

Течение вязкой диспергирующей газозвушной смеси, обусловленное внезапным выбросом газа в рудничную атмосферу

С.В. Черданцев✉, П.А. Шлапаков, Е.А. Шлапаков, К.С. Лебедев, В.В. Колыхалов

АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Российская Федерация
✉ svch01@yandex.ru

Резюме: В процессе разработки угольных месторождений образуются выбросоопасные области, склонные к внезапным выбросам угля, породы и газа в горные выработки. Внезапные выбросы приводят к тяжелым авариям, нередко со смертельным исходом. Как правило, выбросы происходят с высокой скоростью, иногда превышающей скорость звука. Выброшенный газ с точки зрения газовой динамики представляет собой возмущение, под действием которого в мало-подвижном воздухе рудничной атмосферы формируется ударная волна, интенсивность которой зависит от скорости выброшенного газа. Ударная волна способна нанести травмы рабочим, разрушить крепь горной выработки и вывести из строя механизмы и технологическое оборудование, находящиеся в окрестности выброса. В этой связи задачи о течении газозвушных смесей, обусловленных внезапными выбросами, представляются весьма актуальными, как с научной, так и с практической точки зрения. В статье рассматривается задача о течении газозвушных смесей, обладающих вязкими и дисперсионными свойствами, описываемая уравнением в частных производных Кортевега – де Вриза – Бюргера, решение которого представлено в замкнутом виде. На базе вычислительных процедур построены графики, характеризующие условия течения газозвушных смесей при различных параметрах их вязкости и дисперсности. Выполнен анализ графиков и выявлен ряд закономерностей течения газозвушных смесей.

Ключевые слова: горные выработки, внезапные выбросы угля и газа, волновое число, дисперсионная функция, фаза колебаний, групповая скорость, вязкость газозвушных смесей, уравнение Кортевега – де Вриза – Бюргера

Для цитирования: Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Шлапаков Е.А., Лебедев К.С., Колыхалов В.В. Течение вязкой диспергирующей газозвушной смеси, обусловленное внезапным выбросом газа в рудничную атмосферу. *Горная промышленность*. 2024;(5):154–159. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-154-159>

Flow of a viscous dispersing gas-air mixture due to a sudden release of gas into the mine atmosphere

S.V. Cherdantsev✉, P.A. Shlapakov, E.A. Shlapakov, K.S. Lebedev, V.V. Kolykhalov

JSC Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry, Kemerovo, Russian Federation
✉ svch01@yandex.ru

Abstract: Mining of coal deposits leads to forming outburst-prone areas, which are prone to sudden emissions of coal, rock and gas into mine workings. These sudden outbursts can result in severe accidents that are often fatal. As a rule, outbursts occur at high speeds, sometimes exceeding the speed of sound. From the point of view of gas dynamics, a gas outburst is a disturbance that creates a shock wave in the quasi-stationary mine atmosphere, the intensity of which depends on the velocity of the outburst gas. The shock wave is capable of injuring miners, destroying the mine support and ruin mechanisms and technological equipment located in the vicinity of the outburst. In this regard, the problems of the gas-air mixture flow caused by a sudden outburst seem to be highly relevant, both from the scientific and practical point of view. This article considers the problem of the gas-air mixture flows with viscous and dispersive properties, described by the Korteweg–de Vries–Burgers partial differential equation, which closed-form solution is presented in the paper. Computational procedures were used as the basis to build the graphs that characterize the flow conditions of the gas-air mixtures at various parameters of their viscosity and dispersion. The graphs were analyzed and a number of patterns were revealed in the flow of the gas-air mixtures.

Keywords: mine workings, sudden outbursts of coal and gas, wave number, dispersion function, oscillation phase, group velocity, viscosity of gas-air mixtures, Korteweg–de Vries–Burgers equation

For citation: Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Shlapakov E.A., Lebedev K.S., Kolykhalov V.V. Flow of a viscous dispersing gas-air mixture due to a sudden release of gas into the mine atmosphere. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):154–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-154-159>

Введение

Внезапные выбросы угля и газа на угольных предприятиях происходят регулярно в течение многих десятилетий, практически во всех угледобывающих странах. Механизм внезапных выбросов обусловлен главным образом высоким давлением скопившегося газа в порах, трещинах и пустотах породоугольного массива [1–4].

Выбросы угля, пород и газа сопровождаются не только значительной массой выбрасываемой горной массы и большими объемами газа, но и высокой скоростью выбрасываемого газа. При этом, как показано в работе [5], скорость истечения газа из образовавшейся при выбросе полости зависит от формы полости. Процесс выброса газа можно рассматривать как некоторое возмущение, передающееся в рудничную атмосферу [2; 3]. Поскольку воздушный поток является сжимаемым, то возмущение передается потоку от слоя к слою, создавая тем самым движение газозвукового потока в виде движущейся волны.

К настоящему времени концепция волнового движения получила достаточно широкое применение во многих областях естествознания и техники и хорошо отражена как в отечественной [6–8], так и в зарубежной литературе [9–12]. Однако в горном деле эта концепция, на наш взгляд, еще не получила достаточного внимания при исследовании важнейших газодинамических процессов в рудничной атмосфере. Поэтому волновые процессы довольно слабо отражены в периодической литературе по горной тематике. Авторы этой статьи предприняли попытку хотя бы частично восполнить этот пробел, в связи с чем рассматривают задачу о течении газозвукового потока в рудничной атмосфере, обусловленного внезапным выбросом газа, с позиций волновой динамики в рамках следующих допущений:

1) течение газа по горной выработке рассматривается как одномерное;

2) газ является политропным и баротропным, в связи с чем его теплоемкость не меняется, а плотность газа зависит только от давления;

3) предполагается, что внезапные выбросы газа способны сформировать ударные волны средней и малой интенсивности.

Известно, что волновые движения описываются уравнениями в частных производных, решение которых в простейшем одномерном случае представляется в виде [13]

$$\varphi = A \cos(\varepsilon x \mp \omega t), \quad (1)$$

где φ , A – искомая функция и её амплитудное значение, характеризующие рассматриваемый волновой процесс; x – декартова координата, направленная вдоль выработки в сторону движения волны; t – время; ω – частота волнового процесса; ε – волновое число, связанное с длиной волны λ следующим образом:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Знак «минус» в (1) соответствует распространению волны в положительном направлении оси x , а знак «плюс» – в отрицательном. В дальнейшем будем рассматривать волну, движущуюся только в положительном направлении, и поэтому аргументом у тригонометрической функции в формуле (1) будет величина

$$\theta = \varepsilon x - \omega t, \quad (3)$$

представляющая собой фазу колебания волны.

Если частота ω , волновое число ε и фаза колебаний θ являются постоянными величинами, то, продифференцировав (3) по времени

$$\frac{\partial(\varepsilon x - \omega t)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

и обозначая $\partial x / \partial t = a$ – фазовую скорость перемещения волны, находим соотношение между угловой скоростью, волновым числом и фазовой скоростью волны

$$a = \omega / \varepsilon, \quad (5)$$

которое имеет место только в условиях идеальной сплошной среды.

В ряде работ авторов [14; 15] рассмотрены волновые процессы в шахтной перемычке цилиндрической формы при условии, что частота волны, волновое число и фазовая скорость являются постоянными величинами. Однако, несмотря на важность полученных в работах [14; 15] результатов, необходимо отметить их частный характер. Дело в том, что частота волны ω является в общем случае функцией волнового числа $\omega = \omega(\varepsilon)$, которую называют дисперсионной функцией, а характеризующую ею волну называют диспергирующей волной. В связи с этим скорость перемещения диспергирующей волны характеризуется не фазовой скоростью a , а групповой скоростью a_{gr} , определяемой по формуле [16; 17]

$$a_{gr} = \frac{d\omega(\varepsilon)}{d\varepsilon}.$$

К настоящему времени предложен целый ряд функций, аппроксимирующих дисперсионную функцию $\omega(\varepsilon)$. В данной статье мы будем использовать следующую функцию [16]:

$$\omega(\varepsilon) = a\varepsilon - \beta\varepsilon^3,$$

которой будет соответствовать групповая скорость

$$a_{gr} = \frac{d\omega(\varepsilon)}{d\varepsilon} = a - 3\beta\varepsilon^2, \quad (6)$$

где β является некоторым параметром, характеризующим дисперсионные свойства рассматриваемой смеси. Если $\beta = 0$, то формула (6) вырождается в формулу (5) для идеального газа.

В данной статье используются не только дисперсионные, но и вязкие свойства газозвуковых смесей, о чем далее будет сказано более подробно.

Построение решения задачи о течении вязкой диспергирующей смеси в горной выработке

В силу третьего допущения будем полагать, что течение газозвуковой смеси, сформированное внезапным выбросом газа, представляет собой ударную волну небольшой интенсивности, которая может быть описана уравнением Кортевега – де Вриза – Бюргерса [16; 17]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \quad (7)$$

где u – скорость течения газозвуковой смеси, представляющая собой искомую функцию $u = u(x, t)$; μ – параметр, характеризующий вязкие свойства газа.

Особенность уравнения (7) состоит в том, что оно обладает некоторой универсальностью, поскольку учитывает как диспергирующие свойства, характеризующиеся параметрами

тром β , так и вязкие свойства газа, характеризующиеся параметром вязкости μ .

Если вязкими свойствами газа, вызывающими диссипацию энергии, можно пренебречь, полагая параметр вязкости $\mu \rightarrow 0$, то уравнение (7) превращается в уравнение Кортевега – де Вриза, в котором учитываются только дисперсионные свойства газа. Если же параметр дисперсии газа $\beta \rightarrow 0$, то уравнение (7) вырождается в уравнение Бюргерса, в котором учитываются только вязкие свойства газа. И, наконец, если $\mu \rightarrow 0$, $\beta \rightarrow 0$, то уравнение (7) будет описывать одномерное течение идеального газа.

Из анализа уравнения (7) следует, что ввиду наличия слагаемого $u \cdot du/dx$ оно нелинейное. Кроме этого, уравнение (7) является нестационарным, поскольку искомая функция зависит также от времени t . Однако, если перейти к новой переменной X с помощью соотношения

$$X = x - W \cdot t, \tag{8}$$

представляющего собой уравнение распространения волны, движущейся в положительном направлении оси x со скоростью W , то уравнение (7) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение 3-го порядка, которое удобно представить в следующем виде:

$$\frac{d}{dX} \left(\beta \frac{d^2 u}{dX^2} \right) - \frac{d}{dX} \left(\mu \frac{du}{dX} \right) + \frac{d(u^2/2)}{dX} - W \frac{du}{dX} = 0. \tag{9}$$

Интегрируя (9), при граничных условиях

$$u|_{X \rightarrow \infty} = 0; \quad \left. \frac{du}{dX} \right|_{X \rightarrow \infty} = 0; \quad \left. \frac{d^2 u}{dX^2} \right|_{X \rightarrow \infty} = 0$$

приходим к следующему нелинейному уравнению

$$\beta \frac{d^2 u}{dX^2} - \mu \frac{du}{dX} + \frac{1}{2} u^2 - Wu = 0, \tag{10}$$

содержащему искомую функцию в квадрате. Следовательно, найти его решение в замкнутом виде не представляется возможным. Поэтому мы предположим, что искомую функцию можно представить в виде суммы

$$u(X) = \Delta u + v(X), \tag{11}$$

где $v(X)$ – приращение скорости, представляющее собой малую величину, в силу чего имеет место соотношение $1 + v/\Delta u \approx 1$; Δu – разность скоростей на противоположных сторонах фронта волны, которую следует вычислять по формуле [16]

$$\Delta u = u|_{X \rightarrow -\infty} - u|_{X \rightarrow \infty} = u_1 - u_2 = u_1 \left(1 - \frac{u_2}{u_1} \right), \tag{12}$$

где u_1 – скорость газа при выбросе; u_2 – скорость течения воздуха в рудничной атмосфере. Поскольку $u_2 \ll u_1$, то $1 - u_2/u_1 \approx 1$ и тогда из формулы (12) вытекает $\Delta u = u_1$.

Скорость фронта волны W в газозооной смеси можно рассматривать как полусумму скоростей на противоположных сторонах фронта волны [16]

$$W = \frac{u_1 + u_2}{2} = \frac{u_1}{2} = \frac{\Delta u}{2}. \tag{13}$$

Подставив (11) в уравнение (10) и выполнив в полученном уравнении преобразования с учетом формулы (13), получим уравнение

$$v'' - \frac{\mu}{\beta} v' + \frac{W}{\beta} v = 0, \tag{14}$$

в котором штрихами обозначены производные по переменной X .

Решение уравнения (14) зависит от знака величины ψ

$$\psi = \frac{\mu^2}{4\beta^2} - \frac{W}{\beta} = \frac{W}{\beta} \left(\frac{\mu^2}{4\beta W} - 1 \right).$$

Поскольку параметры вязкости и дисперсности газозооных смесей составляют величины порядка $\mu \sim 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $\beta \sim 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, а скорость фронта волны $W \sim 50 \text{ м/с}$, то в рассматриваемом случае величиной $\mu^2/(4\beta W)$ можно пренебречь по сравнению с единицей и поэтому ψ

$$\psi = -\frac{W}{\beta} < 0$$

и тогда решение уравнения (14) представляется в виде [18]

$$v = A_1 e^{\frac{\mu}{2\beta} X} \cos \left(\sqrt{\frac{W}{\beta}} \cdot X \right). \tag{15}$$

Для определения постоянной интегрирования A_1 учтем, что v – малая величина, которая по условиям задачи в начале координат составляет

$$\left. \frac{v}{u_1} \right|_{X=0} = 0,01,$$

и тогда из формулы (15) находим

$$A_1 = 0,01 \cdot u_1.$$

Подставляя найденную величину A_1 сначала в формулу (15), а затем в (11) и учитывая, что $\Delta u \approx u_1$, видим, что искомая функция

$$u(X) = u_1 \left[1 + 0,01 \exp \left(\frac{\mu X}{2\beta} \right) \cos \left(\sqrt{\frac{W}{\beta}} \cdot X \right) \right], \tag{16}$$

представляет собой совокупность экспоненциальной и тригонометрической функций.

Анализ полученных результатов

На базе представленных в статье формул выполнены вычислительные процедуры при условии, что выбрасываемый газ является метаном, имеющим следующие параметры: $\rho = 0,71 \text{ кг/м}^3$; $\eta = \zeta = 12,3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $c_p = 1,82 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}$; $c_v = 1,27 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}$.

Вычислительные процедуры начинаем с определения параметра вязкости μ , который найдем по формуле [19]

$$\mu = \frac{1}{2\rho} \left[\zeta + \frac{4}{3} \eta + k \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \tag{17}$$

где η, ζ – коэффициенты вязкости смеси; c_v, c_p – удельные теплоемкости; $k = c_p/c_v = 1,43$ – показатель адиабаты Пуассона. Подставив данные в (17), находим $\mu = 4,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Далее вычислим параметр дисперсности β , используя формулу (6), из которой находим

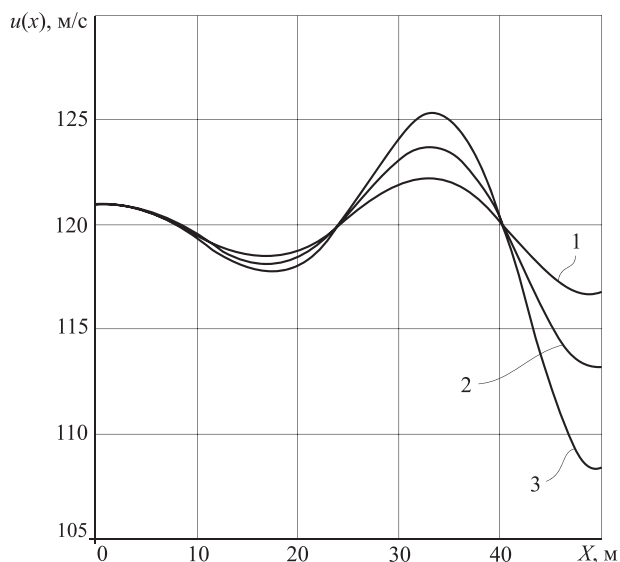


Рис. 1
Зависимость скорости газовой смеси, сформированной внезапным выбросом газа, от параметра X при $\beta = 8,95 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и различных значений параметра вязкости μ

Fig. 1
Dependence of the velocity of the gas-air mixture formed by a sudden gas outburst on the parameter X at $\beta = 8,95 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ and different values of the μ viscosity parameter

$$\beta = \frac{a(1-m)}{3\varepsilon^2}, \quad (18)$$

где коэффициент $m = a_{gr}/a$, принятый в статье, равен 0,925.

Пусть при внезапном выбросе газа зафиксирована его начальная скорость $u_1 = 120 \text{ м/с}$ и частота колебаний $\nu = 350 \text{ Гц}$. Тогда мы можем вычислить скорость фронта волны $W = u_1/2 = 60 \text{ м/с}$, ее длину $\lambda = u_1/\nu = 0,343 \text{ м}$, а затем по формуле (2) найдем волновое число $\varepsilon = 2\pi/\lambda = 18,318 \text{ м}^{-1}$. Подставив полученные значения в формулу (18) и учитывая, что величина a в формуле (18) равна скорости u_1 выбрасываемого газа, найдем $\beta = 4,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Подставляя в формулу (16) исходные и вычисленные данные, находим значения искомой функции $u(X)$ при различных параметрах вязкости μ и дисперсности β газовой смеси, а затем строим ее графики (рис. 1, 2).

На рис. 1 показаны три графика функции $u(X)$, где график 1 построен при значении $\mu = 4,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, а графики 2 и 3 – соответственно при $\mu = 7,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $\mu = 9,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Все три графика качественно схожи и представляют собой периодические функции, амплитудные значения которых нарастают с ростом переменной X . Причем большим значениям параметра вязкости μ соответствуют большие значения функции $u(X)$.

Графики функции $u(X)$, представленные на рис. 2, построены при $\mu = 4,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и различных значениях параметра дисперсности. График 1 построен при $\beta = 8,95 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, график 2 – при $\beta = 10,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, а график 3 – при $\beta = 12,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Графики на рис. 2 также имеют отчетливый периодический характер, но по сравнению с графиками на предыдущем рисунке рост амплитудных значений с увеличением параметра X проявляется в меньшей степени. Более существенное отличие графиков на рис. 2 заключается в

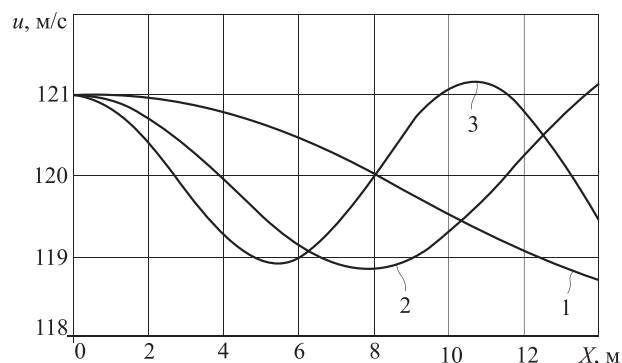


Рис. 2
Зависимость скорости газовой смеси, сформированной внезапным выбросом газа, от параметра X при $\mu = 4,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и различных значений параметра дисперсности β

Fig. 2
Dependence of the velocity of the gas-air mixture formed by a sudden gas outburst on the parameter X at $\mu = 4,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ and different values of the β dispersion parameter

том, что их периоды различны и уменьшаются с ростом параметра дисперсности β .

К сказанному добавим еще два фрагмента:

1) если параметр вязкости изменяется, а параметр дисперсности – нет, то период функции $u(X)$ также не меняется. Если же при постоянном значении параметра вязкости изменяется параметр дисперсности, то существенно изменяется и период функции $u(X)$, причем тем существеннее, чем больше параметр дисперсности;

2) при увеличении аргумента функции $u(X)$ рост амплитудных значений в большей степени проявляется при увеличении параметра вязкости, чем параметра дисперсности.

Заключение

Основные результаты исследований, приведенных в статье, заключаются в следующем:

- рассмотрено одномерное нестационарное течение газовой смеси, описываемое нелинейным уравнением в частных производных 3-го порядка, в котором учтены вязкие и дисперсионные свойства смеси;

- обоснована формула, позволяющая вычислить скорость газовой смеси в рудничной атмосфере в результате внезапного выброса метана при условии, что параметр вязкости смеси намного меньше его критического значения;

- в результате выполненных вычислительных процедур построен ряд графиков искомой функции $u(X)$, характеризующих скорость газовой смеси, анализ которых показал:

- период искомой функции $u(X)$ не изменяется, если не изменяется параметр ее дисперсности;

- при увеличении аргумента искомой функции $u(X)$ рост амплитудных значений в большей степени зависит от увеличения параметра вязкости, чем параметра дисперсности.

Список литературы / References

1. Христианович С.А. О волне выброса. *Известия АН СССР*. 1953;(12):1679–1688.
Khristianovich S.A. On the emission wave. *Izvestiya of the USSR Academy of Sciences*. 1953;(12):1679–1688. (In Russ.)
2. Ходот В.В. *Внезапные выбросы угля и газа*. М.: Госгортехиздат; 1961. 363 с.
3. Трофимов В.А. Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(S1):391–405.
Trofimov V.A. Sudden release of coal and gas. Removal of coal and gas into the developed space. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(S1):391–405. (In Russ.)
4. Черданцев Н.В. Об одном подходе к построению решения задачи о выбросе угля и метана из краевой части пласта. *Прикладная математика и механика*. 2023;87(1):81–111. <https://doi.org/10.31857/S0032823523010058>
Cherdantsev N.V. About one approach to the construction of a solution to the problem of coal and methane emissions from the marginal zone of the formation. *Prikladnaya Matematika i Mekhanika*. 2023;87(1):81–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0032823523010058>
5. Черданцев Н.В., Черданцев С.В., Ли Х.У., Филатов Ю.М., Шлапаков П.А., Лебедев К.С. Об одном подходе к описанию суффлярных выделений газа из резервуаров угольного массива в горные выработки. *Безопасность труда в промышленности*. 2017;(3):45–52.
Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V., Lee H.U., Filatov Y.M., Shlapakov P.A., Lebedev K.S. On one approach to the description of soufflé gas emissions from coal reservoirs into mine workings. *Occupational Safety in Industry*. 2017;(3):45–52. (In Russ.)
6. Голубятников А.Н., Украинский Д.В. О точных аналитических решениях уравнений газовой динамики. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2020;(3):141–150. <https://doi.org/10.31857/S0568528120030044>
Golubyatnikov A.N., Ukrainskii D.V. On exact analytical solutions of gas dynamic equations. *Fluid Dynamics*. 2020;55(3):423–432. <https://doi.org/10.1134/S0015462820030044>
7. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Волны уплотнения с частичной и полной дисперсией в газодисперсной среде с фазовыми переходами. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2022;(3):44–55.
Golubkina I.V., Osiptsov A.N. Partly and fully dispersed compression waves in a gas-droplet mixture with phase transitions. *Fluid Dynamics*. 2022;57(3):261–272. <https://doi.org/10.1134/S0015462822030065>
8. Булатов В.В., Владимиров И.Ю. Внутренние гравитационные волны от осциллирующего источника возмущений в стратифицированной среде с двухмерными сдвиговыми течениями. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2022;(4):60–68. <https://doi.org/10.31857/S0568528122040016>
Bulatov V.V., Vladimirov I.Yu. Internal gravity waves generated by an oscillating disturbance source in a stratified medium in the presence of two-dimensional shear flows. *Fluid Dynamics*. 2022;57(4):477–485. <https://doi.org/10.1134/S0015462822040016>
9. Голубев А.Ю., Потокин Г.А. Пульсации давления на поверхности трехмерных обтекаемых выступающих тел. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2020;(1):57–63. <https://doi.org/10.31857/S0568528120010065>
Golubev A.Yu., Potokin G.A. Pressure fluctuations on the surfaces of three-dimensional protruding bodies in a gas flow. *Fluid Dynamics*. 2020;55(1):55–61. <https://doi.org/10.1134/S0015462820010065>
10. Sizykh G.B. Integral invariant of ideal gas flows behind a detached bow shock. *Fluid Dynamics*. 2021;56(8):1027–1030. <https://doi.org/10.1134/S0015462821080097>
11. Шевелев Ю.Д. Примеры установившихся осесимметричных течений идеальной несжимаемой жидкости. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2022;(2):3–13. <https://doi.org/10.31857/S0568528122020074>
Shevelev Yu.D. Examples of steady axisymmetric flows of an ideal incompressible fluid. *Fluid Dynamics*. 2022;57(2):111–121. <https://doi.org/10.1134/S0015462822020074>
12. Gubaidullin D.A., Tukmakov D.A. Numerical study of the effect of polydispersity on the mass transfer of the dispersed phase during the passage of a shock wave through a gas suspension. *Fluid Dynamics*. 2023;58(7):1373–1383. <https://doi.org/10.1134/S0015462823601997>
13. Островский Л.А., Потапов А.И. *Введение в теорию модулированных волн*. М.: Физматлит; 2003. 400 с.
14. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Голоскоков С.И., Ерастов А.Ю., Лебедев К.С., Шлапаков Е.А. О формировании напряженного состояния в шахтной перемычке при прохождении через нее ударной волны. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2023;(1):47–62. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2023.40.18.005>
Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Goloskokov S.I., Erastov A.Yu., Lebedev K.S., Shlapakov E.A. On formation of stress state in shaft bridge when shock wave passes through it. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2023;(1):47–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2023.40.18.005>

15. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Ерастов А.Ю., Лебедев К.С. Напряженное состояние в шахтной перемычке, обусловленное давлением на фронте ударной волны. *Безопасность труда в промышленности*. 2023;(2):7–14. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-2-7-14>
Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Erastov A.Yu., Lebedev K.S. Stress state in a shaft jumper due to pressure at the shock wave front. *Occupational Safety in Industry*. 2023;(2):7–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-2-7-14>
16. Карпман В.И. *Нелинейные волны в диспергирующих средах*. М.: Наука; 1973. 176 с.
17. Уизем Дж. *Линейные и нелинейные волны*. М.: Мир; 1977. 622 с.
18. Понтрягин Л.С. *Обыкновенные дифференциальные уравнения*. М.: Наука; 1974. 331 с.
19. Стон Т., Стюарт И. *Теория катастроф и ее приложения*. М.: Физматлит; 1980. 608 с.

Информация об авторах

Черданцев Сергей Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: svch01@yandex.ru

Шлапаков Павел Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: shlapak1978@mail.ru

Шлапаков Евгений Александрович – старший научный сотрудник, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: lairxx@ya.ru

Лебедев Кирилл Сергеевич – старший научный сотрудник, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: lebedevks1987@yandex.ru

Колыхалов Виктор Валентинович – старший научный сотрудник, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: x77kem@mail.ru

Information about the authors

Sergei V. Cherdantsev – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, JSC Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry (JSC "NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: svch01@yandex.ru

Pavel A. Shlapakov – Can. Sci. (Eng.), Laboratory Head, JSC Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry (JSC NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: shlapak1978@mail.ru

Evgeniy A. Shlapakov – Senior Researcher, JSC Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry (JSC NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: lairxx@ya.ru

Kirill S. Lebedev – Senior Researcher, JSC Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry (JSC NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: lebedevks1987@yandex.ru

Victor V. Kolykhalov – Senior Researcher, JSC Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry (JSC NC VOSTNII), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: x77kem@mail.ru

Article info

Received: 15.07.2024

Revised: 27.08.2024

Accepted: 10.09.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.07.2024

Поступила после рецензирования: 27.08.2024

Принята к публикации: 10.09.2024