

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.40.88.007

УДК 622.272:516.02

© С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, С.И. Голоскоков, К.С. Лебедев, С.А. Хаймин, 2022

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



С.А. ХАЙМИН

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



ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ЗА ФРОНТОМ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ, СФОРМИРОВАННОЙ ПРИ ВЫБРОСЕ УГЛЯ И ГАЗА В ГОРНУЮ ВЫРАБОТКУ

В данной статье рассмотрена задача о течении воздушного потока за фронтом воздушной волны, обусловленной внезапным выбросом смеси «газ–уголь», в атмосферу горной выработки. В статье получено уравнение относительно давления за фронтом воздушной волны и найдено его решение графическим способом. Представлены формулы для определения скорости воздушной волны и скорости течения воздушного потока. Построены графики зависимостей давления за фронтом воздушной волны от доли объема угля в смеси «газ–уголь» и скорости воздушного потока от величины давления за фронтом воздушной волны. Выявлены некоторые закономерности процесса распространения воздушной волны и течения воздушного потока.

Ключевые слова: ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ, ВНЕЗАПНЫЕ ВЫБРОСЫ СМЕСИ «ГАЗ–УГОЛЬ», ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ МАССЫ, ИМПУЛЬСОВ И ЭНЕРГИИ, ДАВЛЕНИЕ И ПЛОТНОСТЬ ГАЗА, СКОРОСТЬ ЗВУКА В ГАЗЕ, СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ.

Введение. При ведении горных работ в шахтах происходят различные газодинамические явления [1–3]: внезапные выбросы угля, пород и газа, суфлярные выделения газа, а также ударно-волновые явления, обусловленные детонационными процессами в рудничной атмосфере. Все эти явления создают различные опасности в шахтах, приводят к травмам горнорабочих и ухудшают производственные показатели угольных предприятий. Особо отметим, что газодинамические явления происходят не только на угольных шахтах, но и на калийных, а также на предприятиях по разработке алмазных месторождений во многих странах мира.

Несмотря на многолетние исследования природы внезапных выбросов угля и газа, это явление исследовано еще не в полной мере, многие вопросы о процессе их возникновения и развития требуют дополнительного изучения.

После спокойного периода 2006–2014 гг. с увеличением глубин разработки угольных пластов до 500 м и более и возросшими темпами проведения горных выработок и ведения очистных работ число газодинамических явлений снова начало возрастать, что было отмечено в выступлениях на прошедшем 23.03.2022 заседании научно-технического совета Ростехнадзора. Поэтому интерес

к их природе в последние годы значительно вырос, о чем свидетельствует цикл опубликованных работ, существенно расширяющий представления о механизме внезапных выбросов. Здесь остановимся на анализе лишь некоторых из этих работ.

Так, в работах [4–6] представлены соотношения, определяющие величину давления газа в угольном пласте. Рассмотрены закономерности десорбции газа из угля на базе модели диффузии.

На основе многочисленных натуральных измерений в работе [7] 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 [8] приведена статистика внезапных выбросов на угольных шахтах России и сформулирована концепция возникновения внезапного выброса угля и газа в очистном забое.

В монографии [1] указано, что внезапные выбросы газа и угля приурочены к зонам геологических нарушений, с развитием которых опасность выбросов возрастает. Установлено, что наиболее опасными зонами являются участки 10 ÷ 20 метровой ширины по обе

стороны от дизъюнктивных нарушений. А в работе [9] показано, что при определенных положениях дизъюнктивных нарушений возникают значительные растягивающие горизонтальные напряжения, способствующие интенсивному процессу разрушения и, как следствие, к возникновению внезапных выбросов.

В работах [10, 11] обсуждена математическая модель породугольного массива, предположенного 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 [11] 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 длина «слабого» слоя и показано, что увеличение мощности слоя приводит к увеличению критической длины.

В статье [12] получен показатель выброоопасности зоны в окрестности забоя проводимой по угольному пласту подготовительной выработки. Его преимущество перед другими показателями заключается в том, что он получен не эмпирическим путем, а исходя из математического выражения условия развязывания внезапного выброса угля и газа. Применение данного показателя позволило повысить примерно в 2,5 раза точность текущего прогноза выбросоопасности за счет сокращения числа фактически не опасных зон, квалифицируемых по применявшемуся ранее показателю выброоопасности как опасные.

В работе [13] отмечено, что внезапные выбросы возможны не только при проведении горных выработок, но и при бурении скважин. Высокая скорость внедрения скважины в массив вызывает интенсивную газодинамическую реакцию массива, проявляющуюся в виде внезапных выбросов угля и газа в скважины, иногда очень мощных и опасных, а чаще в виде интенсивного выделения газа с выносом штыба (шлама).

Внезапный выброс угля и газа порождает в атмосфере горных выработок ударную воздушную волну, обуславливая в большей или меньшей степени различные негативные явления: опрокидывание вентиляционной струи в рудничной атмосфере, разрушение крепи выработок, поломки приборов и шахтного оборудования, включая проходческие и очистные комбайны. Из сказанного следует, что проблема зарождения и распространения ударной воздушной волны, несущей крайне негативные последствия, является весьма актуальной задачей. Однако число работ, посвященных ударным волнам в горных выработках вследствие выбросов угля и газа, незначительно, среди них отметим лишь [14–16]. Данная статья является попыткой расширить знания в области ударных воздушных волн, обусловленных внезапными выбросами, и базируется на основных положениях и результатах работ [15, 16].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Исследования показывают [5–7, 13, 14], что формирование выброоопасных областей происходит в тех случаях, когда давление газа накануне выброса составляет порядка 2 МПа, что существенно выше давления воздуха в выработке, равного атмосферному давлению $p_{ат} = 0,1$ МПа. Следовательно, в процессе выброса газ, продолжая свободно расширяться и «наткаться» на малоподвижный воздух в выработке, формирует воздушную волну. Её необходимые соотношения мы получим из свойства волны, заключающегося в том, что при переходе через фронт волны имеют место законы сохранения массы, импульсов и энергии [17], которые в переменных Эйлера будут выглядеть следующим образом:

$$\rho_1(\Theta - u_1) = \rho_2(\Theta - u_2), \quad (1)$$

$$p_2 - p_1 = \rho_1(\Theta - u_1)(u_2 - u_1), \quad (2)$$

$$\rho_1(\Theta - u_1) \left(\varepsilon_1 + \frac{u_1^2}{2} - \varepsilon_2 - \frac{u_2^2}{2} \right) = p_1 u_1 - p_2 u_2. \quad (3)$$

В уравнениях (1) – (3) приняты следующие обозначения: Θ — скорость распространения фронта воздушной волны; $p_1, \rho_1, u_1, T_1, \varepsilon_1$ — соответственно давление, плотность, скорость, температура и внутренняя удельная энергия воздушного потока за фронтом волны; $p_2, \rho_2, u_2, T_2, \varepsilon_2$ — давление, плотность, скорость, температура и внутренняя удельная энергия смеси перед фронтом волны, т. е. в невозмущенной рудничной атмосфере.

Преобразуем соотношения (1) – (3). Учитывая, что величина $V = 1/\rho$ является удельным объемом, перепишем (1) в виде:

$$\frac{\Theta - u_1}{V_1} = \frac{\Theta - u_2}{V_2}, \quad (4)$$

откуда найдем вначале:

$$\Theta = \frac{u_1 V_2 - u_2 V_1}{V_2 - V_1}, \quad (5)$$

затем после подстановки (5) в равенство (4) получим соотношение:

$$\frac{\Theta - u_1}{V_1} = \frac{u_1 - u_2}{V_2 - V_1}. \quad (6)$$

Из уравнения (2) вытекает равенство:

$$\frac{\Theta - u_1}{V_1} = \frac{p_1 - p_2}{u_1 - u_2}, \quad (7)$$

сопоставляя с которым равенство (6), получим формулу:

$$u_1 - u_2 = \sqrt{(p_1 - p_2)(V_2 - V_1)}. \quad (8)$$

Умножив и разделив правую часть равенства (8) на величину $(V_2 - V_1)$, после преобразований получим выражение:

$$u_1 - u_2 = (V_2 - V_1) \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{V_2 - V_1}}, \quad (9)$$

а из соотношений (7) и (8) придем к формуле:

$$\frac{\Theta - u_1}{V_1} = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{V_2 - V_1}}. \quad (10)$$

Далее приведем уравнение сохранения энергии (3) с учетом формулы (7) к виду:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{p_1 u_1 - p_2 u_2}{p_1 - p_2} - \frac{1}{2}(u_1^2 - u_2^2) \\ u_1 - u_2$$

и, выполнив в нем преобразования, получим равенство:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{1}{2}(u_1 - u_2)^2 \left(\frac{p_1 + p_2}{p_1 - p_2} \right), \quad (11)$$

подставив в которое формулу (8), получим еще одно выражение для внутренней энергии:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{p_1 + p_2}{2}(V_2 - V_1). \quad (12)$$

Как известно, для идеального газа, участвовавшего в политропном процессе, внутреннюю удельную энергию можно определить по формуле [17]:

$$\varepsilon_1 = \frac{p_1 V_1}{k_a - 1}, \quad \varepsilon_2 = \frac{p_2 V_2}{k_a - 1}, \quad (13)$$

где k_a — показатель адиабаты Пуассона для воздуха.

Подставив формулы (13) в равенство (12):

$$\frac{p_1 V_1}{k_a - 1} - \frac{p_2 V_2}{k_a - 1} = \frac{p_1 + p_2}{2}(V_2 - V_1)$$

и, выполнив преобразования, получим соотношение:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\frac{k_a + 1}{k_a - 1} \frac{V_2}{V_1} - 1}{\frac{k_a + 1}{k_a - 1} - \frac{V_2}{V_1}}$$

которое приведем затем к виду:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{(k_a + 1)\rho_1 - (k_a - 1)\rho_2}{(k_a + 1)\rho_2 - (k_a - 1)\rho_1}. \quad (14)$$

Далее будем полагать, что скорость вентиляционного потока u_2 перед фронтом волны значительно меньше скорости потока u_1 за ее фронтом, и поэтому можно пренебречь отношением u_2/u_1 по сравнению с единицей:

$$u_1 - u_2 = u_1 \left(1 - \frac{u_2}{u_1}\right) \approx u_1. \quad (15)$$

В силу сказанного, формулу (9) мы сначала перепишем в виде:

$$u_1 = (V_2 - V_1) \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{V_2 - V_1}}, \quad (16)$$

а затем сложим полученную формулу с формулой (10). В результате мы придем к формуле:

$$\Theta = \sqrt{V_2^2 \frac{p_1 - p_2}{V_2 - V_1}},$$

преобразовав которую, получим окончательную формулу для вычисления скорости распространения воздушной волны:

$$\Theta = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho_1 - \rho_2}}. \quad (17)$$

Поскольку $u_2 \ll u_1$, то тем более $u_2 \ll \Theta$ и, следовательно, по аналогии с формулой (15) имеем:

$$\Theta - u_2 = \Theta \left(1 - \frac{u_2}{\Theta}\right) \approx \Theta,$$

в силу чего уравнение (1) приводится к виду:

$$\rho_1(\Theta - u_1) = \rho_2\Theta,$$

откуда мы получаем формулу для определения скорости u_1 воздушного потока:

$$u_1 = \Theta \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right), \quad (18)$$

где скорость воздушной волны Θ определяется по формуле (17).

Формулы (17) и (18) не совсем удобны для использования, поскольку содержат как давления в воздушном потоке, так и его плотности. Поэтому исключим из этих формул плотности ρ_1, ρ_2 , для чего воспользуемся равенством (14), из которого найдем соотношение:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\frac{p_1}{p_2}(k_a + 1) + (k_a - 1)}{\frac{p_1}{p_2}(k_a - 1) + (k_a + 1)}, \quad (19)$$

в силу которого формулу (17) после громоздких преобразований приводим к виду:

$$\Theta = a_2 \sqrt{\frac{k_a + 1}{2k_a} \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} + \frac{k_a - 1}{k_a + 1}\right)}, \quad (20)$$

где a_2 — скорость звука в воздушном потоке перед фронтом волны, которая при температуре $T = 290^\circ\text{K}$ составляет $a_2 = 341,35$ м/с.

Подставив (20) и (19) в формулу (18), определим скорость воздушного потока за фронтом воздушной волны:

$$u_1 = 2a_2 \sqrt{\frac{k_a + 1}{2k_a} \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} + \frac{k_a - 1}{k_a + 1}\right)} \cdot \frac{\frac{p_1}{p_2} - 1}{\frac{p_1}{p_2}(k_a + 1) + k_a - 1}. \quad (21)$$

Поскольку причиной возмущения вентиляционного воздушного потока является выброс смеси «газ–уголь», то очевидно, что на границе волны выброса и воздушной волны должны выполняться условия равенства меж-

ду собой скоростей газа и воздуха, что позволяет вначале определить давление за фронтом воздушной волны, а затем и другие параметры воздушного потока.

Скорость газа при выбросе мы можем определить по формуле [15]:

$$u_{\Gamma} = \frac{2a_0}{(k-1) \cdot \sqrt{\vartheta_0 + \frac{\rho_{y0}}{\rho_0}}} \cdot \sqrt{\left(\vartheta_0 + v \frac{T_d}{T_0}\right) \left(1 - \beta \frac{k-1}{2k}\right)}, \quad (22)$$

где a_0 — скорость звука в покоящемся газе перед выбросом, которая составляет 441,93 м/с; ρ_{y0}, ρ_0 — соответственно плотность угля и начальная плотность газа; T_0 — начальная температура газа, T_d — температура газа, выделяющегося при десорбции, которая близка к T_0 ; k — показатель адиабаты Пуассона для метана; переменная величина β является отношением текущего значения давления газа p в волне выброса к давлению газа p_0 перед выбросом. Остальные величины, входящие в формулу (22) представляют собой: v — некоторый безразмерный коэффициент, принятый в статье $v = 0,8$; параметр ϑ_0 определяется по формуле [16]:

$$\vartheta_0 = \frac{1 - \psi_0}{\psi_0}, \quad (23)$$

где величина ψ_0 представляет собой долю объема угля в единице объема смеси «газ–уголь» перед выбросом.

Приравнивая правые части формул (21) и (22) при условии, что $\beta = p_1/p_0$, получим следующее равенство:

$$a_2 \sqrt{\frac{k_a + 1}{2k_a} \left(\frac{p_1}{p_2} + \frac{k_a - 1}{k_a + 1}\right)} \frac{p_1 - 1}{p_2} = \frac{p_1}{p_2} (k_a + 1) + k_a - 1$$

$$= \frac{a_0}{(k-1) \cdot \sqrt{\vartheta_0 + \frac{\rho_{y0}}{\rho_0}}} \sqrt{\left(\vartheta_0 + v \frac{T_d}{T_0}\right) \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\right]}, \quad (24)$$

где p_0 — начальное давление газа перед выбросом.

Учтем, что давление перед фронтом воздушной волны равно атмосферному давлению $p_2 = p_{ат}$, и заменим в полученном уравнении отношение давлений p_1/p_2 следующим соотношением:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{p_0}{p_{ат}} = \bar{p}_1 \cdot \bar{p}_0, \quad (25)$$

где $p_{ат}$ — атмосферное давление, $\bar{p}_0 = p_0 / p_{ат}$, $\bar{p}_1 = p_1 / p_0$.

С учетом формулы (25) перепишем уравнение (24) следующим образом:

$$\sqrt{\frac{k_a + 1}{2k_a} \left(\bar{p}_1 \bar{p}_0 + \frac{k_a - 1}{k_a + 1}\right)} \frac{\bar{p}_1 \bar{p}_0 - 1}{\bar{p}_1 \bar{p}_0 (k_a + 1) + k_a - 1} - \frac{a_0}{a_2 (k-1) \sqrt{\vartheta_0 + \frac{\rho_{y0}}{\rho_0}}} \sqrt{\left(\vartheta_0 + v \frac{T_d}{T_0}\right) \left(1 - \bar{p}_1^{\frac{k-1}{2k}}\right)} = 0. \quad (26)$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ И ИХ АНАЛИЗ

Поскольку уравнение (26) является трансцендентным, то его решение не может быть найдено в аналитическом виде. Поэтому решение уравнения (26) построим графически, для чего сформируем функцию $y(\bar{p}_1)$, представляющую собой левую часть уравнения (26). График функции $y(\bar{p}_1)$, показанный на рис. 1, построен при следующих исходных данных: $p_0 = 2$ МПа; $\rho_{y0} = 1000$ кг/м³; $\rho_{ат} = 0,668$ кг/м³; $T_d = 300$ °К, $T_0 = 290$ °К; $k = 1,3$; $k_a = 1,4$; $v = 0,8$; $\psi_0 = 0,05$; $a_0 = 441,93$ м/с; $a_2 = 341,35$ м/с. Точ-

ка пересечения графика $y(\bar{p}_1)$ с осью абсцисс представляет собой корень уравнения, равный $\bar{p}_{1,k} = 0,14$, которому соответствует давление за фронтом воздушной волны $p_1 = 0,28$ МПа.

Зная давление p_1 , по формуле (20) вычисляем скорость воздушной волны $\Theta = 543,74$ м/с, а затем по формуле (21) вычисляем скорость газоздушного потока за фронтом волны $u_1 = 274,9$ м/с.

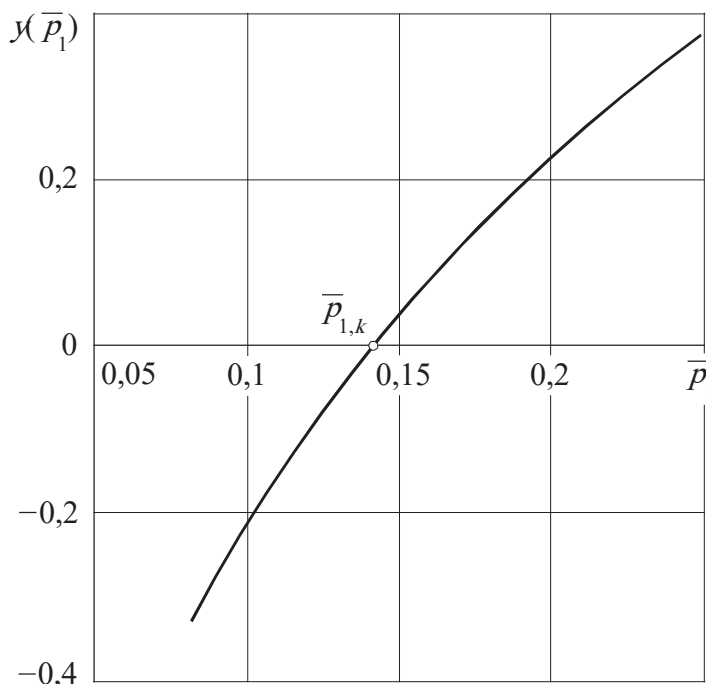


Рис. 1. К решению трансцендентного уравнения (26)

Используя процедуру графического решения уравнения (26), мы определили значения давления p_1 для ряда значений начального давления p_0 и параметра ψ_0 и построили графики, показанные на рис. 2.

Графики представляют собой вогнутые монотонно убывающие параллельные кривые, не имеющие локальных экстремумов. С увеличением параметра ψ_0 , характеризующего долю объема угля в смеси «газ–уголь», давление за фронтом воздушной волны уменьшается и, наоборот, увеличивается, если доля угля в смеси снижается. Из анализа графиков

вытекает, что чем больше начальное давление газа накануне выброса, тем выше будет скорость воздушного потока за фронтом волны.

Вычислительные процедуры показали, что параметр ν в уравнениях (24) и (26) оказывает весьма незначительное влияние на величину давления p_1 . Так, например, при тех же самых исходных параметрах и значении $\nu = 1,5$ давление $p_1 = 0,2833$ МПа и, следовательно, разница по сравнению с давлением $p_1 = 0,28$ МПа составляет всего 1,18 %. Еще меньшее влияние оказывает изменение температур, характеризуемое отношением T_d/T_0 .

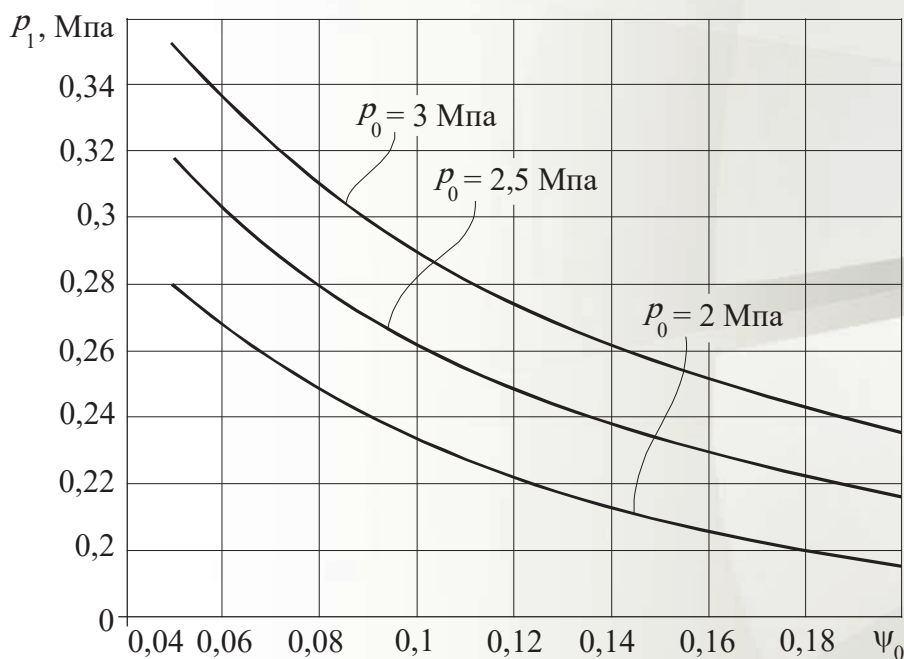


Рис. 2. Графики зависимости давления за фронтом воздушной волны от доли объема угля в смеси «газ-уголь»

По формулам (20) и (21) построены графики зависимости относительной скорости распространения волны и относительной

скорости воздушного потока от безразмерного давления за фронтом волны \bar{p}_1 (рис. 3, 4).

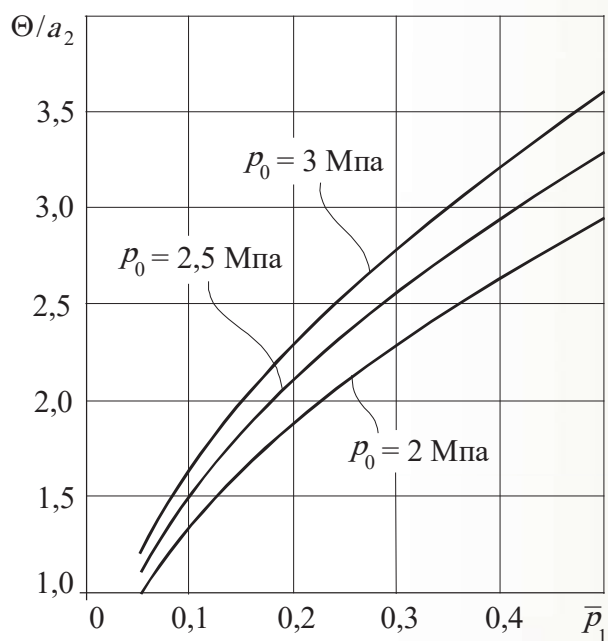


Рис. 3. Графики зависимости величины скорости распространения воздушной волны от величины давления за ее фронтом

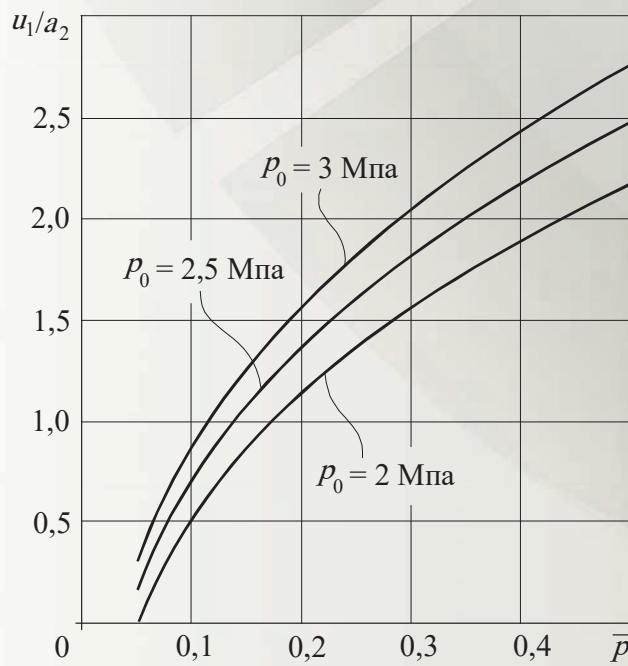


Рис. 4. Графики зависимости скорости воздушного потока от величины давления за фронтом воздушной волны

Анализ графиков показывает, что с ростом давления \bar{p}_1 скорость распространения воздушной волны и скорость воздушного потока нелинейно увеличиваются, причем графики $\Theta/a_2(\bar{p}_1)$ и $u_1/a_2(\bar{p}_1)$ представляют собой монотонно возрастающие выпуклые кривые без локальных экстремумов. Чем больше начальное давление p_0 , тем больше значения скорости волны и скорости воздушного потока.

Из графиков на рис. 4 видно, что любая ветвь графика функции $u_1/a_2(\bar{p}_1)$ состоит из двух частей. Например, на нижней части ветви, соответствующей начальному давлению $p_0 = 2$ МПа, на отрезке $\bar{p}_1 \in [0,05; 0,174]$ относительная скорость $u_1/a_2 \leq 1$ и, следовательно, при таких значениях давления движение воздуха происходит со скоростью, меньшей скорости звука. При значениях же $\bar{p}_1 > 0,174$ движение воздушного потока становится сверхзвуковым.

Таким образом, при внезапных выбросах смеси «газ–уголь» возникает воздушная волна, за фронтом которой газозадушенный поток может двигаться как с дозвуковой скоростью, так и со сверхзвуковой. Это зависит от величины давления за фронтом воздушной волны p_1 и от начального давления p_0 .

ВЫВОДЫ

1. На базе законов сохранения массы, импульсов и энергии получены формулы, опре-

деляющие скорость распространения воздушной волны и скорость течения воздушного потока за фронтом волны, обусловленные внезапным выбросом смеси «газ–уголь» в выработку.

2. Получено трансцендентное уравнение для определения давления в воздушном потоке за фронтом волны и найдено его решение графическим методом.

3. Построены графики, отражающие зависимость давления за фронтом воздушной волны от доли объема угля в смеси «газ–уголь» и зависимость скорости воздушного потока от величины давления за фронтом воздушной волны, анализ которых показал:

— с увеличением доли объема угля в смеси «газ–уголь» давление за фронтом воздушной волны уменьшается, и, наоборот, увеличивается, если доля угля в смеси снижается;

— чем больше начальное давление газа перед выбросом, тем больше скорость воздушного потока за фронтом воздушной волны;

— с ростом начального давления p_0 и давления за фронтом воздушной волны p_1 скорость воздушного потока и скорость распространения воздушной волны нелинейно возрастают;

— за фронтом воздушной волны воздушный поток может двигаться, как с дозвуковой, так и со сверхзвуковой скоростью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большинский М.И., Лысиков Б.А., Каплюхин А.А. Газодинамические явления в шахтах. Севастополь, 2003. 284 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Трофимов В.А. Определение давления газа в угольном пласте // Горный информацион-

- но-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № S1. С. 324–345.
7. Зыков В.С. О механизме формирования выбросоопасной ситуации в очистном забое угольной шахты // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5. С. 44–48.
8. 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.
9. Черданцев Н.В., Черданцев С.В., Зыков В.С. Моделирование геомеханического состояния породного массива, вмещающего выработку и дизъюнктивное нарушение // Маркшейдерский вестник. 2017. № 3. С. 51–55.
10. 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.
11. 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.
12. Зыков В.С. Обоснование показателя степени выбросоопасности призабойной части угольного пласта // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2020. № 1. С. 32–37.
13. Зыков В.С. Факторы и свойства горного массива, определяющие вид опасности по геодинамическим явлениям // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 5. С. 9–17.
14. Христианович С.А. Распределение давления газа вблизи движущейся свободной поверхности угля // Известия АН СССР. 1953. № 12. С. 1673–1678.
15. Христианович С.А. О волне выброса // Известия АН СССР. 1953. № 12. С. 1679–1688.
16. 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.
17. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 336 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.40.88.007

UDC 622.272:516.02

© S.V. Cherdantsev, P.A. Shlapakov, S.I. Goloskokov, K.S. Lebedev, S.A. Khaymin, 2022

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

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

S.A. KHAYMIN

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

FLOW OF AIR FLOW DOWNSTREAM OF AIR WAVE FRONT FORMED DURING COAL AND GAS DISCHARGE INTO MINING MINE

Methane, which is a gaseous substance and is the main cause of gas-dynamic processes, primarily sudden emissions of the gas-coal mixture into mine workings, which traditionally belong to hazardous phenomena in the development of coal seams, is released into the process of development of coal deposits by underground method, especially at great depths. This article discusses the problem of the flow of air beyond the air wave front due to the sudden release of the gas-coal mixture into the mining atmosphere. In the article, an equation was obtained regarding the pressure behind the air wave front and its solution was found in a graphical way. Formulas for determining air wave velocity and air flow velocity are presented. Graphs of dependencies of pressure behind the air wave front on the fraction of coal volume in the gas-coal mixture and air flow rate on the pressure value behind the air wave front are built. Some patterns of air wave propagation and airflow flow have been identified.

Keywords: MINING, SUDDEN EMISSIONS OF GAS-COAL MIXTURE, LAWS OF CONSERVATION OF MASS, PULSES AND ENERGY, PRESSURE AND DENSITY OF GAS, SPEED OF SOUND IN GAS, SPEED OF AIR WAVE PROPAGATION. Список литературы

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

2. 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 suffrage gas emissions from coal massif reservoirs into mining workings // Occupational safety in industry [Bezopasnost' truda v promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 64–68. [In Russ.].

3. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V., Li Hee Un, Lebedev K.S., Li K.H., Khaimin S.A. Determination of parameters of soufflé gas emissions from coal seam into mine workings // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2017. No. 1. P. 26–33. [In Russ.].

4. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. Gas dynamics of a coal seam. Part 1: Mathematical description of desorption kinetics // Physico-technical problems of mineral development [Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 2009. No. 1. P. 6–14. [In Russ.].

5. 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) [Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 2011. No. S1. P. 391–405. [In Russ.].

6. Trofimov V.A. Determination of gas pressure in a coal seam // Mining information and analytical

bulletin (scientific and technical journal) [Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 2012. No. S1. P. 324–345. [In Russ.].

7. Zykov V.S. On the mechanism of formation of an outlier situation in the treatment face of a coal mine // Surveyor's Bulletin [Markshejderskij vestnik]. 2016. No. 5. P. 44–48. [In Russ.].

8. 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 [Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineral'nyh resursov]. 2018. No. 4. P. 441–445. [In Russ.].

9. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V., Zykov V.S. Modeling of the geomechanical state of a rock massif containing mining and disjunctive disturbance // Surveyor's Bulletin [Markshejderskij vestnik]. 2017. No. 3. P. 51–55. [In Russ.].

10. 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.].

11. Cherdantsev N.V. On one approach to the calculation of coal emissions from a gas-bearing reservoir containing geological disturbances // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 8. P. 13–18. [In Russ.].

12. Zykov V.S. Substantiation of the indicator of the degree of emission hazard of the bottom-hole part of the coal seam // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2020. No. 1. P. 32–37. [In Russ.].

13. Zykov V.S. Factors and properties of the mountain range that determine the type of danger from geodynamic phenomena // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2014. No. 5. P. 9–17. [In Russ.].

14. 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.].

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

16. 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 centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2021. No. 3. P. 40–52. [In Russ.].

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