

С.В. Черданцев, Ли Хи Ун, Ю.М. Филатов, П.А. Шлапаков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАЖИГАНИЯ МИКРОГЕТЕРОГЕННЫХ ПЫЛЕГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Процессы воспламенения, горения и детонации пылегазовоздушных смесей достаточно полно освещены в литературе. Но большинство работ посвящено горению смесей в котельных агрегатах на тепловых электростанциях с целью получения тепловой энергии и дальнейшему ее преобразованию. Горные выработки, по сравнению с топками котельных агрегатов, являются одномерными областями различной конфигурации, процессы горения пылегазовоздушных смесей в которых происходят, главным образом, в направленном газозоудушном потоке. Выявлены и проанализированы числовые значения и функция, определяющие условия зажигания микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках. Рассмотрен стационарный процесс зажигания микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках. Вычислена критическая температура зажигания смесей и выявлены закономерности влияния на температуру зажигания некоторых параметров смесей.

Ключевые слова: горные выработки, микрогетерогенные пылегазовоздушные смеси, теплопроводность, диффузия, закон Аррениуса, закон теплообмена Ньютона, кинетическая и диффузионная области, критическая температура зажигания.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-117-125

Введение

Развитие угольной промышленности в последние годы характеризуется стабильным повышением технико-экономических показателей, что обусловлено совершенствованием технологии очистных и подготовительных работ, а также использованием современного горношахтного оборудования.

В процессе работы горношахтного оборудования неизбежно образование угольной пыли, которая, взаимодействуя с газозоудушной атмосферой очистных и подготовительных выработок, образует пылегазовоздушные смеси (ПГВС), пред-

ставляющие собой частицы угля в газозоудушной атмосфере горных выработок. Пылегазовоздушные смеси способны к возгоранию или детонации при наличии даже кратковременных источников зажигания, в качестве которых могут быть открытый огонь, искры, возникшие от трения работающих частей механизмов или от взаимодействия режущих органов горных машин и инструментов. При определенных условиях процесс горения ПГВС может приобрести детонационный характер, но может быстро потухнуть.

Процессы зажигания, горения и детонации достаточно хорошо изучены, а библио-

лиография по этой тематике весьма обширна. Достаточно указать на работы отечественных [1–12] и зарубежных авторов [13–20]. Однако заметим, что подавляющее большинство работ посвящены горению и сжиганию углеродосодержащих веществ в специальных энергетических агрегатах и установках с целью получения тепловой энергии и ее дальнейшему преобразованию.

Особенность данной работы состоит в том, что процессы зажигания и горения ПГВС могут происходить в горных выработках и, поэтому крайне нежелательны. Во-вторых, горные выработки представляют собой специфические области горения, существенно отличающиеся от камер сгорания и топков котельных агрегатов, где происходят сжигания органического топлива на тепловых электростанциях (ТЭС). В-третьих, процессы зажигания и горения ПГВС будут происходить в направленном газовоздушном потоке, в отличие от горения в топках и камерах сгорания ТЭС.

Цель данной работы заключается в выявлении и анализе числовых значений и функций, определяющих величину критической температуры зажигания микрогетерогенных ПГВС в горных выработках.

В работе приняты следующие допущения:

- рассматриваются мелкодисперсные угольные частицы, размеры которых не превышают 10–5 м, поэтому их смесь с воздушными потоками горных выработок будем называть микрогетерогенными ПГВС;
- размеры области, занятой микрогетерогенной ПГВС гораздо больше расстояний между угольными частицами, в силу чего микрогетерогенную ПГВС будем рассматривать как однородную среду;
- теплообмен внутри зоны горения осуществляется только за счет теплопро-

водности и конвекции, без учета лучистого теплообмена.

Задача о стационарном химическом реагировании микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках

Примем первый порядок химического реагирования ПГВС, скорость W которого определим по формуле [1–5]

$$W = kc_s. \quad (1)$$

В формуле (1): c_s — концентрация реагирующего газа на поверхности угольных частиц, где началась химическая реакция; k — константа скорости реакции, зависимость которой от абсолютной температуры T выражается законом Аррениуса [6, 7, 12–15]:

$$k = k_0 e^{-E/RT}, \quad (2)$$

где $R = 8,314$ Дж/(моль · К) — газовая постоянная; E — энергия активации, которой должна обладать молекула, чтобы прореагировать; k_0 — предэкспоненциальный множитель.

Будем полагать, что реакция протекает в стационарном режиме, поэтому ее скорость пропорциональна количеству реагирующего вещества, доставляемому в зону реакции диффузией, что может быть выражено равенством [12]

$$W = \beta(c - c_s), \quad (3)$$

где c — концентрация реагирующего газа в рассматриваемой области; β — коэффициент массообмена.

Сопоставляя равенства (1) и (3), находим концентрацию

$$c_s = \frac{\beta c}{k + \beta} \quad (4)$$

и подставив (4) в формулу (1), найдем скорость реакции

$$W = \frac{k\beta}{k + \beta} c. \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что скорость химического реагирования зависит от протекания двух стадий: кинетической, характеризуемой коэффициентом k и диффузионной, определяемой коэффициентом β . Известно, что скорость всего процесса определяется самой медленной его стадией [12–15]. Поэтому, если скорость химического взаимодействия молекул значительно больше скорости диффузии ($k \gg \beta$), то скорость процесса протекает в диффузионной области. Наоборот, когда химическое взаимодействие протекает медленно, а диффузия быстро ($k \ll \beta$), то процесс протекает в кинетической области. Если же скорости реакции и диффузии приблизительно равны, то процесс протекает в переходной области.

Поскольку тепловой эффект Q горения угля известен [7, 9], то количество тепла q , выделяющегося на единице реакционной поверхности за единицу времени мы найдем по формуле [12]

$$q = QW = Q \frac{k\beta}{k + \beta} c, \quad (6)$$

а количество отводимого тепла q_s найдем из закона Ньютона [12]

$$q_s = \alpha(T - T_0), \quad (7)$$

где α — коэффициент теплообмена.

Очевидно, что стационарный тепловой режим установится при условии равенства q и q_s . Поэтому, приравняв правые части формул (6), (7) и учитывая формулу (2), получим трансцендентное уравнение

$$Q \frac{k_0 e^{-E/RT} \beta \cdot c}{k_0 e^{-E/RT} + \beta} = \alpha(T - T_0), \quad (8)$$

описывающее протекание химической реакции в стационарном режиме.

Анализируя уравнение (8), замечаем, что, ввиду наличия множителя $e^{-E/RT}$, химическая реакция протекает при любой температуре и ее скорость никогда не будет равна нулю. Следовательно, на-

чалное состояние нельзя считать стационарным и поэтому уравнение (8) становится неправомерным.

Чтобы исключить это очевидное противоречие воспользуемся рекомендациями работы [12], в соответствие с которыми преобразуем показатель в формуле (2) к виду

$$\frac{E}{RT} = \frac{E}{R(T + T_0 - T_0)} = \frac{E}{R(T_0 + \Delta T)} = \frac{E}{RT_0 (1 + \Delta T / T_0)} = \frac{E}{RT_0} \frac{1}{1 + \Delta T / T_0}, \quad (9)$$

где T_0 — начальная температура области, вблизи реагирующей поверхности и поэтому величина $\Delta T = T - T_0$ является малой, значительно меньшей T_0 . В силу этого величину $1/(1 + \Delta T/T_0)$ мы можем разложить в ряд Тейлора по переменной $\Delta T/T_0$

$$\frac{1}{1 + \Delta T / T_0} = 1 - \frac{\Delta T}{T_0} + \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^2 - \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^3 + \dots \quad (10)$$

Поскольку величина ΔT малая, то ряд (10) быстро сходится и можно ограничиться только его линейными членами, в силу чего, равенство (9) приобретает вид

$$\frac{E}{RT} = \frac{E}{RT_0} - \frac{E}{RT_0^2} \Delta T. \quad (11)$$

С учетом формулы (11) экспоненту в законе Аррениуса запишем следующим образом

$$e^{-E/RT} = e^{-E/RT_0} \cdot e^\theta, \quad (12)$$

где величина θ представляет собой безразмерную температуру

$$\theta = \frac{E}{RT_0^2} \Delta T = \frac{E}{RT_0^2} (T - T_0). \quad (13)$$

Отметим, что формула (12) будет достаточно точно описывать процесс воспламенения, когда температуры T и T_0 мало отличаются друг от друга.

В силу формул (12) и (13) уравнение (8) преобразуется к виду

$$\frac{Q}{\alpha} k_0 e^{-E/RT_0} \frac{E}{RT_0^2} c \frac{e^\theta}{e^\theta k_0 e^{-E/RT_0} + 1} = \theta \quad (14)$$

и также является трансцендентным относительно безразмерной температуры θ , но, в отличие от уравнения (8), оно адекватно описывает стационарный разогрев ПГВС.

Условие зажигания микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей

Обозначив входящие в уравнение (14) величины

$$\frac{Q}{\alpha} \frac{E}{RT_0^2} k_0 e^{-E/RT_0} c = \delta, \quad \frac{k_0 e^{-E/RT_0}}{\beta} = \mu \quad (15)$$

перепишем его сначала в виде

$$\delta \frac{e^\theta}{\mu e^\theta + 1} = \theta$$

а потом преобразуем к более удобной форме

$$\delta = \theta(\mu + e^{-\theta}). \quad (16)$$

Из формул (15) вытекает, что параметры δ и μ являются постоянными величинами, а правая часть уравнения (16) представляет собой функцию безразмерной температуры θ , которую обозначим как

$$f(\theta) = \theta(\mu + e^{-\theta}). \quad (17)$$

Очевидно, что функция $f(\theta)$ не имеет разрывов и является монотонной, поэтому исследуем ее на наличие экстремумов. Для этой цели найдем производную $f(\theta)/d\theta$ и приравняем ее нулю

$$\mu + e^{-\theta} - \theta e^{-\theta} = 0,$$

откуда мы находим функцию

$$\mu = e^{-\theta}(\theta - 1), \quad (18)$$

подставив которую в (16), получаем равенство

$$\delta = \theta^2 e^{-\theta}, \quad (19)$$

выражающее зависимость $\delta = \delta(\theta)$.

Обратим внимание, что оба параметра δ , μ экспоненциально зависят от тем-

пературы, и, следовательно, зависят от скорости реакции. Но их отношение

$$\psi = \frac{\delta}{\mu} = \frac{Q}{\alpha} \frac{E}{RT_0^2} \beta A \quad (20)$$

уже не содержит константы скорости реакции, и позволяет представить критическое условие как зависимость критического значения $\delta_{кр}$ от параметра μ .

При протекании реакции в диффузионной области скорость тепловыделения составляет величину $Q\beta c$ [12–15], поэтому, приравнявая ее правой части уравнения (8), получаем формулу

$$T - T_0 = \frac{Q\beta A}{\alpha},$$

определяющую разогрев поверхности в диффузионной области.

Умножив обе части полученного равенства на величину E/RT_0^2

$$\frac{E}{RT_0^2} (T - T_0) = \frac{Q}{\alpha} \frac{E}{RT_0^2} \beta A,$$

замечаем, что левая его часть представляет собой безразмерную температуру θ , а правая — параметр ψ и, следовательно, $\theta = \psi$. Таким образом, параметр ψ является безразмерной температурой θ в диффузионной области.

Чтобы сделать последующие вычисления более удобными перепишем равенство (19), имея в виду, что в диффузионной области $\psi = \theta$

$$\delta e^\theta = \psi^2$$

и учтем первую из формул (15)

$$\frac{Q}{\alpha} \frac{E}{RT_0^2} k_0 e^{-E/RT_0} A e^\theta = \psi^2. \quad (21)$$

Далее с помощью формул (12) и (20) перепишем равенство (21) в виде

$$k_0 e^{-E/RT} = \frac{E}{RT_0^2} \frac{Q\beta^2 A}{\alpha}, \quad (22)$$

где левая часть равенства является законом Аррениуса в форме (2). Поэтому формула (22) представляется особен-

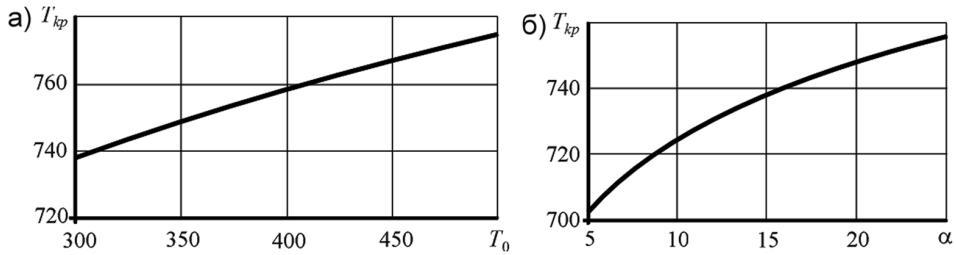


Рис. 1. Графики зависимости критической температуры от начальной температуры смеси (а) и от коэффициента теплообмена (б)

но удобной, когда разогрев поверхности перед потуханием довольно велик. Следовательно, найденную из формулы (22) температуру можно считать температурой потухания $T = T_n$, а саму формулу (22) — условием потухания.

Условие зажигания будем искать не в диффузионной, а в кинетической области, когда $\beta \gg k$. В силу этого, из второй формулы (15) величина $\mu \rightarrow 0$, а равенство (18) превращается в трансцендентное уравнение

$$e^{-\theta}(\theta - 1) = 0,$$

решением которого является значение $\theta = 1$, при котором правая часть (17) становится постоянной величиной

$$f(\theta) = \frac{1}{e} = \text{const}, \quad (23)$$

в силу чего, значение δ в формуле (19) приобретает постоянное значение, которое мы примем в качестве критического значения

$$\delta_{кр} = \frac{1}{e}. \quad (24)$$

Сопоставляя формулу (23) и первую формулу выражения (15), имеем

$$\frac{Q}{\alpha} \frac{E}{RT_0^2} k_0 e^{-E/RT_0} A = \frac{1}{e}. \quad (25)$$

Далее, мы воспользуемся формулой (12), в которой учтем, что при $\theta = 1$ температура будет критической температурой зажигания $T = T_{кр}$

$$e^{-E/RT_{кр}} = e^{-E/RT_0} \cdot e, \quad (26)$$

и тогда равенство (25) приводится к виду

$$k_0 e^{-E/RT_{кр}} = \frac{\alpha}{QA} \frac{RT_0^2}{E}. \quad (27)$$

Логарифмируя выражение (27) и выполняя преобразования, получим критическую температуру зажигания в явном виде

$$T_{кр} = \frac{E}{R \ln \left(\frac{Ek_0 Qc}{RT_0^2 \alpha} \right)}. \quad (28)$$

По формуле (28) вычислена критическая температура зажигания ПГВС и

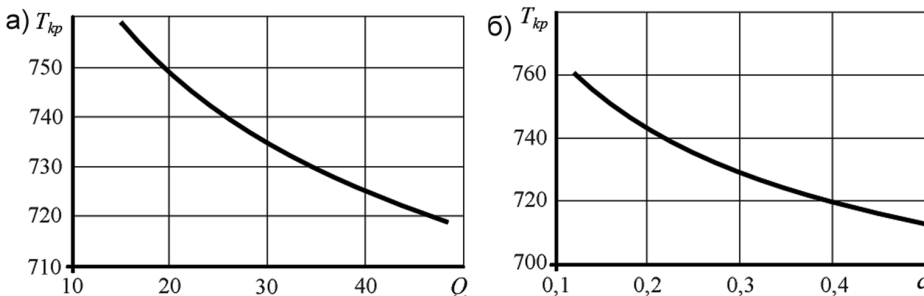


Рис. 2. Графики зависимости критической температуры смеси от теплового эффекта химической реакции (а) и от концентрации реагирующего газа (б)

построены графики ее зависимости от различных параметров (рис. 1, рис. 2). Вычисления при следующих исходных данных: $k_0 = 3,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; $c = 0,23 \text{ кг/м}^3$; $Q = 27 \cdot 10^6 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $E = 133 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$; $T_0 = 300 \text{ К}$; $\alpha = 15 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$.

Из анализа графиков на рис. 1 мы видим, что с увеличением начальной температуры ПГВС и ее коэффициента теплообмена критическая температура зажигания увеличивается. Причем зависимость $T_{\text{кр}}(T_0)$ практически линейная, а зависимость $T_{\text{кр}}(\alpha)$ представляет собой выпуклую кривую, не имеющую на рассматриваемом интервале локальных экстремумов.

С увеличением теплового эффекта реагирования Q и концентрации реагирующего газа c , критическая температура, наоборот, уменьшается (рис. 2).

Графики обеих зависимостей $T_{\text{кр}}(Q)$, $T_{\text{кр}}(c)$ представляют собой вогнутые монотонные кривые без локальных экстремумов.

Таким образом, ростом начальной температуры T_0 и коэффициента теплообмена α критическая температура нелинейно

увеличивается (рис. 1), а с увеличением теплового эффекта Q и концентрации c — нелинейно уменьшается (рис. 2).

Выводы

1. Вычислена критическая температура зажигания микрогетерогенной пылегазо-воздушной смеси.

2. Отмечено, что зажигание микрогетерогенной смеси происходит в кинетической области, в то время как потухание смеси происходит в диффузионной области.

3. Выполнен анализ влияния различных параметров на величину критической температуры зажигания ПГВС, в результате которого установлено:

а) с ростом начальной температуры микрогетерогенной ПГВС и коэффициента теплообмена критическая температура зажигания смеси нелинейно увеличивается;

б) с увеличением количества теплоты, выделяющейся в процессе реагирования и концентрации реагирующего газа критическая температура зажигания нелинейно уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амельчугов С. П., Быков В. И., Цыбенова С. Б. Самовозгорание пыли бурого угля. Эксперимент, определение кинетических параметров и численное моделирование // Физика горения и взрыва. — 2002. — № 3. — С. 48–54.
2. Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю. и др. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем. — Томск: Изд-во Томского университета, 2006. — 322 с.
3. Васильев А. А., Васильев В. А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2016. — № 2. — С. 8–39.
4. Дементьев А. А., Крайнов А. Ю. Распространение пламени в газовзвеси реагирующих частиц // Известия вузов. Физика. — 2013. — Т. 56, № 9/3. — С. 162–164.
5. Захаров Е. И., Качурин Н. М., Малахова Д. Д. Механизм процесса самонагревания угля и перехода его в самовозгорание // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2013. — Вып. 2. — С. 42–50.
6. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. — 478 с.
7. Канторович Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. — 600 с.
8. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М., Палеев Д. Ю. Численное исследование сгорания полидисперсной газовзвеси угольной пыли в сферическом объеме // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8. — № 3. — С. 531–539.

9. Линденау Н. И., Маевская В. М., Вахрушева Е. С. и др. Каталог углей СССР, склонных к самовозгоранию. — М.: Недра, 1982. — 416 с.
10. Портола В. А. Опасность самовозгорания угольной пыли // Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 6. — С. 36–39.
11. Федоров А. В. Воспламенение газовзвесей в режиме взаимодействующих континуумов // Физика горения и взрыва. — 1998. — № 4. — С. 57–64.
12. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. — 502 с.
13. Вильямс Ф. А. Теория горения. Пер. с англ. — М.: Наука, 1971. — 616 с.
14. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. Пер. с англ. — М.: Мир, 1967. — 592 с.
15. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения. Пер. с англ. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 321 с.
16. Bekdemir C., Somers B., de Goey P. DNS with detailed and tabulated chemistry of engine relevant igniting systems // Combustion and Flame. 2014. Vol. 161, no 1, pp. 210–221.
17. Ju Y. G., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research // Progress in Energy and Combustion Science. 2011. Vol. 37, no 6, pp. 669–715.
18. Rockwell S. R., Rangwala A. S. Influence of coal dust on premixed turbulent methane-air flames // Combustion and Flame. Vol. 160, Issue 3. March 2013, pp. 635–640.
19. Takase K., Li X., Nakamura H., Tezuka T., Hasegawa S., Katsuta M., Kikuchi M., Maruta K. Extinction characteristics of CH₄/O₂/Xe radiative counterflow planar premixed flames and their transition to ball-like flames // Combustion and Flame. 2013. Vol. 160, no 7. pp. 1235–1241.
20. Xin Y. X., Yoo C. S., Chen J. H., Law C. K. A DNS study of self-accelerating cylindrical hydrogen-air flames with detailed chemistry // Proceedings of the Combustion Institute. 2015. Vol. 35. Pp. 753–760. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Черданцев Сергей Васильевич¹ — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: svch01@yandex.ru,

Ли Хи Ун¹ — доктор технических наук, профессор, зам. генерального директора по научной работе, e-mail: leeanatoly@mail.ru,

Филатов Юрий Михайлович¹ — кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: main@nc-vostnii.ru,

Шлапаков Павел Александрович¹ — заведующий лабораторией, e-mail: shlapak1978@mail.ru,

¹ АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной промышленности» (АО «НЦ ВостНИИ»).

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 1, pp. 117–125.

S.V. Cherdantsev, Lee Khi Un, Yu.M. Filatov, P.A. Shlapakov

DETERMINATION OF CRITICAL IGNITION TEMPERATURE OF MICRO-HETEROGENEOUS DUST/GAS-AIR MIXTURES IN MINES

Mineral mining operations always generate various fineness dust. Dust interacts with gases and mine air and generates dust/gas-air mixtures out of which coal-containing mixtures are the most hazardous. Such mixtures can enter chemical reactions, which, in the presence of heat sources, e.g. friction of parts of working machines and tools, can induce inflammation and burning of dust/gas-air mixtures in underground excavations.

The processes of inflammation, burning and detonation of dust/gas-air mixtures are abundantly described in the domestic and foreign literature. On the other hand, the majority of publications describe dust/gas-air mixture combustion during heat energy generation and conversion at thermal power plants. As distinct from boiler furnaces and burners, underground excavations are one-dimensional domains of different shapes, and burning of dust/gas-air mixtures takes place mostly in the directional air-and-gas flow.

The aim of this study is to find and analyze values of functions that govern burning conditions of micro-heterogeneous dust/gas-air mixtures in mines. The stationary process of micro-heterogeneous dust/gas-air mixture ignition in underground excavation is discussed. The critical ignition temperature of the mixtures is determined, and the mechanisms of influence exerted by some mixture parameters on the ignition temperature are revealed.

Key words: underground excavation, micro-heterogeneous dust/gas-air mixtures, thermal conduction, diffusion, Arrhenius law, Newtonian law of heating/cooling, kinetic and diffusion domains, critical ignition temperature.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-117-125

AUTHORS

*Cherdantsev S.V.*¹, Doctor of Technical Sciences,

Leading Researcher, e-mail: svch01@yandex.ru,

*Lee Khi Un*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Deputy General Director–Academic Secretary,

e-mail: leeanatoly@mail.ru,

*Filatov Yu.M.*¹, Candidate of Technical Sciences,

General Director, e-mail: main@nc-vostnii.ru,

*Shlapakov P.A.*¹, Head of Laboratory, e-mail: shlapak1978@mail.ru,

¹ Joint-stock company «Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry» (JC «NC VOSTNII»), 650002, Kemerovo, Russia.

REFERENCES

1. Amel'chugov S. P., Bykov V. I., Tsybenova S. B. *Fizika goreniya i vzryva*. 2002, no 3, pp. 48–54.
2. Vasenin I. M., Shrager E. R., Kraynov A. Yu. *Matematicheskoe modelirovanie goreniya i vzryva vysokoenergeticheskikh sistem* (Mathematical modeling of the combustion and explosion of high-energy systems), Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta, 2006, 322 p.
3. Vasil'ev A. A., Vasil'ev V. A. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti*. 2016, no 2, pp. 8–39.
4. Dement'ev A. A., Kraynov A. Yu. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2013. vol. 56, no 9/3, pp. 162–164.
5. Zakharov E. I., Kachurin N. M., Malakhova D. D. *Izvestiya TuIGU. Nauki o Zemle*. 2013, issue 2, pp. 42–50.
6. Zel'dovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* (Mathematical theory of combustion and explosion), Moscow, Nauka, 1980, 478 p.
7. Kantorovich B. V. *Osnovy teorii goreniya i gazifikatsii tverdogo topliva* (Fundamentals of theory of combustion and gasification of solid fuels), Moscow, Izd.-vo AN SSSR, 1958, 600 p.
8. Kraynov A. Yu., Moiseeva K. M., Paleev D. Yu. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2016, vol. 8, no 3, pp. 531–539.
9. Lindenau N. I., Maevskaya V. M., Vakhrusheva E. S. *Katalog ugley SSSR, sklonnykh k samovozgoraniyu* (Directory of coal of the USSR, prone to spontaneous combustion), Moscow, Nedra, 1982, 416 p.
10. Portola V. A. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2015, no 6, pp. 36–39.
11. Fedorov A. V. *Fizika goreniya i vzryva*. 1998, no 4, pp. 57–64.
12. Frank-Kamenetskiy D. A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* (Diffusion and heat transfer in chemical kinetics), Moscow, Nauka, 1987, 502 p.
13. Vil'yams F. A. *Teoriya goreniya*. Per. s angl. (Combustion theory. English–Russian translation), Moscow, Nauka, 1971, 616 p.

14. L'yuis B., El'be G. *Gorenie, plamya i vzryvy v gazakh*. Per. s angl. (Burning, flame and explosions in gases. English–Russian translation), Moscow, Mir, 1967, 592 p.
15. Spolding D. B. *Osnovy teorii goreniya*. Per. s angl. (Fundamentals of the theory of combustion. English–Russian translation), Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat, 1959, 321 p.
16. Bekdemir C., Somers B., de Goey P. DNS with detailed and tabulated chemistry of engine relevant igniting systems. *Combustion and Flame*. 2014. Vol. 161, no 1, pp. 210–221.
17. Ju Y. G., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011. Vol. 37, no 6, pp. 669–715.
18. Rockwell S. R. Rangwala A. S. Influence of coal dust on premixed turbulent methane–air flames. *Combustion and Flame*. Vol. 160, Issue 3. March 2013, pp. 635–640.
19. Takase K., Li X., Nakamura H., Tezuka T., Hasegawa S., Katsuta M., Kikuchi M., Maruta K. Extinction characteristics of CH₄/O₂/Xe radiative counterflow planar premixed flames and their transition to ball-like flames. *Combustion and Flame*. 2013. Vol. 160, no 7. pp. 1235–1241.
20. Xin Y. X., Yoo C. S., Chen J. H., Law C. K. A DNS study of self-accelerating cylindrical hydrogen-air flames with detailed chemistry. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2015. Vol. 35. Pp. 753–760.

FIGURES

Fig. 1. Graphs of the critical temperature from the initial temperature of the mixture (a) and coefficient of heat transfer (b).

Fig. 2. Graphs of the critical temperature of the mixture from the heat effect of chemical reaction (a) and the concentration of the reactive gas (b).



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕАЛИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

(2017, № 10, СВ 23, 604 с.)

Коллектив авторов

Доклады Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли», проведенной в Горном институте КНЦ РАН, посвящены обсуждению современного состояния и актуальных проблем в области применения информационных технологий в горном деле при реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли. Усложнение условий ведения горных работ, снижение качества руд, необходимость повышения промышленной и экологической безопасности и ряд других негативных тенденций повышают роль компьютерных технологий при решении задач горного производства. Появляются новые специализированные и комплексные программные продукты, находящие все более широкое применение в исследовательских, проектных организациях и на горных предприятиях России.

INFORMATION TECHNOLOGY IN THE IMPLEMENTATION OF ENVIRONMENTAL STRATEGY FOR DEVELOPMENT OF THE MINING INDUSTRY

Team of authors

Reports of all-Russian scientific-technical conference «Information technologies in the implementation of the environmental strategy for the development of the mining industry», held in the Mining Institute KSC RAS, devoted to a discussion of the current state and topical problems in the field of information technologies application in mining at realization of ecological strategy of development of the mining industry. Complication of conditions of mining lower quality ores, the need to improve industrial and environmental safety and a number of other negative trends increase the role of computer technology in solving problems of the mining industry. There are new specialized and integrated software products, which finds wide application in the research, design organizations and at mining enterprises of Russia.