



II РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.92.37.004

УДК 622.272:516.02

© С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, Е.А. Шлапаков, В.В. Колыхалов, 2025

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



Е. А. ШЛАПАКОВ

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



В. В. КОЛЫХАЛОВ

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



ТЕЧЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ОКРЕСТНОСТИ ПОВОРОТА ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Разработка угольных месторождений, как правило, сопровождается газодинамическими процессами, к которым, в первую очередь, относятся внезапные выбросы угля и газа, инициирующие ударные волны в рудничной атмосфере. На фронтах ударных волн газозвоздушные потоки могут двигаться со сверхзвуковой скоростью. Процесс течения газа в ударных волнах на прямолинейных участках горных выработках уже рассматривался в ряде работ. В данной статье обсуждаются особенности течения сверхзвукового газозвоздушного потока на участке поворота горной выработки, а также рассматривается процесс формирования волны разрежения и некоторые ее закономерности.

Ключевые слова: ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ, ГАЗОВОЗДУШНЫЕ СМЕСИ, УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ, УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В ФОРМЕ ЭЙЛЕРА, УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ, КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ, ВОЛНА РАЗРЯЖЕНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации угольных предприятий, добывающих уголь подземным способом, особенно на глубоких горизонтах, как правило, происходят различные газодинамические процессы, существенно снижающие безопасность и производительность горных работ. К числу газодинамических процессов относятся суфлярные выделения метана и внезапные выбросы угля и газа [1].

Механизм суфлярного выделения представляет собой истечение находящегося под давлением газа из трещин и подземных полостей, расположенных в угольных пластах, при их вскрытии горными выработками или скважинами [1]. При исследовании суфлярных выделений, как правило, определяют только дебит газа и продолжительность процесса выделения. При этом форму подземных полостей не учитывают. Однако, если в состав подземной полости, наполненной газом, входит конфузор и диффузор, то после вскрытия полости газ при определенных условиях может вытекать в выработку с очень высокой скоростью [2, 3].

Существенно более опасными по сравнению с суфлярными выделениями метана являются внезапные выбросы угля и газа в рудничную атмосферу [4, 5]. Механизм внезапных выбросов к настоящему времени еще полностью не изучен. Однако многочисленные исследования в этой области показали, что 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 [4, 5].

При внезапном выбросе угля и газа всегда образуется газозвуковая волна, за фронтом которой газозвушной поток может двигаться как с дозвуковой, так и со сверхзвуковой скоростью [6, 7]. Причем с увеличением доли объема угля в смеси «газ — уголь» давление за фронтом воздушной волны уменьшается

и, наоборот, увеличивается, если доля угля в смеси снижается [7].

При выбросе газозвушной смеси со сверхзвуковой скоростью происходит образование ударной волны, сопровождающейся резким изменением плотности, давления и температуры смеси. При последующем течении газозвушной смеси на прямолинейном участке горной выработки и при наличии очагов самонагрева в окрестности выброса это может привести к возникновению детонационного процесса [8].

Поскольку система выработок на горных предприятиях представляет собой сложную разветвленную сеть, имеющую многочисленные повороты, ответвления и сопряжения выработок друг с другом, то газозвушные потоки движутся не всегда прямолинейно. В этих случаях картина течения газозвушных потоков качественно меняется. Поэтому цель данной статьи заключается в выявлении закономерностей течения газозвушных потоков со сверхзвуковыми скоростями в окрестности поворотов горных выработок.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Рассмотрим течение газозвушного потока в окрестности поворота горной выработки, в результате чего происходит излом трассы выработки и образуется тупой угол β (рис. 1).

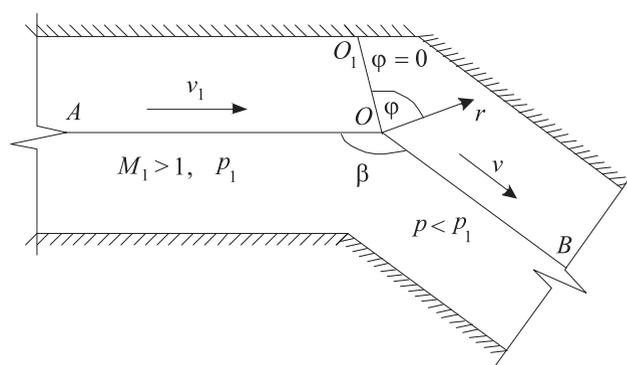


Рис. 1. Картина течения газозвушного в окрестности поворота выработки

Пусть газозвушной поток движется вдоль линии AO с первоначальной постоянной скоростью v_1 , превышающей скорость звука a_1 , и поэтому число Маха $M_1 = v_1/a_1 > 1$.

Пусть плотность ρ_1 и давление газа p_1 нам известны. Требуется определить параметры газа v, ρ, p за поворотом выработки.

Решение сформулированной задачи построим в рамках следующих допущений:

1) газоздушная смесь представляет собой идеальный политропный газ с постоянной теплоемкостью;

2) между плотностью и давлением смеси имеет место адиабата Пуассона.

Будем полагать выработку достаточно протяженной, а ее поперечное сечение круглым. В связи с этим течение газоздушной смеси по выработке будем рассматривать в полярной системе координат r, φ , в которой уравнение неразрывности представляются в виде [9–11]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_\varphi)}{\partial \varphi} = 0, \quad (1)$$

а уравнения движения Эйлера в виде [9–11]

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{\partial v_r}{\partial r} v_r + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} v_\varphi - \frac{1}{r} v_\varphi^2 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \\ \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + \frac{1}{r} v_r v_\varphi + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} v_r + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} v_\varphi &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial \varphi}. \end{aligned} \quad (2)$$

В системе уравнений (1), (2) приняты следующие обозначения: t — время; ρ, p — соответственно плотность и давление газоздушной смеси; v — скорость смеси, а v_r, v_φ — ее составляющие на оси r, φ .

Поскольку сверхзвуковое течение в выработках, а также в трубах постоянного сечения, как правило, происходит стационарно, то искомые параметры газа не зависят от времени t , и поэтому производные по времени в уравнениях (1) и (2) равны нулю. Если трасса выработки прямолинейная, то течение газа является однородным. Однако при наличии возмущения газоздушного потока происходит изменение его параметров.

В качестве источника возмущения в рассматриваемом случае является вершина O тупого угла β , на который отклоняется трасса горной выработки от первоначально прямолинейного направления (рис. 1). Проходящая через точку O линия OO_1 представляет собой

некоторую поверхность, отделяющую невозмущенный поток от возмущенного.

Будем полагать, что при повороте сверхзвукового потока все его искомые параметры зависят только от полярного угла φ , но не зависят от координаты r . Тогда уравнения (1) и (2) преобразуются к следующей системе уравнений:

$$\rho v_r + \frac{\partial(\rho v_\varphi)}{\partial \varphi} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} v_\varphi - \frac{1}{r} v_\varphi^2 = 0, \quad (4)$$

$$\frac{v_r v_\varphi}{r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial \varphi}, \quad (5)$$

которую преобразуем к более простому виду:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} = -\frac{\rho}{v_\varphi} \left(v_r + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial \varphi} = v_\varphi, \quad (7)$$

$$v_\varphi \left(v_r + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi}. \quad (8)$$

Поскольку имеет место соотношение

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = \frac{\partial p}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} = a^2 \frac{\partial \rho}{\partial \varphi},$$

где $a = \sqrt{\partial p / \partial \rho}$ — скорость звука в газе [10], то уравнение (8) перепишем следующим образом:

$$v_\varphi \left(v_r + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right) = -\frac{1}{\rho} a^2 \frac{\partial \rho}{\partial \varphi},$$

и, подставляя сюда производную $\partial \rho / \partial \varphi$ из (6), приходим к следующему уравнению:

$$\left(v_r + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right) \left(v_\varphi - \frac{a^2}{v_\varphi} \right) = 0, \quad (9)$$

которое имеет два решения:

$$v_r + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0, \quad (10)$$

$$v_\varphi - \frac{a^2}{v_\varphi} = 0. \quad (11)$$

Если решение (10) имеет место быть, то уравнение (8) приводится к виду:

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0 \quad (12)$$

и, следовательно, давление смеси не зависит от угла φ , являясь постоянной величиной:

$$p = \text{const.}$$

Но тогда энтальпию газозвдушного потока при отсутствии притока тепла ($dQ = 0$) можно определить из равенства [10, 11]:

$$di = \frac{1}{\rho} dp,$$

и поскольку $dp = 0$, то энтальпия:

$$i = \text{const.}$$

Отсюда следует, что температура газозвдушного потока, определяемая как $T = i/c_p$, также будет $T = \text{const.}$ А из уравнения Бернулли, представленного в виде [9–11]

$$\frac{v^2}{2} + c_p T = \text{const.}$$

следует, что и скорость газа является постоянной величиной $v = \text{const.}$

Поскольку постоянство искоемых параметров газа противоречит физическому смыслу рассматриваемой задачи, то равенство (10) не является решением уравнения (9). В силу этого, уравнение (9) имеет только решение (11), из которого вытекает, что скорость v_φ равна скорости звука

$$v_\varphi = a. \quad (13)$$

Тогда, разделив в уравнении неразрывности (3) переменные

$$d\varphi = -\frac{d(\rho v_\varphi)}{\rho v_r}$$

и интегрируя его, имеем:

$$\varphi = -\int \frac{d(\rho v_\varphi)}{\rho v_r} + A = -\int \frac{d(\rho a)}{\rho v_r} + A, \quad (14)$$

где A — постоянная интегрирования.

Учтем, что составляющая скорости v_r , суть:

$$v_r^2 = v^2 - v_\varphi^2, \quad (15)$$

а полную скорость v определим из уравнения Бернулли, представленного в форме [9–11]:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{a^2}{k-1} = \frac{a_0^2}{k-1}. \quad (16)$$

где a_0 — скорость звука в покоящемся газе.

Если скорость течения газа совпадает со скоростью звука

$$v = a = a_{kp}, \quad (17)$$

то параметры газа являются критическими ρ_{kp} , ρ_{kp} , a_{kp} [9–11]. Подставив формулу (17) в уравнение (16), находим связь между критической скоростью и скоростью звука в покоящемся газе

$$a_0 = a_{kp} \sqrt{\frac{k+1}{2}}. \quad (18)$$

После подстановки формул (13), (15) и (18) в уравнение (16)

$$\frac{v_r^2 + a^2}{2} + \frac{a^2}{k-1} = a_{kp}^2 \frac{k+1}{2(k-1)}$$

и выполнения элементарных преобразований, определяем скорость v_r :

$$v_r = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} (a_{kp}^2 - a^2)}. \quad (19)$$

Поскольку газ политропный, то между его давлением и плотностью имеет место следующие соотношения [9–11]

$$\frac{p}{\rho^k} = B, \quad a^2 = k \frac{p}{\rho}, \quad (20)$$

где B — некоторая постоянная величина. В результате преобразования соотношений (20) приходим к следующей формуле:

$$D a^{2/(k-1)} = \rho, \quad (21)$$

где $D = \text{const.}$

Подставив формулу (21) в (14) и учитывая, что

$$d(\rho a) = d(a^{2/(k-1)} a) = \frac{k+1}{k-1} a^{2/(k-1)} da,$$

приходим к табличному интегралу

$$\begin{aligned} \varphi &= -\frac{k+1}{k-1} \int \frac{da}{\sqrt{\frac{k+1}{k-1} (a_{kp}^2 - a^2)}} + A = \\ &= -\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arcsin\left(\frac{a}{a_{kp}}\right) + A. \end{aligned} \quad (22)$$

Учитывая, что

$$\arcsin\left(\frac{a}{a_{kp}}\right) = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{a}{a_{kp}}\right),$$

формулу (22) перепишем следующим образом:

$$\varphi = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arccos\left(\frac{a}{a_{kp}}\right) + A_1,$$

где A_1 — постоянная интегрирования, связанная с постоянной A соотношением

$$A_1 = A - \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{\pi}{2},$$

и поэтому

$$\cos\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \varphi\right) = \cos\left[\arccos\left(\frac{a}{a_{kp}}\right)\right] = \frac{a}{a_{kp}}. \quad (23)$$

Подставив формулу (23) в (19) и выполнив преобразования, приходим к выражению, позволяющему определить скорость v_r :

$$v_r = a_{kp} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \varphi\right). \quad (24)$$

Возведем в квадрат выражения (19) и (24), приравняем их правые части и в полученном выражении учтем формулу (13). В результате приходим к равенству:

$$\left[a_{kp} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \varphi\right) \right]^2 = \frac{k+1}{k-1} (a_{kp}^2 - v_\varphi^2),$$

из которого находим скорость v_φ

$$v_\varphi = a_{kp} \cos\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \varphi\right). \quad (25)$$

Зная составляющие v_r , v_φ , найдем скорость газовоздушного потока:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{v_r^2 + v_\varphi^2} = \\ &= a_{kp} \sqrt{\frac{1}{k-1} \left[k - \cos\left(2\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \varphi\right) \right]}. \end{aligned} \quad (26)$$

Для определения плотности и давления газа воспользуемся выражениями (20). В частности, из второго выражения (20) вытекает соотношение:

$$p = \frac{\rho a^2}{k}, \quad (27)$$

и, подставив его в первое выражение (20), получим равенство:

$$\frac{a^2 \rho^{1-k}}{k} = \frac{a_{kp}^2 \rho_{kp}^{1-k}}{k},$$

преобразовав которое и используя (23), определим плотность газа в сверхзвуковом потоке:

$$\rho = \rho_{kp} \left[\cos\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \varphi\right) \right]^{2/(k-1)}. \quad (28)$$

Далее, из первого соотношения (20) получим равенство:

$$\frac{p}{\rho^k} = \frac{p_{kp}}{\rho_{kp}^k},$$

которое приводим к виду:

$$p = p_{kp} \left(\frac{\rho}{\rho_{kp}} \right)^k$$

и подставив сюда (28), находим давления в сверхзвуковом потоке газа как функцию угла φ :

$$p = p_{kp} \left[\cos\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \varphi\right) \right]^{2k/(k-1)}. \quad (29)$$

Если давление и плотность найдены, то температуру определим из закона Менделеева–Клапейрона, который можно представить в виде [10]:

$$\frac{p}{\rho} = RT, \quad (30)$$

или в виде

$$\frac{p_{kp}}{\rho_{kp}} = RT_{kp}, \quad (31)$$

где R — газовая постоянная, T_{kp} — критическое значение температуры газовоздушного потока.

Разделив равенство (30) на (31) и выполнив в полученном равенстве преобразования с учетом формул (28) и (29), приходим к следующей формуле, определяющей температуру в газовоздушном потоке:

$$T = T_{kp} \cdot \cos^2 \left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \varphi \right). \quad (32)$$

По формулам (26), (28), (29), (32) построены графики изменения искомых безразмерных параметров газовоздушного потока в зависимости от изменения угла φ (рис. 2) и от изменения показателя адиабаты Пуассона k (рис. 3).

На рисунках 2 и 3 безразмерные параметры определены по формулам:

$$\bar{v} = \frac{v}{v_{kp}}, \quad \bar{p} = \frac{p}{p_{kp}}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{kp}}, \quad \bar{T} = \frac{T}{T_{kp}}.$$

Из анализа графиков, представленных на рис. 2 вытекает, что с увеличением угла φ все безразмерные параметры газа изменяются непрерывно. При этом с увеличением угла φ скорость течения газа увеличивается, а его плотность, давление и температура убывают. При увеличении показателя адиабаты Пуассона k скорость, температура и давление газа уменьшаются, а плотность увеличивается (рис. 3).

Следовательно, по сравнению с параметрами газа в ударной волне, которые изменяются скачкообразно [9–11], в рассмотренном случае они изменяются непрерывно.

Еще одним существенным отличием параметров газа на участке поворота выработки от параметров газа в ударной волне является уменьшение давления, плотности и температуры, что характерно для волны разрежения.

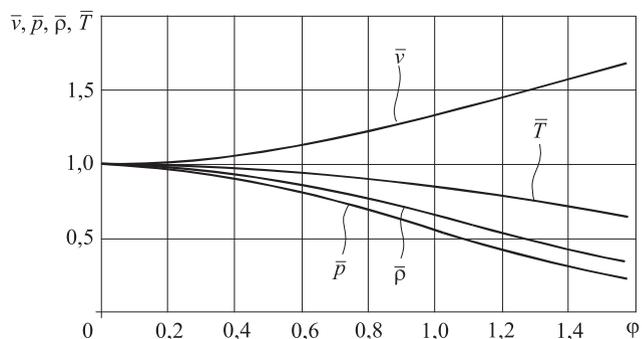


Рис. 2. Графики зависимости безразмерных параметров газа от угла φ для воздуха ($k = 1,4$)

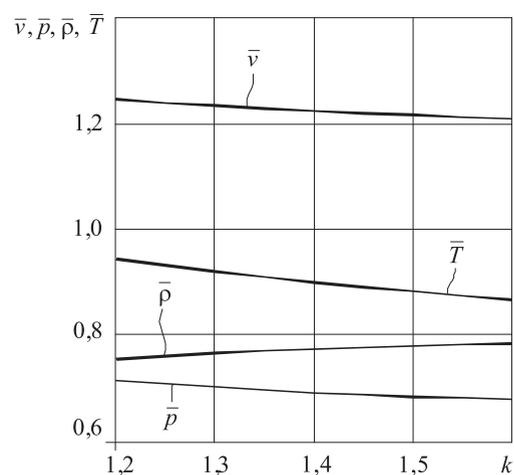


Рис. 3. Графики зависимости безразмерных параметров газа от показателя k при $\varphi = \pi/4$

Отсюда можно сделать вывод, что при повороте трассы выработки возникает волна разрежения, параметры которой можно определить по формулам (26), (28), (29), (32).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате рассмотрения течения газовоздушной смеси со сверхзвуковой скоростью в окрестности поворота горной выработки показано, что вершина угла поворота выработки является некоторым возмущением, в результате которого возникает фронт волны разрежения, при переходе через

который параметры газовой воздушного потока изменяются непрерывно.

2. Представлены формулы и построены графики изменения параметров газовой воздушного потока в волне разрежения, анализ которых позволил установить:

— с увеличением угла поворота фронта волны разрежения скорость течения газа увеличивается, а его плотность, давление и температура убывают.

— при увеличении показателя адиабаты Пуассона скорость, температура и давление газа уменьшаются, а плотность увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большинский М. И., Лысиков Б. А., Каплюхин А. А. Газодинамические явления в шахтах. Севастополь: Вебер, 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. 45–52.
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. Христианович С. А. О волне выброса // Известия АН СССР. 1953. № 12. С. 1679–1688.
5. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. М: Госгортехиздат, 1961. 363 с.
6. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., Потапов П. В., Голоскоков С. И., Лебедев К. С., Шлапаков Е. А. Математическое моделирование процесса формирования и выброса смеси «газ — уголь» в горные выработки // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2021. № 3. С. 40–52.
7. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., Голоскоков С. И., Лебедев К. С., Хаймин С. А. Течение воздушного потока за фронтом воздушной волны, сформированной при выбросе угля и газа в горную выработку // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2022. № 2. С. 66–77.
8. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., Лебедев К. С., Кольхалов В. В. Формирование детонационного процесса при внезапном выбросе газа в горную выработку со сверхзвуковой скоростью // Горный информационно аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 7. С. 62–73.
9. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика, ч. 1. М.: Физматгиз, 1963. 584 с.
10. Рахматуллин Х. А., Сагомоян А. Я., Бунимович А. И., Зверев Н. Н. Газовая динамика. М.: Высшая школа, 1965. 723 с.
11. Черняк В. Г., Суетин П. Е. Механика сплошных сред. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 352 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.92.37.004

UDC 622.272:516.02

© S. V. Cherdantsev, P. A. Shlapakov, E. A. Shlapakov, V. V. Kolykhalov, 2025

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

E. A. SHLAPAKOV

Researcher

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: lairxx@yandex.ru

V. V. KOLYKHALOV

Senior Research Associate

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: X77kem@mail.ru

THE FLOW OF A SUPERSONIC GAS-AIR STREAM IN THE VICINITY OF A MINING TURN

The development of coal deposits is usually accompanied by gas-dynamic processes, which primarily include sudden emissions of coal and gas that initiate shock waves in the mine atmosphere. At the fronts of shock waves, gas-air flows can move at supersonic speeds. The process of gas flow in shock waves in rectilinear mining sites has already been considered in a number of works. This article discusses the features of the supersonic gas-air flow at the site of the mining turn, as well as the process of rarefaction wave formation and some of its patterns.

Keywords: MINING OPERATIONS, GAS-AIR MIXTURES, CONTINUITY EQUATION, GAS MOTION EQUATIONS IN EULER FORM, BERNOULLI EQUATION, CRITICAL VELOCITY, DISCHARGE WAVE.

REFERENCES

1. Bolshinsky M. I., Lysikov B. A., Kaplyukhin A. A. Gas dynamic phenomena in mines. Sevastopol: Weber, 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 souflary gas emissions from coal reservoirs into mine workings // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 45–52. [In Russ.].
3. Cherdantsev S. V., Cherdantsev N. V., Li Hee Un, Lebedev K. S., Li K. Kh., Khaimin S. A. Determination of parameters of souffle gas emissions from a coal seam into mine workings // Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2017. No. 1. P. 26–33. [In Russ.].
4. Khristianovich S. A. About the emission wave // Bulletin of the USSR Academy of Sciences. 1953. No. 12. P. 1679–1688. [In Russ.].
5. Khodot V. V. Sudden emissions of coal and gas. Moscow: Gosgortehizdat, 1961. 363 p. [In Russ.].
6. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Potapov P. V., Goloskokov S. I., Lebedev K. S., Shlapakov E. A. Mathematical modeling of the formation and release of a 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.].
7. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Goloskokov S. I., Lebedev K. S., Khaimin S. A. The flow of air flow behind the front of the air wave formed by the release of coal and gas into the mine // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2022. No. 2. P. 66–77. [In Russ.].
8. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Lebedev K. S., Kolykhalov V. V. The formation of a detonation process during a sudden release of gas into a mining operation at supersonic speed // Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical journal) [Gornyy informatsionno analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)]. 2019. No. 7. P. 62–73. [In Russ.].
9. Kochin N. E., Kibel N. A., Rosa N. V. Theoretical hydromechanics, part 1. Moscow: Fizmatgiz, 1963. P. 584. [In Russ.].
10. Rakhmatullin H. A., Sagomonyan A. Ya., Bunimovich A. I., Zverev N. N. Gas dynamics. Moscow: Higher School, 1965. 723 p. [In Russ.].
11. Chernyak V. G., Suetin P. E. Mechanics of continuous media. Moscow: FIZMATLIT, 2006. 352 p. [In Russ.].