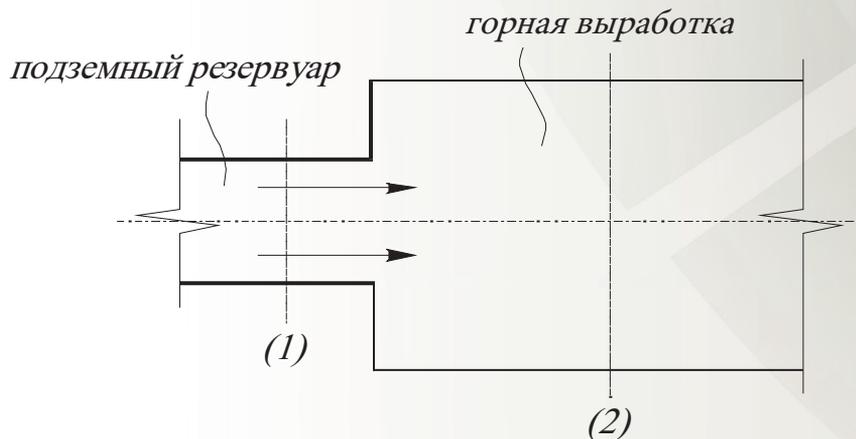


Рис. 1. Схема перетекания газа в выработку из подземного резервуара

Решение сформулированной задачи построим на базе трех фундаментальных законов сохранения: массы, количества движения и энергии. При этом мы учтем экспериментально установленный факт, что в месте скачкообразного изменения поперечного сечения при переходе из подземного резервуара в горную выработку давление на стенку горной выработки равно давлению исходного потока p_1 . Это обстоятельство объясняется тем, что скорость газа у вертикальной стенки переходного сечения мала по сравнению со скоростью

звука, поэтому элементарные волны быстро выравнивают давление во всем сечении вблизи места втекания газа.

Из фундаментальных законов сохранения [12–14]:

$$\begin{aligned} \rho_1 v_1 S_1 &= \rho_2 v_2 S_2, \\ p_1 S_1 + \rho_1 v_1^2 S_1 &= p_2 S_2 + \rho_2 v_2^2 S_2, \\ i_1 + \frac{v_1^2}{2} &= i_2 + \frac{v_2^2}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где i_1, i_2 — энтальпия газа соответственно в резервуаре и в горной выработке. Из первых двух уравнений можно прийти к следующим соотношениям:

$$v_1^2 = \frac{p_2 - p_1}{V\bar{S} - V_2} (\bar{S}V_1)^2, \quad v_2^2 = \frac{p_2 - p_1}{V\bar{S} - V_2} V_2^2, \quad (2)$$

где $\bar{S} = S_2 / S_1 > 1$ — есть отношение площадей поперечного сечения выработки и подземного резервуара. После этого третье уравнение (1) принимает вид

$$i_2 - i_1 = \frac{p_2 - p_1}{2} (V_1\bar{S} - V_2). \quad (3)$$

Как видим, уравнения (2) и (3) аналогичны уравнениям теории ударных волн, а отличие заключается лишь в том, что вместо удельного объема V_1 в данные уравнения входит величина $V_1\bar{S} = V_1S_2 / S_1$. Уравнение (3) является уравнением энергии рассматриваемого процесса. В случае идеального газа энтальпию мы можем определить по формулам [12]

$$i_1 = \frac{k_1 p_1 V_1}{k_1 - 1}, \quad i_2 = \frac{k_2 p_2 V_2}{k_2 - 1},$$

и тогда уравнение (3) принимает вид, аналогичный виду уравнения ударной адиабаты Гюгонно [15]. Разрешая это уравнение относительно p_2/p_1 , получим

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1 \left[2k_1 \frac{k_2 - 1}{k_1 - 1} - (k_2 - 1)\bar{S} \right] - V_2(k_2 - 1)}{(k_2 + 1)V_2 - (k_2 - 1)V_1\bar{S}}. \quad (4)$$

Разрешая уравнение (4) относительно V_2/V_1 , будем иметь

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1 \left[2k_1 \frac{k_2 - 1}{k_1 - 1} - (k_2 - 1)\bar{S} \right] + (k_2 - 1)\bar{S}p_2}{(k_2 - 1)p_1 + (k_2 + 1)p_2}. \quad (5)$$

Подставляя значение V_2 в формулы (2), приходим к соотношениям

$$\frac{2\rho_1 v_1^2}{\bar{S}} = \frac{(p_2 - p_1)[(k_2 + 1)p_2 + (k_2 - 1)p_1]}{p_2 - p_1(k_2 - 1) \left(\frac{k_1}{\bar{S}(k_1 - 1)} - 1 \right)}, \quad (6)$$

$$2\bar{S}\rho_1 v_2^2 = \frac{(p_2 - p_1) \left[p_1 \left(2k_1 \frac{k_2 - 1}{k_1 - 1} - \frac{k_1}{\bar{S}(k_1 - 1)} - 1 \right) \right]}{p_2 - p_1(k_2 - 1) \left(\frac{k_1}{\bar{S}(k_1 - 1)} - 1 \right)} \cdot \frac{(k_2 - 1)\bar{S} + \bar{S}(k_2 - 1)p_2}{p_2 - p_1(k_2 - 1) \left(\frac{k_1}{\bar{S}(k_1 - 1)} - 1 \right)}. \quad (7)$$

Зная ρ_1, p_1 и v_1 , мы можем определить из соотношения (6) давление p_2 . Для этого сначала приведем формулу (6) к виду

$$\frac{2k_1}{\bar{S}} \bar{v}_1^2 = \frac{(\bar{p}_2 - 1)[(k_2 + 1)\bar{p}_2 + (k_2 - 1)]}{\bar{p}_2 - (k_2 - 1) \left(\frac{k_1}{\bar{S}(k_1 - 1)} - 1 \right)}, \quad (8)$$

откуда вытекает следующее алгебраическое уравнение:

$$\bar{p}_2^2 - 2b\bar{p}_2 + c = 0, \quad (9)$$

корни которого суть

$$p_2 = b \pm \sqrt{b^2 - c}, \quad (10)$$

где

$$b = \frac{k_1 \bar{v}_1^2 + \bar{S}}{\bar{S}(k_2 + 1)},$$

$$c = \frac{k_2 - 1}{k_2 + 1} \left[\left(\frac{k_1}{\bar{S}(k_1 - 1)} - 1 \right) \frac{2k_1}{\bar{S}} \bar{v}_1^2 - 1 \right]. \quad (11)$$

В выражениях (8) – (11) величины \bar{p}_2 и \bar{v}_1 представляют собой соответственно безразмерное давление и безразмерную скорость, определяемые как $\bar{p}_2 = p_2 / p_1$, $\bar{v}_1 = v_1 / a_1$, при этом a_1 — является скоростью звука в области 1 (см. рис. 1), которую получаем по формуле $a_1 = \sqrt{k_1 p_1 / \rho_1}$.

На рис. 2 построен график функции \bar{p}_2 , определяемой по формуле (10), в зависимости от параметра \bar{S} для ряда значений относительной скорости \bar{v}_1 . В качестве исходных данных приняты следующие: показатель адиабаты Пуассона газа (метана) в сечении 1 равен $k_1 = 1,2$, а в сечении 2 (воздух) $k_2 = 1,4$.

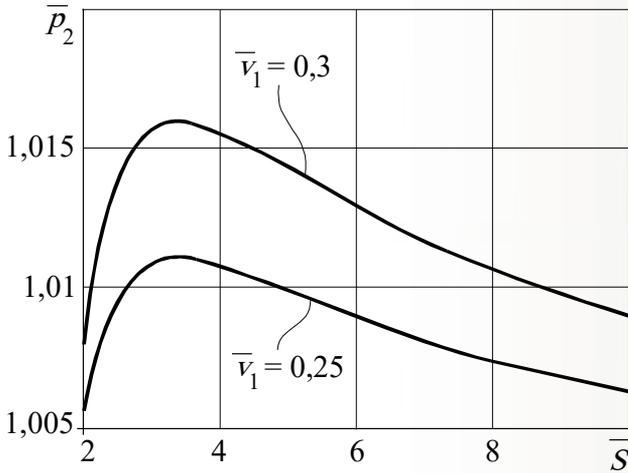


Рис. 2. Зависимость относительного давления \bar{p}_2 от параметра \bar{S}

Анализируя графики на рис. 2, отмечаем, во-первых, что функция $\bar{p}_2(\bar{S})$ имеет четко выраженный максимум при $\bar{S} = 3,39$ и, следовательно, на участке $\bar{S} \in [0; 3,39]$ функция $\bar{p}_2(\bar{S})$ монотонно возрастает, а на участке $\bar{S} \in (3,39; 10]$ — монотонно убывает. Во-вторых, точка $\bar{S} = 4,14$ является точкой перегиба функции, и поэтому на отрезке $\bar{S} \in [0; 4,14]$ график функции $\bar{p}_2(\bar{S})$ выпуклый, а на интервале $\bar{S} \in (4,14; 10]$ — вогнутый.

На рис. 3 построены графики относительного давления \bar{p}_2 в зависимости от величины относительной скорости \bar{v}_1 для ряда значений \bar{S} .

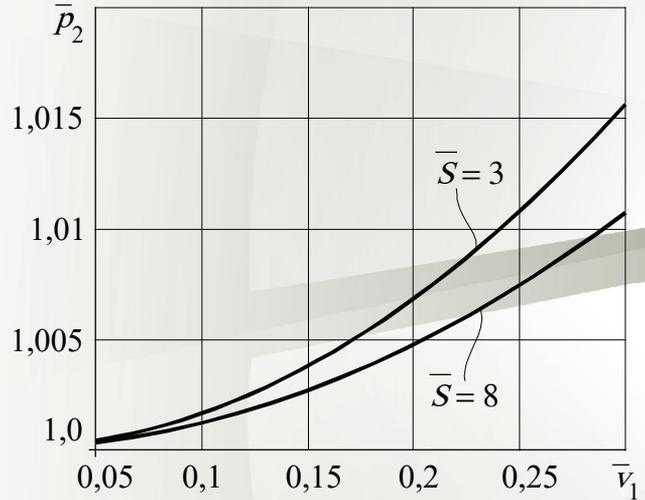


Рис. 3. Зависимость относительного давления \bar{p}_2 от относительной скорости \bar{v}_1

Графики показывают, что функция $\bar{p}_2(\bar{v}_1)$ всюду вогнута и монотонно возрастает на всем рассматриваемом интервале $\bar{v}_1 \in [0,05; 0,3]$. При этом значения функции $\bar{p}_2(\bar{v}_1)$, как уже ранее отмечалось, при $\bar{S} = 3$ выше, чем при $\bar{S} = 8$.

Зная относительное давление \bar{p}_2 , можно найти относительную плотность $\bar{\rho}_2$, преобразовав формулу (3.5) к следующему виду:

$$\bar{\rho}_2 = \frac{k_2 - 1 + (k_2 + 1)\bar{p}_2}{2k_1 \frac{k_2 - 1}{k_1 - 1} - (k_2 - 1)\bar{S} + (k_2 - 1)\bar{p}_2\bar{S}}. \quad (12)$$

Графики функции $\bar{\rho}_2(\bar{v}_1)$ (рис. 4), построенные по формуле (12) для ряда значений \bar{S} обнаруживают идентичность с графиками функции $\bar{p}_2(\bar{v}_1)$.

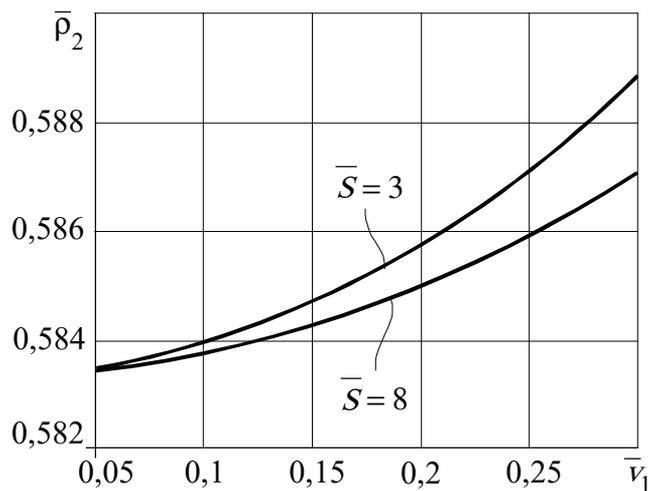


Рис. 4. Зависимость относительной плотности \bar{p}_2 от относительной скорости \bar{v}_1

Чтобы определить относительную скорость \bar{v}_2 , преобразуем формулу (7) следующим образом:

$$2k_1 \frac{\rho_1}{p_1} \frac{\bar{S}}{k_1} v_2^2 = F_2, \quad (13)$$

где

$$F_2 = \frac{(\bar{p}_2 - 1) \left[2k_1 \frac{k_2 - 1}{k_1 - 1} + (k_2 - 1)\bar{S} + (k_2 - 1)\bar{p}_2\bar{S} \right]}{\bar{p}_2 - (k_2 - 1) \left[\frac{k_1}{\bar{S}(k_1 - 1)} - 1 \right]}. \quad (14)$$

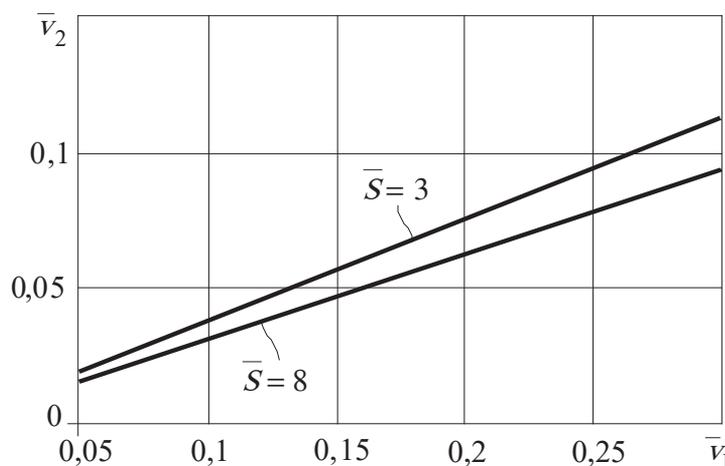


Рис. 5. Зависимость относительной скорости газа \bar{v}_2 от относительной скорости \bar{v}_1

В случае если показатели адиабаты Пуассона $k_1 = k_2 = k$, то полученные формулы для определения давления \bar{p}_2 , плотности $\bar{\rho}_2$ и скорости \bar{v}_2 существенно упрощаются. Так,

Учитывая, что величина $\sqrt{k_1 p_1 / \rho_1}$ в равенстве (13) является скоростью звука a_1 в сечении 1, найдем относительную скорость \bar{v}_2 :

$$\bar{v}_2 = \sqrt{\frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_2} \frac{F_2}{2\bar{S}k_2}}. \quad (15)$$

Анализируя полученную формулу (15), отметим, что она не содержит скорость \bar{v}_1 в явном виде. Однако входящие в формулу (15) относительное давление, определяемое по формуле (10), содержит \bar{v}_1 явно, а относительная плотность, определяемая по формуле (12), зависит от давления. В силу этого, мы можем сказать, что скорость \bar{v}_2 является сложной функцией скорости \bar{v}_1 , т. е.

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_2 \{ \bar{p}_2(\bar{v}_1), \bar{\rho}_2[\bar{p}_2(\bar{v}_1)] \} = \bar{v}_2(\bar{v}_1).$$

Графики функции $\bar{v}_2(\bar{v}_1)$, построенные по формуле (15) для ряда значений \bar{S} , представляющие собой прямые наклонные линии, составляют с осью абсцисс положительный угол (рис. 5). Следовательно, функция $\bar{v}_2(\bar{v}_1)$ является монотонно возрастающей и поэтому с увеличением относительной скорости \bar{v}_1 увеличивается также относительная скорость \bar{v}_2 .

коэффициентов b и c в (11) следует определять по формулам

$$b = \frac{k\bar{v}_1^2 + \bar{S}}{\bar{S}(k+1)},$$

$$c = \frac{k-1}{k+1} \left[\left(\frac{k}{\bar{S}(k-1)} - 1 \right) \frac{2k}{\bar{S}} \bar{v}_1^2 - 1 \right]. \quad (16)$$

А для определения относительной плотности \bar{p}_2 необходимо использовать формулу

$$\bar{p}_2 = \frac{k-1+(k+1)\bar{p}_2}{2k-(k-1)\bar{S}+(k-1)\bar{p}_2\bar{S}} \quad (17)$$

вместо формулы (12).

Относительную скорость \bar{v}_2 определяем по той же формуле (15) с той лишь разницей, что в ней надо заменить k_2 на k , а величину F_2 следует определять по формуле

$$F_2 = \frac{(\bar{p}_2 - 1) [2k + (k-1)\bar{S} + (k-1)\bar{p}_2\bar{S}]}{\bar{p}_2 - (k-1) \left[\frac{k}{\bar{S}(k-1)} - 1 \right]}. \quad (18)$$

На рис. 6 и 7 показаны графики зависимостей относительного давления \bar{p}_2 и относительной скорости \bar{v}_2 от скорости \bar{v}_1 при различных значениях показателя адиабаты Пуассона.

В качестве дополнения к сказанному отметим, что необратимые потери энергии при втекании газа из подземного резервуара в выработку имеют место как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях, что объясня-

ется образованием вихревых движений потока в месте внезапного изменения сечения. Давление p_2 при скорости v_2 меньше, чем было бы в случае плавного адиабатического расширения, а температура соответственно выше. Поэтому, если размеры поперечного сечения резервуара скачкообразно увеличиваются до сечения выработки, то энергия газа в выработке резко уменьшается по сравнению с энергией в резервуаре.

Выясним далее, как меняется энтропия газа при переходе его через скачок сечения. Поскольку [12, 13]

$$pV^k = \sigma = \exp\left(\frac{s-s_0}{c_v}\right), \quad (19)$$

то относительный рост энтропии будет определяться соотношением:

$$\frac{p_2 V_2^k}{p_1 V_1^k} = \exp\left(\frac{s_2 - s_1}{c_v}\right), \quad (20)$$

где c_v — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, s — энтропия газа, s_0 — ее начальное значение, а s_1, s_2 — энтропия газа соответственно в сечениях (1) и (2). После подстановки в соотношение (20) значений p_2/p_1 и V_2/V_1 становится очевидным, что рост энтропии значителен даже при малых изменениях поперечных сечений и при дозвуковых скоростях течения газа.

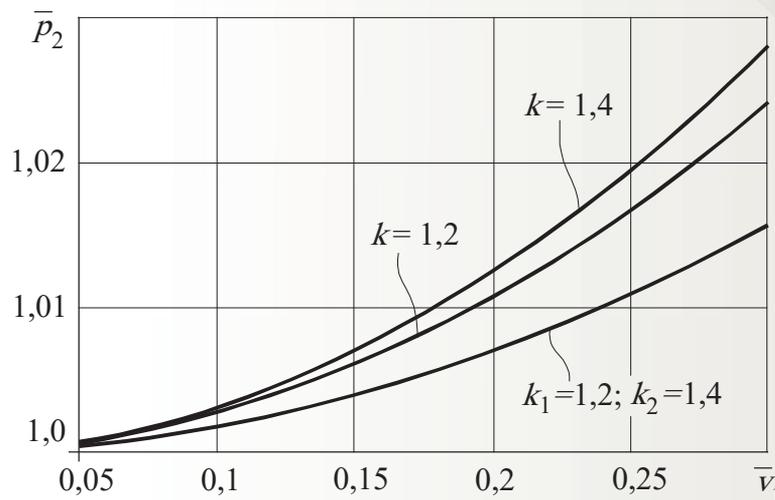


Рис. 6. Зависимость относительного давления \bar{p}_2 от скорости \bar{v}_1 при разных показателях адиабаты Пуассона

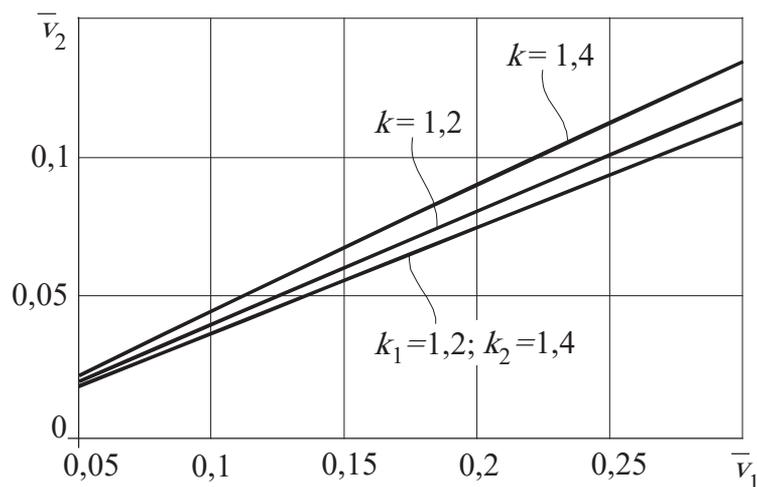


Рис. 7. Зависимость скорости \bar{v}_2 от скорости \bar{v}_1 при разных показателях адиабаты Пуассона

Природа необратимых потерь свободной энергии похожа на природу потерь энергии в случае ударных волн. Явления, связанные с необратимыми потерями энергии, поддаются анализу. Пусть, как и ранее, газ из подземного резервуара втекает в выработку, площадь поперечного сечения которой больше поперечного сечения резервуара, а давление, наоборот, ниже. Очевидно, что расширяющийся газ после удара о боковые стенки выработки затормозится и от стенок пойдет ударная волна, которая будет нестационарной. Вследствие этого энтропия ударившегося газа будет повышаться и за фронтом ударной волны движение станет вихревым, что вытекает из того обстоятельства, что всякое не одномерное и не изоэнтропическое движение должно быть обязательно вихревым [12, 13].

Если процесс втекания происходит длительно и втекающий поток стационарен, то в районе скачка сечения также установится стационарный режим. В непосредственной близости к стенкам движение будет вихревым, причем эта часть газа не будет обладать поступательным движением, а на границе с движущимся газом будет вовлекаться в движение силами вязкости, вследствие чего вся выходящая струя газа должна быть завихренной [13]. На образование вихрей и тратится необратимо часть энергии.

ВЫВОДЫ

1. Получены формулы и построены графики для определения параметров газоздущной смеси в выработке при истечении смеси из подземного резервуара с дозвуковой скоростью. В результате их анализа установлено:

- наибольшее значение относительного давления газа \bar{p}_2 в выработке имеет место при условии, что площадь поперечного сечения выработки в 3,39 раза больше поперечного сечения подземного резервуара. При других соотношениях площадей давление \bar{p}_2 уменьшается;

- относительное давление \bar{p}_2 и относительная скорость \bar{v}_2 газа в выработке увеличиваются с увеличением показателя адиабаты Пуассона, причем их наименьшие значения имеют место в тех случаях, когда показатели адиабаты Пуассона в подземном резервуаре и в горной выработке различны.

2. Если размеры сечения резервуара скачкообразно увеличиваются до сечения выработки, то энергия газа в выработке резко уменьшается по сравнению с энергией в резервуаре, а энтропия газа, наоборот, увеличивается, даже при малых изменениях сечения и при дозвуковых скоростях течения газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов О.И., Розанцев Е.С. Предупреждение внезапных выбросов угля и газа в угольных шахтах. М.: Недра, 1972. 260 с.
2. Симонов А.А., Николин В.И., Балинченко И.И. Борьба с выбросами угля и газа в шахтах. М.: Недра, 1981. 300 с.
3. Волошин Н.Е. Внезапные выбросы и способы борьбы с ними в угольных шахтах. Киев: Техника, 1985. 127 с.
4. Большинский М.И. Природа и механизм газодинамических явлений в угольных шахтах и принципы их предотвращения // Уголь Украины. 1987. № 9. С. 24–28.
5. Большинский М.И., Лысиков Б.А., Каплюхин А.А. Газодинамические явления в шахтах. Севастополь: Вебер, 2003. 284 с.
6. Трофимов В.А. Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство // Горный информационно-налитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S1. С. 391–405.
7. 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.
8. Зыков В.С. О механизме формирования выбросоопасной ситуации в очистном забое угольной шахты // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5. С. 44–48.
9. Зыков В.С., Филатов Ю.М. Проявление опасности по газодинамическим явлениям в очистных забоях угольных шахт // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 441–445.
10. Черданцев Н.В., Черданцев С.В., Ли Хи Ун, Филатов Ю.М., Шлапаков П.А. Об одном подходе к описанию суфлярных выделений газа из резервуаров угольного массива в горные выработки // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 3. С. 64–68.
11. Черданцев С.В., Черданцев Н.В., Ли Хи Ун, Лебедев К.С., 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.
12. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука. 1971. 856 с.
13. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука. 1984. 235 с.
14. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 336 с.
15. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Шлапаков Е.А., Лебедев К.С., Ерастов А.Ю. Теплофизические и газодинамические условия протекания процессов дефлаграции и детонации в пылегазовоздушных потоках горных выработок вблизи очагов самонагрева // Химическая физика и мезоскопия. 2019. № 2. С. 179–189.
16. Бартльме Ф. Газодинамика горения. М.: Энергоиздат, 1981. 280 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.29.27.005

UDC 622.272:516.02

© S.V. Cherdantsev, P.A. Shlapakov, S.I. Goloskokov, K.S. Lebedev, V.V. Satonin, 2020

S.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,

Chief 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

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

V.V. SATONIN

Deputy Head of Laboratory
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: v.satonin@nc-vostnii.ru

GAS OUTFLOW TO MINING FROM UNDERGROUND TANK WITH SUBSONIC SPEED

When developing coal deposits on deeper horizons, negative factors appear to a greater extent, which significantly hinders coal mining and the safety of underground mining. These factors include, first and foremost, methane releases into mining operations, either in the form of sudden releases or in the form of sufflar releases. The article discusses one of the tasks of sufflar methane releases into mining from an underground reservoir. Based on the fundamental laws of preservation of mass, pulses and energy, formulas were obtained for determining the parameters of the gas-air mixture in the production when methane flows out of the underground reservoir at subsonic speed. Graphs of gas-air mixture parameters dependencies on ratio of cross-sectional areas of mine and underground reservoir are constructed. Some regularities of jet flow of gas-air mixture in production were revealed.

Keywords: MINING WORKINGS, UNDERGROUND RESERVOIRS, SUFLAR GAS DISCHARGES, GAS-AIR MIXTURES, LAWS OF PRESERVATION OF MASS, PULSES AND ENERGY, ENTHALPY, ENTROPY, POISSON ADIABATES INDEX.

REFERENCES

1. Chernov O.I., Rozantsev E.S. Prevention of sudden emissions of coal and gas in coal mines. M.: Nedra, 1972. 260 p. [In Russ.].
2. Simonov A.A., Nikolin V.I., Balinchenko I.I. Combating coal and gas emissions in mines. M.: Nedra, 1981. 300 p. [In Russ.].
3. Voloshin N.E. Sudden emissions and ways to combat them in coal mines. Kiev: Technique, 1985. 127 p. [In Russ.].
4. Majority M.I. Nature and mechanism of gas dynamic phenomena in coal mines and principles of their prevention // Coal of Ukraine [Ugol Ukrainy]. 1987. No. 9. P. 24–28. [In Russ.].
5. Bolshinsky M.I., Lysikov B.A., Kaplyukhin A.A. Gas-dynamic phenomena in mines. Sevastopol: Weber, 2003. 284 p. [In Russ.].
6. Trofimov V.A. Sudden outburst of coal and gas. Carrying out coal and gas into the worked-out area // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy in-

formatsionno-nalitcheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)]. 2011. No. S1. P. 391–405. [In Russ.].

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

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

9. 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.].

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

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

12. Stanyukovich K.P. Unsteady motion of a continuous medium. M.: Science, 1971. 856 p. [In Russ.].

13. Dulov V.G., Lukyanov G.A. Gas dynamics of outflow processes. Novosibirsk: Science, 1984. 235 p. [In Russ.].

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

15. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Shlapakov E.A., Lebedev K.S., Erastov A.Yu. Thermophysical and gas-dynamic conditions of deflagration and detonation processes in the dust-gas-air flows of mine workings near self-heating centers // Chemical Physics and Mesoscopy [Khimicheskaya fizika i mezoskopiya]. 2019. No. 2. P. 179–189. [In Russ.].

16. Bartlme F. Combustion gas dynamics. M.: Energoizdat, 1981. 280 p. [In Russ.].