УДК 536.46

ДЕТОНАЦИЯ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ КАК ЗАДАЧА ОБ ОЧАГОВОМ ТЕПЛОВОМ ВЗРЫВЕ

DETONATION OF REACTIVE GAS MIXTURES AS PROBLEM OF FOCAL THERMAL EXPLOSION

О. Б. Кудряшова – д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия, 659322, Бийск, ул. Социалистическая, 1

Ю. А. Галенко – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

Е. В. Сыпин – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

С. А. Лисаков – инженер кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО « АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

Н. Ю. Тупикина – старший преподаватель кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО « АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

O. B. Kudriashova – doctor of phys.-math. sciences, associate professor, chair professor of Biysk Technological Institute of the Polzunov Altai State Technical University, Institute of Chemical Energy Technologies' Problems SB RAS, 1, ul. Sotsialisticheskaia, Biysk, 659322, Russia

Yu. A. Galenko - doctor of phys.-math. sciences, chair professor of Biysk Technological Institute of the Polzunov Altai State Technical University, 27, ul. Trofimova, Biysk, 659305, Russia

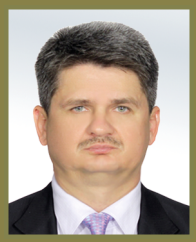
Ye. V. Sypin – candidate of technical sciences, associate professor, chair professor of Biysk Technological Institute of the Polzunov Altai State Technical University, 27, ul. Trofimova, Biysk, 659305, Russia

S. A. Lisakov - chair engineer of Biysk Technological Institute of the Polzunov Altai State Technical University, 27, ul. Trofimova, Biysk, 659305, Russia

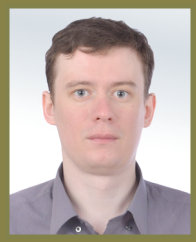
N. Yu. Tupikina – chair senior lecturer of Biysk Technological Institute of the Polzunov Altai State Technical University, 27, ul. Trofimova, Biysk, 659305, Russia

О.Б. Кудряшова
obk@bti.secna.ru

Ю.А. Галенко
gal@bti.secna.ru



Е.В. Сыпин
sev@bti.secna.ru



С.А. Лисаков
foxlsa@mail.ru

Н.Ю. Тупикина
tnu@bti.secna.ru

Для того чтобы возникла детонация рудничного газа, необходимо смешивание исходных компонентов в определенных пропорциях, после чего даже небольшая тепловая неоднородность может вызвать взрыв. Воспламенения газопылевоздушных смесей в атмосфере горных выработок обусловлены протеканием экзотермических реакций окисления метана с кислородом воздуха. Необходимость обеспечения безопасности при работе с взрывчатыми газовыми смесями, такими как метано-воздушные смеси в шахтах, взрывоопасные выбросы газов на производстве, требует развития исследований по очаговому тепловому взрыву. В статье предложена модель очагового теплового взрыва для описания процесса детонации реакционноспособных газовых смесей. С помощью асимптотических методов получено аналитическое решение такой задачи. В результате найдены критические условия, определяющие время действия, размер и мощность источника зажигания. Проведено параметрическое исследование модели. На примере метано-воздушной смеси получены значения времени развития взрыва, времени прогрева и температуры очага к концу времени прогрева в зависимости от мощности источника зажигания

In order to create a detonation of mine gas, it is necessary to mix the original components in certain proportions, after which even a small thermal heterogeneity can cause an explosion. The ignition of gas-dust-air mixtures in the atmosphere of mine workings is due to the occurrence of exothermic reactions of methane oxidation with air oxygen. The need to ensure safety when working with explosive gas mixtures, such as methane-air mixtures in mines, explosive gas outbursts at work, requires the development of studies on focal thermal explosion. A model of a focal thermal explosion is proposed in the article for describing the detonation of reactive gas mixtures. With the help of asymptotic methods, an analytical solution of such a problem is obtained. As a result, critical conditions are found that determine the time of action, size and power of the ignition source. Parametric study of the model is carried out. On the example of the methane-air mixture, the values of the explosion development time, the time of warming up and the temperature of the source by the end of the warm-up time were obtained, depending on the power of the ignition source.

Ключевые слова: *ОЧАГОВЫЙ ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ, РЕАКЦИОННОСПОСОБНАЯ ГАЗОВАЯ СМЕСЬ, ДЕТОНАЦИЯ, КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ*

Key words: *FOCAL THERMAL EXPLOSION, REACTIVE GAS MIXTURE, DETONATION, IGNITION CRITICAL CONDITIONS*

Введение

Воспламенения газопылевоздушных смесей в атмосфере горных выработок обусловлены протеканием экзотермических реакций окисления метана и угольной пыли с кислородом воздуха, т.е. процессов горения и детонации, рассматриваемых с позиции теории теплового взрыва и кинетики протекающих реакций. Для того чтобы возникло пламя или детонация рудничного газа, необходимо смешивание исходных компонентов в определенных пропорциях, после чего даже небольшая тепловая неоднородность может вызвать взрыв. В работах [1,2] проведено компьютерное моделирование горения метано-воздушных смесей, моделирования потока оптического излучения очага взрыва топливо-воздушных смесей в угольной шахте. Необходимость обеспечения безопасности при работе с взрывчатыми газовыми смесями, такими, как метано-воздушные смеси в шахтах, взрывоопасные выбросы газов на производстве, требует дальнейшего развития исследований по очаговому тепловому взрыву.

В постановке задачи об очаговом тепловом взрыве используют различные допущения о причине теплового взрыва. Это может быть температурная неоднородность в некоторой области пространства, заполненного взрывчатым газом [3], либо выделение в такой области некоторого количества тепла от источника, притом, что температура во всем пространстве одинакова [4-6]. В первом подходе причины возникновения температурной флуктуации остается за рамками постановки задачи. Во втором подходе они могут быть обозначены явно. Например, в шахте это может быть выделения тепла определенной мощности (горячие детали механизмов и машин, облако разогретой угольной пыли и т.п.). В любом случае решение задачи об очаговом тепловом взрыве позволяет получить критическую энергию/начальную температуру и время инициирования взрыва, что имеет большое значение при проектировании систем безопасности в шахтах и в технологических процессах, при которых могут возникать взрывоопасные газовые выбросы.

При решении задачи об очаговом тепловом взрыве возникают проблемы, связанные с сильной нелинейностью в математических уравнениях, описывающих процессы распространения тепла и химической реакции. Такие проблемы решаются с помощью вычислительной техники, однако, и в этом случае требуют применения специальных численных методов решения. Кроме того, численное решение не позволяет очевидно выявить закономерности процесса так, как это получается при аналитическом решении задачи.

Цель настоящей работы – аналитическое решение задачи об очаговом тепловом взрыве для описания процессов детонации реакционно-способных газовых смесей. В результате такого решения необходимо получить критические условия и время индукции детонации.

1. Постановка задачи о взрыве метано-воздушной смеси

Процесс детонации метано-воздушной смеси в рамках макрокинетического подхода можно рассматривать как задачу об очаговом тепловом взрыве. Пусть источник инициирования представляет собой сферическую тепловую неоднородность радиуса r_0, имеет мощность Q, действуя в течение времени t_i. Это соответствует ситуации, когда в объеме газовой смеси радиуса r_0 возникает тепловая флуктуация в результате конвективных потоков, радиационного разогрева поглощающих частиц аэрозоля и т.п.

Состояние системы в сферических координатах описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T_1}{\partial t} = \dfrac{a}{r^2}\dfrac{\partial}{\partial r}\left(r^2\dfrac{\partial T_1}{\partial r}\right) + qz\rho\exp\left(-\dfrac{E}{RT_1}\right) + \dfrac{Q}{r_0^3}, & 0 < r < r_0 \\ \dfrac{\partial T_2}{\partial t} = \dfrac{a}{r^2}\dfrac{\partial}{\partial r}\left(r^2\dfrac{\partial T_2}{\partial r}\right) + qz\rho\exp\left(-\dfrac{E}{RT_2}\right), & r_0 < r < \infty \end{cases} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$t=0,\ T_1=T_2=T_н;$$
$$r=0,\ \partial T_1/\partial r = 0,\ r\to\infty;\ \partial T_2/\partial r = 0,\ r=r_0,$$
$$T_1=T_2,\ \partial T_1/\partial r = \partial T_2/\partial r = 0$$

Здесь T_1 – температура внутри неоднородности, T_2 – вне первичного облака, $Q=0$ при $t>t_i$, $a = \lambda/(\rho c)$– коэффициент температуропроводности среды, λ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, c – теплоемкость, q – тепловой эффект реакции, z – предэкспонент, E – энергия активации.

Решая систему уравнений (1) необходимо найти минимальную энергию воспламенения и время зажигания. Критерием теплового взрыва будем считать стремление температуры в цен-

тре очага в бесконечность. Это соответствует инициированию детонации реакционной газовой смеси.

2. Асимптотический анализ

2.1 Стадия индукционного разогрева

Первая стадия процесса развития очагового теплового взрыва – это индукционный разогрев смеси. В этот период выделение тепла от химической реакции невелико, меньше или сопоставимо с теплом от внешнего источника. Время индукционного разогрева обозначим как t_0. Характерные масштабы на этой стадии следующие: для длины – величина тепловой неоднородности r_0, соответствующий масштаб времени $t_н = r_0^2/a$, масштаб температуры $\Delta T=T^*-T_н$, где T^* – температура в центре неоднородности (в центре координат) в момент окончания данной стадии t_0. Перейдем в системе уравнений (1) к переменным $x=r/r_0$, $U=(T^*-T)/(T^*-T_н)$, $\tau=t/t_н$.

В безразмерном виде систем уравнений (1) на первой стадии:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U_1}{\partial \tau} = \dfrac{\mathrm{Fo}}{x^2}\dfrac{\partial}{\partial x}\left(x^2\dfrac{\partial U_1}{\partial x}\right) - w\exp\left(-\theta_0\dfrac{U_1}{1-\beta\theta_0 U_1}\right) - \bar{Q}, & 0<x<1 \\ \dfrac{\partial U_2}{\partial \tau} = \dfrac{\mathrm{Fo}}{x^2}\dfrac{\partial}{\partial x}\left(x^2\dfrac{\partial U_2}{\partial x}\right) - w\exp\left(-\theta_0\dfrac{U_1}{1-\beta\theta_0 U_1}\right), & 1<x<\infty \end{cases} \quad (2)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\tau=0,\ U_1=U_2=1;$$
$$x=0,\ \partial U_1/\partial x=0,\ x\to\infty;\ \partial U_2/\partial x=0$$
$$x=1,\ U_1=U_2,\ \partial U_1/\partial x=\partial U_2/\partial x$$

Здесь:

$$w=\frac{qzcr_0^2}{\lambda(T_*-T_н)}\exp(-E/RT_*),\ \beta=-RT_*/E,\ \theta_0=\frac{E}{RT_*^2}(T_*-T_н),$$

$$\bar{Q}=\frac{Q}{\lambda(T_*-T_н)r_0},\ \mathrm{Fo}=\frac{t_0 a}{r_0^2}.$$

На стадии прогрева можно пренебречь тепловыделением от химической реакции, и с точностью до $O(\exp(-\theta_0))$ можно записать:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U_1}{\partial \tau} = \dfrac{\mathrm{Fo}}{x^2}\dfrac{\partial}{\partial x}\left(x^2\dfrac{\partial U_1}{\partial x}\right) - \bar{Q}, & 0<x<1 \\ \dfrac{\partial U_2}{\partial \tau} = \dfrac{\mathrm{Fo}}{x^2}\dfrac{\partial}{\partial x}\left(x^2\dfrac{\partial U_2}{\partial x}\right), & 1<x<\infty \end{cases} \quad (3)$$

Аналитическое решение для области тепловой неоднородности, полученное операционным методом, имеет вид:

$$U_1 = 1-\bar{Q}\tau - \frac{\bar{Q}}{2x}\int_0^\tau \frac{\tau-t}{\sqrt{\pi t}}\left(\exp\left(-\frac{(1+x)^2}{4t}\right)-\exp\left(-\frac{(1-x)^2}{4t}\right)+\right.$$
$$\left.+\frac{1+x}{2t}\exp\left(-\frac{(1+x)^2}{4t}\right)-\frac{1-x}{2t}\exp\left(-\frac{(1-x)^2}{4t}\right)\right)dt \quad (4)$$

Окончание периода прогрева определится из условия равенства тепловыделения от химической реакции теплу от внешнего источника:

$$\bar{Q}=w. \quad (5)$$

T^* –температура в центре в центре координат в момент окончания стадии прогрева, то есть:

$$U_1(0,\tau_0)=0 \quad (6)$$

Критическую величину энергии источника Q^* определим, положив время индукционного прогрева равным времени действия источника: $t_0=t_i$, или

$$\tau_0=\tau_i=Fo \quad (7)$$

Выражения (5) и (6) позволят установить критическую величину подводимой энергии Q и температуру прогрева на пределе детонации T^*.

Рассмотрим решение (4) в точке $x=0$ (начало координат):

$$U_1 = 1-\bar{Q}\mathrm{Fo}-\bar{Q}\left[erfc\frac{1}{2\sqrt{\mathrm{Fo}}}\left(\frac{1}{2}-\mathrm{Fo}\right)-\sqrt{\frac{\mathrm{Fo}}{\pi}}\exp\left(-\frac{1}{4\mathrm{Fo}}\right)\right]. \quad (8)$$

Условия (5) и (6) преобразуются к виду:

$$\begin{cases} \bar{Q}=1/\left[\mathrm{Fo}+erfc\dfrac{1}{2\sqrt{\mathrm{Fo}}}\left(\dfrac{1}{2}-\mathrm{Fo}\right)-\sqrt{\dfrac{\mathrm{Fo}}{\pi}}\exp\left(-\dfrac{1}{4\mathrm{Fo}}\right)\right] \\ \bar{Q}=w \end{cases} \quad (9)$$

В предельных случаях из (9) получим:

при $Fo<<1$ $\quad \bar{Q}=1/Fo,$ (10)

при $Fo>>1$ $\quad \bar{Q}=\dfrac{1}{1-1/\sqrt{\mathrm{Fo}}+O(1/\mathrm{Fo})}.$ (11)

Из (11) следует, что при $Fo\to\infty$, $\bar{Q}\to 1$. В области значений $Fo\sim O(1)$ $\bar{Q}$ также имеет порядок 1, как следует из (11) и (10). Таким образом, нетрудно убедиться, что на пределе взрыва для любого Fo выполняется условие:

$$t_н/t_{ad}=\theta_0\bar{Q}=\theta_0 w>>1, \quad (12)$$

где $t_{ad}=\dfrac{\rho RT_*^2}{qzE}\exp(E/RT_*)$ – характерное время химической реакции.

Это означает, что задача имеет пограничный характер по времени: характерное время прогрева много больше времени развития химической реакции.

2. Стадия развития взрыва

С момента времени $\tau=Fo$ перейдем к новым переменным: $\tau_a=t/t_{ad}=\theta w$, $W=\theta_0 U$.

Выражение (12) позволяет отбросить члены исходной системы уравнений (2), отвечающие за теплоотвод, а также за внешний источник тепла, так как они малы по сравнению с энерговыделением от химической реакции. Тогда уравнение теплопроводности с точностью до $O(w^{-1},\theta_0^{-1})$ примет вид:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau_a}=-\exp\left(-\frac{W}{1-\beta W}\right), \quad (13)$$

или

$$\int\exp\left(\frac{W}{1-\beta W}\right)dW=\tau_a+C, \quad (14)$$

Интегрируя (14), получим:

$$e^{W}(1 + (W^2 - 2W + 2)\beta) + O(e^{\beta^2}) = \tau_a + C\,. \quad (15)$$

Постоянную интегрирования C в выражении (15) получим из сращивания инертного и адиабатического решений:

$$W(\tau_a \to \theta_0 Fow) = U_1(\tau \to Fo) = 0 \quad (16)$$

откуда $C=1+2\beta+\theta_0 wFo$.

В качестве критерия теплового взрыва мы приняли неограниченный рост температуры в центре очага: $W(0,\tau_a)\to-\infty$. Отсюда получим выражение для времени развития взрыва:

$$\tau_{a*} = \theta_0 Fow + 1 + 2\beta\,. \quad (16)$$

Таким образом, условия (9) и (16) определят критическую энергию внешнего воздействия и время развития взрыва, соответственно, в зависимости от теплофизических и химико-кинетических характеристик среды.

3. Учет выгорания

Выражение (16) можно уточнить, учитывая выгорание реагента за время развития взрыва. Для этого вместо уравнения (13) решим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial W}{\partial \tau_a} = -(1-\eta)\exp\left(-\dfrac{W}{1-\beta W}\right) \\ \dfrac{d\eta}{d\tau_a} = \gamma(1-\eta)\exp\left(-\dfrac{W}{1-\beta W}\right) \end{cases}, \quad (17)$$

где $\gamma = \left(\dfrac{qE}{RT_*^2 c}\right)^{-1}$, η – глубина превращения вещества (в предположении первого порядка реакции).

С учетом начального условия $\tau_a \to \theta_0 wFo$, $\eta=0$ имеем: $W=\eta/\gamma$. Интегрируя уравнения (17) аналогично тому, как это было сделано для уравнения (13), получим:

$$\frac{\exp\left(W(1-\gamma)\right)}{1-\gamma}\left[1+\beta W^2 + \frac{2\beta(1-W)}{1-\gamma}\right] + \boldsymbol{O}(e^{\beta^2} e^{\gamma}) = C - \tau_a\,. \quad (18)$$

Постоянную C находим сращиванием с инертным решением:

$$C = \mathrm{Fo}w\theta_0 + \frac{1}{1-\gamma}\left(1+\frac{2\beta}{1-\gamma}\right). \quad (19)$$

Из условия $W(0,\tau_a)\to-\infty$ находим уточненное выражение для времени развития взрыва:

$$\tau_{a*} = \theta_0 \mathrm{Fo}w + \frac{1}{1-\gamma}\left(1+\frac{2\beta}{1-\gamma}\right). \quad (20)$$

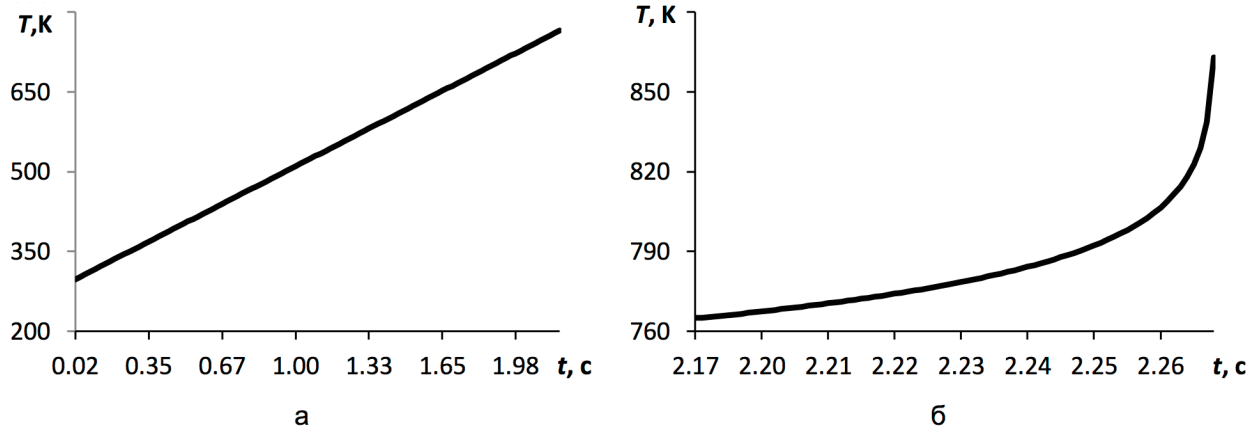


Рисунок 1 – Развитие теплового взрыва в центре очага: а – стадия разогрева, б – стадия развития взрыва
Figure 1 - Development of a thermal explosion in the center of the source: a - warm-up stage, б - stage of explosion development

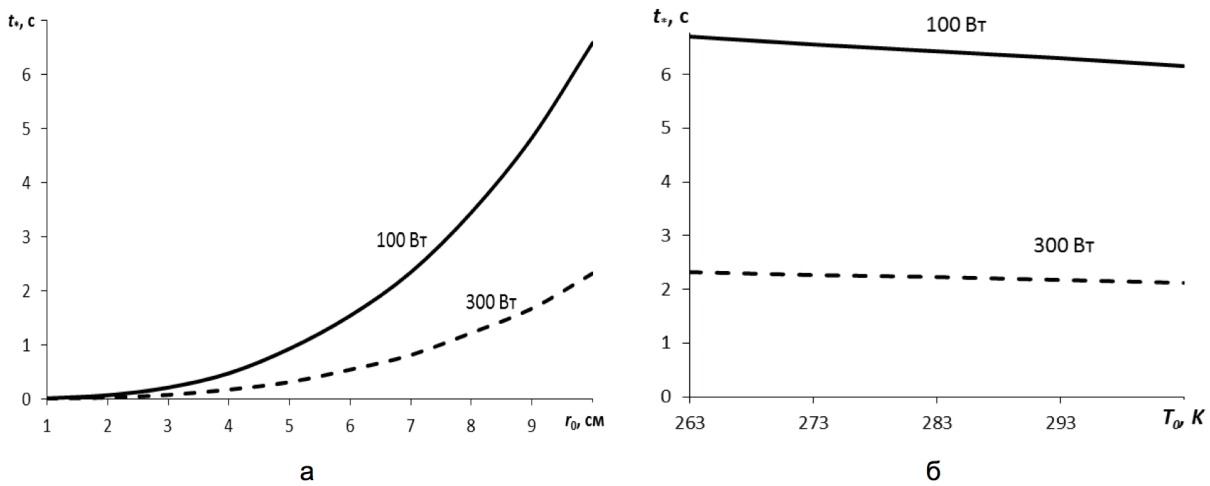


Рисунок 2 – Зависимость времени развития взрыва: а – от радиуса очага (T_0=293 K), б – начальной температуры (r_0=0,1 м)
Figure 2 - Dependence of the explosion development time: a - on the radius of the source (T_0 = 293 K), б - the initial temperature (r_0 = 0.1 m)

Таблица 1. Расчетные значения времени инертного прогрева, времени развития взрыва и температуры в центре очага.

Q	t_0	t^*	$T^*(t_0)$
50	12,08	12,87	730
100	6,22	6,29	743
300	2,17	2,18	765

Сравнивая выражения (16) и (20) можно обнаружить, что при учете выгорания время задержки взрыва несколько больше, что объясняется выгоранием реагента за время разогрева.

3. Анализ результатов

Для реакции метана с воздухом были выбраны параметры, соответствующие [7]: $q=50{,}125$ *МДж/кг*, $E=0{,}238$ *МДж/моль*, $z=9{,}66\cdot10^{10}$ c^{-1}. Теплофизические параметры смеси рассчитывались по стехиометрическому соотношению и равнялись: $c=1133$ *Дж/(кг·К)*, $\lambda=0{,}026$ *Дж/(м·К·с)*, $\rho=1{,}22$ *кг/м*^{3}.

На рисунке 1 приведено решение для изменения температуры в центре очага (расчет для мощности источника $Q=300$ *Вт*, радиуса очага $r_0=0{,}1$ *м*, начальной температуры $T_0=293$ *К*).

Получим зависимость времени развития теплового взрыва от радиуса очага и от начальной температуры. В размерных переменных такая зависимость отображена на рисунке 2. Расчет сделан для мощности источника $Q=100$ *Вт* и $Q=300$ *Вт*. Это соответствует ситуации, когда в сферическом объеме радиуса r_0 выделяется мощность Q в течение времени, не меньше, чем t_0.

С ростом радиуса очага время индукции взрыва возрастает, так как мощность источника распределяется в большем объеме. Тем не менее, даже для источника небольшой мощности (100 Вт) в метановоздушной смеси в течение нескольких секунд разовьется тепловой взрыв.

В таблице 1 приведены расчетные значения времени разогрева, развития взрыва и температуры в очаге в конце периода инертного прогрева для разных значений мощности источника. Расчет сделан для очага радиуса *10 см*.

Температура к моменту начала развития взрыва зависит от мощности источника незначительно, но влияние радиуса очага существенно: чем больше объем, в котором выделится некоторая мощность, тем меньше температура, достигаемая к концу периода прогрева.

Расчеты показывают, что влиянием выгорания можно пренебречь: поправка в расчет безразмерного времени развития взрыва не превысит сотых долей процента. Это верно, по крайней мере, для рассматриваемых уровней мощности источника и размеров очага.

Выводы

Таким образом, получено аналитическое решение задачи об очаговом тепловом взрыве для описания зажигания реакционноспособных газовых смесей. Рассчитаны критические величины энергии зажигания и соответствующие им временные и температурные характеристики очага для метано-воздушной смеси. Установлено, что скорость развития взрыва в большой степени зависит от размера очага и мощности источника зажигания, в меньшей степени – от начальной температуры. При описании процесса зажигания смеси с большой точностью можно пренебречь выгоранием, по крайней мере, в рассмотренных в статье диапазонах величин определяющих процесс параметров. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования систем мониторинга безопасности угольных шахт.

Работа поддержана Российским Фондом фундаментальных исследований (грант а 17-08-00844).

The work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant a 17-08-00844).

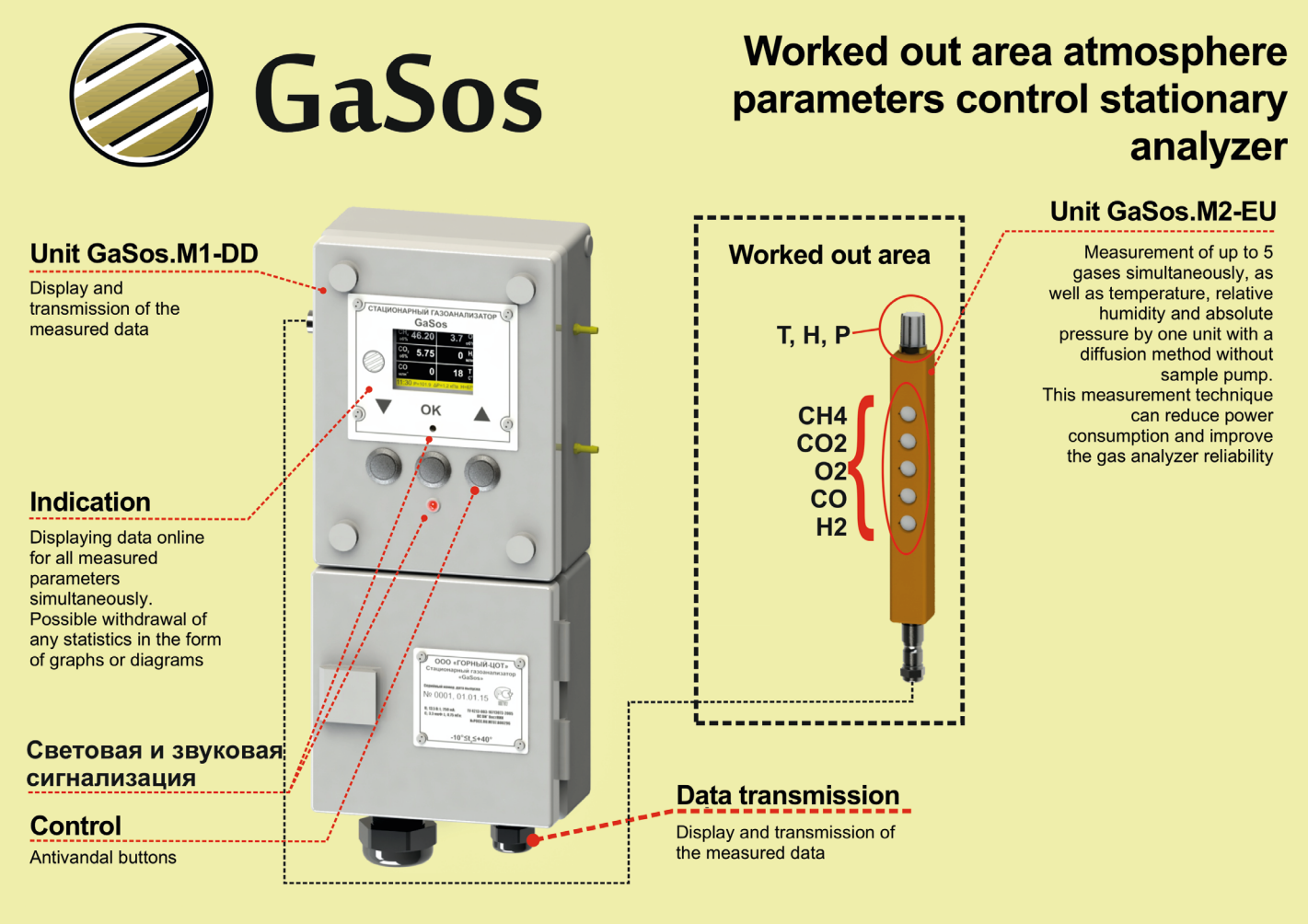
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоренко А.И., Лисаков С.А., Павлов А.Н., Сыпин Е.В., Леонов Г.В. Прикладное моделирование развития горения углеводородных смесей // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. №1. С.93-99.
2. Лисаков С.А., Сидоренко А.И., Павлов А.Н., Сыпин Е.В., Леонов Г.В. Компьютерное моделирование горения метано-воздушных смесей на начальной стадии развития // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 3. С.37-46.
3. Burkina, R. S., & Knyazeva, A. G. Zone thermal ignition and the conditions for its degeneration // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1992. V. 28, # 3. P. 209-214.

4. Буркина Р.С., Вилюнов В.Н. О возбуждении химической реакции в «горячей точке» // ФГВ. 1980. Т. 16, № 4. С. 75-78.
5. Ворожцова О.Б. Очаговый тепловой взрыв при воздействии импульсного излучения // Химическая физика. 1990. Т. 9. № 12. С. 1639-1643.
6. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.
7. Merzhanov A.G. (1966). On critical conditions for thermal explosion of a hot spot // Combustion and Flame. 1966. V. 10, #4. P. 341-348.

REFERENCES

1. Sidorenko, A.I., Lisakov, S.A., Pavlov, A.N., Sypin, E.V., & Leonov, G.V. (2016). Prikladnoe modelirovanie razvitiya goreniya uglevodorodnykh smesei [Applied modeling of hydrocarbon mixtures combustion development]. *Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti – Gerald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 1*, 93-99 [in Russian].
2. Lisakov, S.A., Sidorenko, A.I., Pavlov, A.N., Sypin, E.V., & Leonov, G.V. (2016). Kompiuternoe modelirovanie goreniya metano-vozdushnykh smesej na nachalnoj stadii razvitiia [Computer simulation of methane-air mixtures combustion at the initial stage of development]. *Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti - Gerald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 3*, 37-46 [in Russian].
3. Burkina, R. S., & Kniazeva, A. G. (1992). Zone thermal ignition and the conditions for its degeneration. *Combustion, Explosion, and Shock Waves. V. 28, 3*, 209-214 [in English].
4. Burkina, R.S., & Viliunov, V.N. (1980) O vozbuzhdenii khimicheskoj reaktsii v «goryachej tochke» [On the chemical reaction initiation at the "hot spot"]. *FGV - Combustion, Explosion, and Shock Waves, V. 16, 4*, 75-78 [in Russian].
5. Vorozhcova, O.B.(1990). Ochagovyj teplovoj vzryv pri vozdejstvii impulsnogo izlucheniia [Focal heat explosion under the action of pulsed radiation]. *Khimicheskaia fizika – Chemical physics, V. 9, 12*, 1639-1643 [in Russian].
6. Zeldovich, Ya.B., Barenblatt, G.I., Librovich, V.B., & Mahviladze, G.M. (1980) *Matematicheskaya teoriia goreniia i vzryva. [Mathematical theory of combustion and explosion]*. Moscow: Nauka [in Russian].
7. Merzhanov, A.G. (1966). On critical conditions for thermal explosion of a hot spot. *Combustion and Flame, V. 10, 4*, 341-348 [in English].



на правах рекламы