

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-5-62-68

УДК 622.272: 516.02

**ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЯР ФРОНТА РЕАКЦИИ
В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ ВБЛИЗИ ОЧАГОВ САМОНАГРЕВАНИЯ**

**GENERATION AND ANALYSIS OF NON-STATIONARY POLARS OF REACTION
FRONT IN THE GAS FLOWS NEAR THE CENTERS OF SELF-HEATING**

Черданцев Сергей Васильевич¹,
доктор техн. наук, главный научный сотрудник, e-mail: svch01@yandex.ru
Sergei V. Cherdantsev, Dr. Sc. in Engineering
Шлапаков Павел Александрович¹,
канд. техн. наук, заведующий лабораторией, e-mail: shlapak1978@mail.ru
Pavel A Shlapakov, C. Sc. in Engineering, Laboratory Head
Голоскоков Сергей Иванович¹,
канд. техн. наук, заведующий лабораторией, e-mail: s.goloskokov@nc-vostnii.ru
Sergei I. Goloskokov, Can. Sc., Laboratory Head
Колыхалов Виктор Валентинович¹,
заместитель заведующего лабораторией, e-mail: x77kem@mail.ru
Victor V. Kolykhalov, Deputy head of the laboratory
Сатонин Владимир Владимирович¹,
заместитель заведующего лабораторией, e-mail: Satonin.vv@mail.ru
Vladimir V. Satonin, Deputy head of the laboratory
Липина Галина Александровна²,
старший преподаватель, e-mail: a746025@yandex.ru
Galina A. Lipina, senior lecturer of the Department of mathematics

¹АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), 650002, Россия, г. Кемерово, ул. Институтская, 3
Join-stock company "Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mining industry" (JC "NC VOSTNII"), str. Institutskaya, 3, Kemerovo, 650002, Russian Federation

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация:

Подземная разработка угольных месторождений, как правило, сопровождается проявлением теплофизических и газодинамических процессов, носящих негативный характер, как в угольных массивах, так и в атмосфере горных выработок. При этом теплофизические процессы обусловлены предрасположенностью угля к кинетическим процессам окисления, результатом которых является образование в угольных скоплениях очагов самонагрева, приводящих к повышению температуры горных пород и газозвушных смесей в горных выработках. Это существенно увеличивает склонность газозвушных смесей к инициированию в них процессов дефлаграции и детонации, что в условиях угольных шахт представляет особую опасность. В статье обсуждается нестационарное течение газозвушных смесей в атмосфере горных выработок, находящихся в окрестности очагов самонагрева, являющихся тепловыми источниками, создающими зону подвода теплоты. На базе законов сохранения массы, импульсов и энергии получены основные соотношения между термо- и газодинамическими параметрами газозвушных смесей, пересекающими зону подвода теплоты. Построены диаграммы поляр фронта реакции, на базе которых обнаружены некоторые закономерности протекания нестационарных дефлаграционных и детонационных процессов в газозвушных потоках горных выработок.

Ключевые слова: горные выработки, газозвушные смеси, очаги самонагревания, зона подвода теплоты, законы сохранения массы, импульсов и энергии, энтальпия, полярные фронты реакции, скачки уплотнения и разряжения.

Abstract:

Underground mining of coal deposits, as a rule, is accompanied by the manifestation of negative thermophysical and gas-dynamic processes, both in unworked coal and in the atmosphere of mine workings. At the same time, thermophysical processes are caused by the predisposition of coal to kinetic oxidation processes, which result in the formation of points of self-heating in coal accumulations, which lead to an increase in the temperature of rock strata and gas-air mixtures in mine workings. This significantly increases the propensity of gas-air mixtures to initiate deflagration and detonation processes therein, which is particularly dangerous in coal mines. The article discusses the non-stationary flow of gas-air mixtures in the atmosphere of mine workings located in the vicinity of self-heating centers, which are heat sources that create a heat supply zone. The main relations between the thermo- and gas-dynamic parameters of gas-air mixtures crossing the heat supply zone are obtained on the basis of mass, momentum, and energy conservation laws. Diagrams of the polar reaction are built, on the basis of which some regularities of non-stationary deflagration and detonation processes in gas-air flows of mine workings are revealed.

Key words: mine workings, gas-air mixtures, self-heating centers, heat supply zone, laws of conservation of mass, momentum and energy, enthalpy, reaction front polars, compression shock compaction jumps.

Введение

Разработка угольных месторождений, как правило, обусловлена протеканием негативных процессов, в первую очередь образованием очагов самонагревания [1-2], представляющих собой тепловые источники, приводящие к изменению температурного поля в угольных целиках и массивах горных пород в окрестности горных выработок [3, 4]. Это приводит к образованию некоторой зоны, обладающей повышенной температурой по сравнению с температурой в смежных областях выработки. В указанную зону, называемую зоной подвода теплоты, непрерывно подводится тепловая энергия от очагов самонагревания [5]. Из сказанного вытекает, что в горной выработке существуют области 1 и 2, разделяемые зоной подвода теплоты (рис. 1).

Очевидно, что в зоне подвода теплоты существенно увеличивается склонность смесей к протеканию химических реакций, в частности, к зажиганию и горению, о чем сказано в многочисленных работах, среди которых мы отметим следующие [6-11].

Процессы горения, как правило, протекают не

стационарно, поскольку скорость пламени, распространяющегося по выработке, в большинстве случаев не является постоянной величиной [12]. Так, если скорость увеличивается, то горение переходит в детонацию, если же скорость уменьшается, то пламя затухает, причем в пульсационном режиме [12]. В тех случаях, когда скорость детонационного процесса не изменяется, процесс переходит в стационарное состояние Чепмена-Жуге [13]. Сферически или цилиндрически-симметричные пламя или волны детонации также являются нестационарными. При этом внутри волны детонации происходят нестационарные газодинамические процессы, проявляющиеся в форме взрывов большой мощности, что приводит к особо тяжким авариям.

Из сказанного вытекает, что исследование дефлаграционных и детонационных процессов вблизи очагов самонагревания является весьма актуальной задачей, решение которой позволит установить безопасные режимы течения газозвушных смесей на добычных участках угольных шахт.

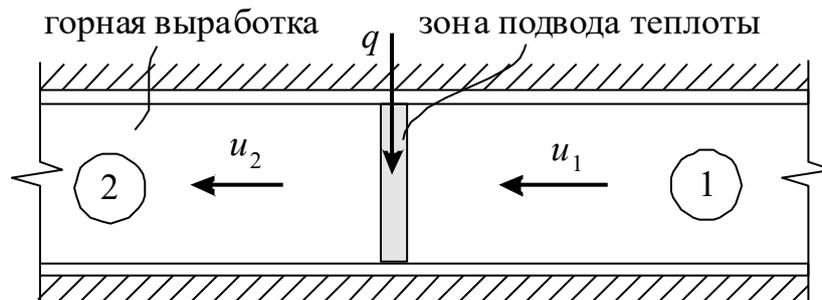


Рис. 1. Течение газозвушной смеси в выработке с подводом теплоты
Fig. 1. The flow of the gas-air mixture in the development with the supply of heat

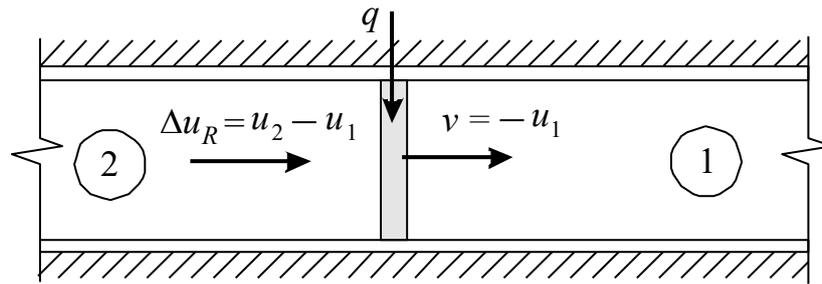


Рис. 2. К выводу уравнений нестационарного фронта реакции при подвижном фронте реакции

Fig. 2. The derivation of equations of non-stationary reaction front with the mobile reaction front

Постановка и решение задачи о нестационарном течении газозвушных смесей в горных выработках вблизи от очагов самонагревания

Вначале рассмотрим стационарное течение газозвушной смеси (рис. 1). Для этого воспользуемся системой уравнений одномерного течения сплошной среды [14]

$$\rho_2 u_2 = \rho_1 u_1, \quad p_2 + \rho_2 u_2^2 = p_1 + \rho_1 u_1^2, \quad \frac{u_2^2}{2} + i_2 = \frac{u_1^2}{2} + i_1 + q. \quad (1)$$

В уравнениях (1) приняты следующие обозначения: $u_1, u_2, \rho_1, \rho_2, p_1, p_2, i_1, i_2$ — соответственно скорость, плотность, давление и энтальпия смеси в областях 1 и 2 (см. рис. 1); q — подведенное на единицу массы смеси количество теплоты от очага самонагревания, которое будем считать положительным. Поскольку энтальпию в зонах 1 и 2 мы можем определить по формулам [14]:

$$i_1 = \frac{kp_1}{(k-1)\rho_1}, \quad i_2 = \frac{kp_2}{(k-1)\rho_2},$$

то после их подстановки в третье уравнение (1) и выполнения преобразований мы получим формулу

$$\bar{u}_2^2 = 1 + \frac{1}{u_1^2} \left[2q - \frac{2k}{k-1} \left(\frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) \right], \quad (2)$$

выражающую относительную скорость $\bar{u}_2 = u_2/u_1$ смеси и содержащую показатель адиабаты Пуассона k .

Далее из первого и второго уравнений (1) получим формулу

$$p_2 = p_1 + \rho_1 u_1^2 (1 - \bar{u}_2), \quad (3)$$

в силу которой формула (2) преобразуется к виду

$$\bar{u}_2^2 = 1 + \frac{2}{u_1^2} \left[q - \frac{a_1^2}{k-1} (1 - \bar{u}_2) (M_1^2 \bar{u}_2 - 1) \right], \quad (4)$$

где $a_1 = \sqrt{k p_1 / \rho_1}$ — скорость звука в области 1.

Учтем, что энтальпию смеси можно выразить по формуле [14]:

$$i = \frac{a^2}{k-1} = c_p T,$$

содержащей температуру T смеси по Кельвину, и поэтому формулу (4) приведем к уравнению

$$\bar{u}_2^2 - 2 \frac{k M_1^2 + 1}{M_1^2 (k+1)} \bar{u}_2 + \frac{(k-1) M_1^2 + 2 \bar{q}}{M_1^2 (k+1)} = 0,$$

корнями которого являются два значения

$$\bar{u}_2 = 1 - \frac{1}{(k+1) M_1^2} \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1) M_1^2 \bar{q}} \right], \quad (5)$$

одно из которых соответствует знаку «плюс» в формуле (5), а второе — знаку «минус». В формуле (5) обозначено: $M_1 = u_1/a_1$ — число Маха в области 1, $\bar{q} = q/(c_p T_1)$ — число Дамкелера, представляющее собой безразмерную величину подводимой теплоты.

Далее из первого уравнения системы (1) вытекает соотношение

$$\bar{p}_2 = \frac{(k+1) M_1^2}{(k+1) M_1^2 - \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1) M_1^2 \bar{q}} \right]}, \quad (6)$$

в котором $\bar{p}_2 = \rho_2/\rho_1$ — безразмерная плотность. Преобразовав формулу (3) к виду

$$\bar{p}_2 = 1 + k M_1^2 (1 - \bar{u}_2),$$

где $\bar{p}_2 = p_2/p_1$, и учитывая (5), мы получим относительное давление

$$\bar{p}_2 = 1 + \frac{k}{k+1} \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1) M_1^2 \bar{q}} \right]. \quad (7)$$

Для определения относительной температуры $\bar{T}_2 = T_2/T_1$ смеси воспользуемся законом Менделеева — Клапейрона, из которого получим формулу

$$\bar{T}_2 = \bar{p}_2 / \bar{p}_2, \quad (8)$$

позволяющую выполнить анализ состояния смеси в области 2 выработки.

Формулы (2) — (8) справедливы для системы, имеющей неподвижный фронт реакции, пересекаемый со скоростью u_1 . При этом продукты реакции движутся за фронтом со скоростью u_2 (рис. 1).

Основное отличие нестационарного струйного течения от стационарного заключается в том, что струйка тока в нестационарном течении в различные моменты времени не состоит из одних и тех же частиц, как в стационарном течении. Следовательно, газо- и термодинамические состояния газозвушных потоков зависят не только от координат, но и от времени t .

Чтобы получить основные формулы и соотношения для нестационарного фронта, перейдем к системе, в которой фронт реакции является подвижным и встречается с несгоревшей газовой смесью со скоростью

$$v = -u_1. \quad (9)$$

Скорость реакции сгорания при этом определим по формуле (рис. 2)

$$\Delta u_R = u_2 - u_1. \quad (10)$$

Подставляя формулы (9) и (10) в формулы (5) — (8), приходим к следующим соотношениям:

$$\frac{\Delta u_R}{a_1} = \frac{1}{k+1} \frac{a_1}{v} \left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \pm \sqrt{\left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \right]^2 - 2(k+1) \left(\frac{v}{a_1} \right)^2 \bar{q}} \right],$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{k}{k+1} \left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \pm \sqrt{\left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \right]^2 - 2(k+1) \left(\frac{v}{a_1} \right)^2 \bar{q}} \right], \quad (11)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1 - \frac{k}{k+1} \left(\frac{a_1}{v} \right)^2 \left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \pm \sqrt{\left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \right]^2 - 2(k+1) \left(\frac{v}{a_1} \right)^2 \bar{q}} \right],$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 = \frac{p_2 \rho_1}{p_1 \rho_2}.$$

Полученные формулы (11) полностью определяют параметры прямого фронта реакции в нестационарном газозвуковом потоке.

Анализ полученных результатов

Из первых двух уравнений (11) найдем соотношение:

$$\frac{\Delta u_R}{a_1} = \frac{1}{k} \frac{a_1}{v} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right), \quad (12)$$

анализ которого позволяет сделать следующие заключения. Если фронт реакции набегаает в покоящуюся свежую смесь с постоянной скоростью v , то в случае сверхзвукового фронта реакции за счет $p_2 > p_1$ величина Δu_R имеет тот же знак, что и v . Следовательно, $u_2 > 0$ и поэтому продукты реакции движутся вслед за фронтом реакции (рис. 2). При дозвуковом фронте реакции $p_2 < p_1$, поэтому $\Delta u_R < 0$ и, следовательно, $u_2 < 0$. Это значит, что продукты реакции и реакционный фронт движутся в противоположных направлениях.

Из сказанного вытекает принципиальное различие между дозвуковым фронтом реакции (дефлаграцией) и сверхзвуковым фронтом реакции (детонацией) при нестационарном течении газозвукового потока.

Приравнивая правые части первой формулы (11) и формулы (12), получим равенство

$$\frac{1}{k+1} \left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \pm \sqrt{\left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \right]^2 - 2(k+1) \left(\frac{v}{a_1} \right)^2 \bar{q}} \right] = \frac{1}{k} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right),$$

которое мы можем привести к виду

$$(k+1)P^2 - 2kP \left[\left(\frac{v}{a_1} \right)^2 - 1 \right] = -2k^2 \left(\frac{v}{a_1} \right)^2 \bar{q},$$

откуда найдем величину

$$\frac{v}{a_1} = \pm \frac{1}{\sqrt{k}} \sqrt{\frac{(k+1)P^2 + 2kP}{2P - 2k\bar{q}}}, \quad (13)$$

где

$$P = \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right). \quad (14)$$

Подставляя формулу (13) с учетом (14) в формулу (13), получаем выражение

$$\frac{\Delta u_R}{a_1} = \pm \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \left[\left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) - k\bar{q} \right]}{1 + \frac{k+1}{2k} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)}}, \quad (15)$$

представляющее собой уравнение поляры фронта реакции. При этом для сверхзвукового фронта реакции, движущегося вдоль x , при $q = 0$ уравнение (15) переходит в уравнение для нестационарной ударной поляры

$$\frac{\Delta u_R}{a_1} = \pm \frac{1}{k} \cdot \frac{\frac{p_2}{p_1} - 1}{\sqrt{1 + \frac{k+1}{2k} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)}}. \quad (16)$$

Уравнения (15) и (16) являются одним из основных средств для исследования фронтов реакций в нестационарных газозвуковых потоках.

В зависимости от вида рассматриваемой задачи существует два способа для построения поляры. В первом способе поляру можно построить в функции отношения давления, во втором способе — в функции отношения скорости звука к изменению скорости во фронте реакции. При этом отношение скоростей v/a_1 и количество теплоты \bar{q} служат в качестве параметров. Нам представляется более наглядным и удобным первый способ, который мы и будем использовать для анализа фронтов реакции в газозвуковых потоках горных выработок.

На рис. 3 показаны поляры фронтов реакции, построенные с помощью формул (15) и (16) на плоскости $(\Delta u_R/a_1, p_2/p_1)$ при различных числах Дамкелера \bar{q}_1 . Верхняя ветвь соответствует сверхзвуковому фронту реакции, которую назовем ветвью детонации, а нижняя ветвь соответствует дозвуковому фронту реакции, называемую ветвью дефлаграции. Толстые сплошные линии соответствуют волнам, распространяющимся в направлении оси абсцисс, а пунктирные линии соответствуют волнам разрежения.

Обратим внимание, что диаграмма поляр является симметричной относительно вертикальной оси. При этом правая часть

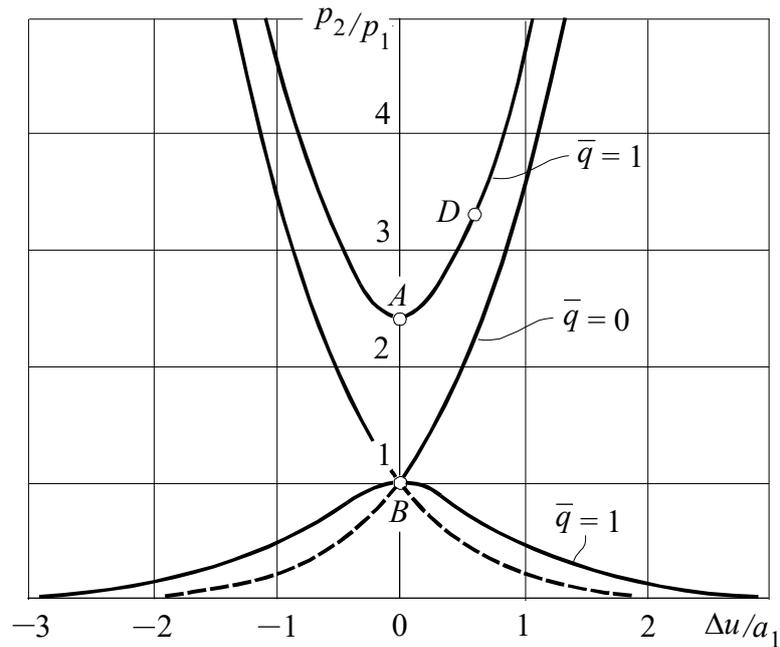


Рис. 3. Диаграмма поляра фронта реакции в плоскости $(\Delta u/a_1, p_2/p_1)$ при различных числах Дамкелера
 Fig. 3. The graph of the reaction front polar in the plane $(\Delta u/a_1, p_2/p_1)$ at various Damkohler numbers

диаграммы построена при условии, что в формулах (15), (16) учитывается знак «плюс», а значения на левой части диаграммы получены при учете в этих формулах знака «минус». Это означает, что существуют волны детонации и дефлаграции, распространяющиеся как в положительном, так и в отрицательном направлении оси x .

Каждой точке поляры соответствует совершенно определенное значение скорости v , которое в точке A достигает бесконечности (рис. 3), а на дозвуковой поляре фронта реакции скорость v в точке B равна нулю.

С повышением количества подводимой теплоты сверхзвуковая ветвь (ветвь детонации) смещается вверх (рис. 3). Дозвуковая ветвь всегда проходит через точку $p/p_1 = 1$, но при этом опускается.

Выводы

1. На основе законов сохранения массы, импульсов и энергии выведены формулы для определения параметров нестационарных газозвуковых потоков.

2. Выполнен анализ полученных формул, который позволил установить, что если фронт реакции набегаёт на покоящуюся свежую смесь с постоянной сверхзвуковой скоростью, то продукты реакции движутся вслед за фронтом реакции. При дозвуковом фронте реакции продукты реакции и реакционный фронт движутся противоположно друг другу. В этом состоит главное различие дозвукового и сверхзвукового фронта реакции при

нестационарном течении газозвуковых потоков.

3. Получены уравнения поляры фронтов реакции и построена их диаграмма на плоскости $(\Delta u/a_1, p_2/p_1)$ при разных значениях теплоты \bar{q}_1 . Анализ диаграммы позволил выявить следующие свойства фронтов реакции:

— диаграмма поляра является симметричной относительно вертикальной оси. При этом правая часть диаграммы соответствует знаку «плюс» в уравнениях поляры фронтов реакции, а левая часть диаграммы соответствует знаку «минус», что означает наличие волн детонации и дефлаграции, распространяющихся и в положительном, и в отрицательном направлении оси x ;

— верхняя ветвь, называемая ветвью детонации, соответствует сверхзвуковому фронту реакции, а нижняя ветвь, именуемая ветвью дефлаграции, соответствует дозвуковому фронту реакции;

— каждой точке поляры соответствует совершенно определенное значение скорости v , которое в некоторой точке на сверхзвуковой ветви диаграммы достигает бесконечности, а в некоторой точке на дозвуковой ветви диаграммы скорость v равна нулю.

— с повышением количества подводимой теплоты ветвь детонации смещается вверх, а ветвь дефлаграции всегда проходит через точку $p_2/p_1 = 1$, но при этом опускается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселовский В. С., Алексеева Н. Д., Виноградова Л. П. Самовозгорание промышленных материалов. — М.: Наука, 1964. — 247 с.
2. Захаров Е. И., Качурин Н. М., Малахова Д. Д. Механизм процесса самонагрева угля и перехода его в самовозгорание // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2013. — Вып. 2. — С. 42-50.
3. Chanyshev A. I. A method to determine a body's thermal state // *Journal of Mining Science*. — July 2012, — Vol. 48, Issue 4, pp 660-668.
4. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Erastov A. Yu., Khaymin S. A., Lebedev K. S., Kolykhalov V. V., Shlapakov E. A. Investigation of the temperature field in the areas of rock and coal concentration near the self-heating zon // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 206, (2018) 012006.
5. Черданцев С. В., Шлапаков П. А. Анализ состояния пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок вблизи очагов самонагрева // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 9. — С. 15-21.
6. Черданцев С. В., Ли Хи Ун, Филатов Ю. М., Шлапаков П. А. Определение критической температуры зажигания микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — №1. — С. 117-125.
7. Черданцев С.В., Ли Хи Ун, Филатов Ю.М., Шлапаков П.А. Анализ процесса горения микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 11. С. 10-15.
8. Cherdantsev S. V., Li Hi Un, Filatov Yu. M., Botvenko D. V., Shlapakov P. A., Kolykhalov V. V. Combustion of Fine Dispersed Dust-Gas-Air Mixtures in Underground Workings // *Journal of Mining Science* March 2018, Volume 54, Issue 2, pp 339-346.
9. Черданцев С. В., Ли Хи Ун, Филатов Ю. М., Шлапаков П. А. Анализ процесса выгорания грубодисперсных пылегазовоздушных смесей, движущихся в воздушных потоках горных выработок // Химическая физика и мезоскопия. 2017. № 4. С. 513-523.
10. Amelchugov S. P., Vykov V. I., Tsybenova S. B. Spontaneous Combustion of Brown-Coal Dust. Experiment, Determination of Kinetic Parameters, and Numerical Modeling / *Combustion, Explosion and Shock Waves*. — May 2002. — Volume 38, Issue 3, pp 295-300.
11. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Initiation of Combustion of a Gel-Like Condensed Substance by a Local Source of Limited Power // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, January 2017, Volume 90, Issue 1, pp 206-216.
12. Bartlma A. Gasdynamik der verbrennung. Deutsche forschungs and versuchsanstalt «Institut fur Reaktionskinetik», Stuttgart. 1975, 280 p.
13. 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.
14. Рахматуллин Х. А., Сагомоян А. Я., Бунимович А. И., Зверев Н. Н. Газовая динамика. — М.: Высшая школа. — 1965. — 723 с.

REFERENCES

1. Veselovsky V. S., Alekseeva N. D., Vinogradova L. P. Spontaneous combustion of industrial materials. — Moscow: Nauka. — 1964. — 247 p.
2. Zakharov E. I., Kachurin N. M., Malakhova D. D. The mechanism of the process of coal self-heating and auto-ignition // *Izvestiya tulgu. Earth science*, — 2013, — Vol. 2, pp. 42-50.
3. Chanyshev A. I. A method to determine a body's thermal state // *Journal of Mining Science*, — July 2012, — Vol. 48, Issue 4, pp 660-668.
4. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Erastov A. Yu., Khaymin S. A., Lebedev K. S., Kolykhalov V. V., Shlapakov E. A. Investigation of the temperature field in the areas of rock and coal concentration near the self-heating zon // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 206, (2018) 012006.

5. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A. Analysis of the state of dust-gas-air mixtures in the atmosphere of mine workings in the vicinity of spontaneous heating points // *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*, — 2019, — No 9, pp. 15-21.
6. Cherdantsev S. V., Lee Khi Un, Filatov Yu. M., Shlapakov P. A. Determination of critical ignition temperature of microheterogeneous dust/gas-air mixtures in mines // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, — 2018. — No. 1, pp. 117-125.
7. Cherdantsev S. V., Lee Khi Un, Filatov Yu. M., Shlapakov P. A. Analysis of combustion process of microheterogeneous dust and gas mixtures in the mine workings // *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*, — 2017, — No 11, pp. 10-15.
8. Cherdantsev S. V., Li Hi Un, Filatov Yu. M., Botvenko D. V., Shlapakov P. A., Kolykhalov V. V. Combustion of Fine Dispersed Dust-Gas-Air Mixtures in Underground Workings // *Journal of Mining Science* March 2018, Volume 54, Issue 2, pp 339-346.
9. Cherdantsev S. V., Lee Khi Un, Filatov Yu. M., Shlapakov P. A. Procedure analysis of burning out of the poor-dispersion dust-gas-air mixture moving in mine openings airflows // *Chemical Physics and Mesoscopy*, — 2017, — vol. 19, No. 4, pp. 513-523.
10. Amelchugov S. P., Bykov V. I., Tsybenova S. B. Spontaneous Combustion of Brown-Coal Dust. Experiment, Determination of Kinetic Parameters, and Numerical Modeling / *Combustion, Explosion and Shock Waves*. — May 2002. — Volume 38, Issue 3, pp 295-300.
11. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Initiation of Combustion of a Gel-Like Condensed Substance by a Local Source of Limited Power // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, January 2017, Volume 90, Issue 1, pp 206-216.
12. Bartlma A. *Gasdynamik der verbrennung. Deutsche forschung and versuchsanstalt «Institut fur Reaktionskinetik»*, Stuttgart. 1975, 280 p.
13. 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 dust-gas-air flows of mine workings near the centers of self-heating // *Chemical Physics and Mesoscopy*, — 2019, — vol. 21, No. 2, pp. 179-189.
14. Rakhmatullin H. A., Sagomonyan A. I., Bunimovich A. I., Zverev N. N. *The dynamics of gas*. — Moscow: Higher school. — 1965. — 723 p.

Поступило в редакцию 19.11.2020
Received 19 November 2020