

УДК 622.812:699.852.7:331.45

## ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАЗВИТИИ АВАРИИ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

БЕЛИКОВ А. С.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
НАЛИСЬКО Н. Н.<sup>2\*</sup>, *к.т.н., доц.*,  
МАЛАДЫКА И.Г.<sup>3</sup>, *к.т.н., доц.*,  
РАГИМОВ С. Ю.<sup>4</sup>, *к.т.н., доц.*

<sup>1</sup> Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, г. Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2\*</sup> Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, г. Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: 0507544273@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

<sup>3</sup> Кафедра пожарной тактики и аварийно-спасательных работ, Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, ул. Оноприенка, 8, 18034, Черкассы, Украина, тел. +38 (097) 435-10-51, e-mail: maladyka@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8784-2814

<sup>4</sup> Кафедра организации и технического обеспечения аварийно-спасательных работ Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевского 94, 61023, Харьков, Украина, тел +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

**Аннотация.** *Цель.* Апробация численной модели ударной трубы в прогнозировании развития аварийной ситуации выбросов газа путем оценки достоверности выполнения установленных критериев инициирования для газового взрыва. *Методика.* Анализ и обобщение теоретических исследований, численное моделирование газодинамического процесса зажигания газозвушной смеси. *Результаты.* Выполнена постановка задачи воспламенения газозвушной смеси от объемного источника имеющего различную природу: твердое тело, нагретый газ, вспышка газа в небольшом объеме. Определены граничные условия для сферического источника зажигания. Решения задачи выполнены численным методом «метод крупных частиц», в котором для моделирования процессов горения использовалось уравнение Аррениуса. В результате получена динамическая картина процесса зажигания газозвушной смеси для различных условий: температуры и размера источника зажигания, процентного содержания и вида горючего газа, содержания окислителя (кислорода) в газозвушной смеси. Произведен сравнительный анализ результатов численного эксперимента и аналитического решения задачи. Показана сходимость численного метода с результатами аналитического решения. *Научная новизна.* Получено численное решение задачи зажигания газозвушной смеси в математической модели ударной трубы модифицированным методом «метод крупных частиц». Рассмотрена динамика процесса зажигания газозвушной смеси в ударной трубе. Произведена оценка достоверности математической модели ударной трубы в сравнении с аналитическим решением. Аналитическое решение получено на основе тепловой теории зажигания и квазистатического подхода методом интегрального баланса. *Практическая значимость.* Полученное решение позволяет выполнить анализ точности вычислительного процесса методики численного расчета газодинамических параметров распространения ударных воздушных волн в части инициирования горения и взрыва газозвушных смесей. Выполненный анализ точности вычислительного процесса позволяет применять численный метод в практических расчетах нахождения безопасных расстояний от очагов взрыва при ликвидации или прогнозировании последствий аварийных ситуаций.

*Ключевые слова:* газозвушная смесь, критерии зажигания, уравнение Аррениуса, кинетика горения, температура зажигания, математическая модель

## ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРИ РОЗВИТКУ АВАРІЇ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПАЛЮВАННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

БЕЛІКОВ А. С.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
НАЛИСЬКО М. М.<sup>2\*</sup>, *к.т.н., доц.*,  
МАЛАДИКА І. Г.<sup>3</sup>, *к.т.н., доц.*,  
РАГИМОВ С. Ю.<sup>4</sup>, *к.т.н., доц.*

<sup>1</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2\*</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва й архітектури», вул. Чернишевського, 24а, м. Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: [0507544273@mail.ru](mailto:0507544273@mail.ru), ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

<sup>3</sup> Кафедра пожежної тактики і аварійно-рятувальних робіт, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, 18034, м. Черкаси, Україна, тел. +38 (097) 435-10-51, e-mail: [maladyka@gmail.com](mailto:maladyka@gmail.com); ORCID ID: 0000-0001-8784-2814

<sup>4</sup> Кафедра організації та технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевського 94, 61023, Харків, Україна, тел. +38 (057) 370-50-52, e-mail: [sergragimov@mail.ru](mailto:sergragimov@mail.ru), ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

**Анотація.** *Ціль.* Апробація чисельної моделі ударної труби у прогнозуванні розвитку аварійної ситуації викидів газу шляхом оцінки вірогідності виконання встановлених критеріїв ініціювання для газового вибуху. *Методика.* Аналіз і узагальнення теоретичних досліджень, чисельне моделювання газодинамічного процесу запалювання газоповітряної суміші. *Результати.* Виконана постановка задачі запалення газоповітряної суміші від об'ємного джерела, що має різну природу: тверде тіло, нагрітий газ, спалах газу у невеликому обсязі. Визначені граничні умови для сферичного джерела запалювання. Розв'язок задачі виконано чисельним методом "метод великих часток", у якому для моделювання процесів горіння використовувалося рівняння Арреніуса. У результаті отримана динамічна картина процесу запалювання газоповітряної суміші для різних умов: температури й розміру джерела запалювання, процентного вмісту й виду горючого газу, змісту окиснювача (кисню) у газоповітряній суміші. Зроблений порівняльний аналіз результатів чисельного експерименту й аналітичного розв'язку задачі. Показана збіжність чисельного методу з результатами аналітичного рішення. *Практична значимість.* Отримане рішення дозволяє виконати аналіз точності обчислювального процесу методики чисельного розрахунків газодинамічних параметрів поширення ударних повітряних хвиль у частині ініціювання горіння й вибуху газоповітряних сумішей. Виконаний аналіз точності обчислювального процесу дозволяє застосовувати чисельний метод у практичних розрахунках знаходження безпечних відстаней від вогнищ вибуху при ліквідації або прогнозуванні наслідків аварійних ситуацій.

*Ключові слова:* газоповітряна суміш, критерії запалювання, рівняння Арреніуса, кінетика горіння, температура запалювання, математична модель

## IMPROVING SAFETY IN PROMOTION OF ACCIDENT BY SIMULATION OF FIRE GAS MIXTURE

BELIKOV A. S.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
 NALISKO N. N.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
 MALADYKA I. G.<sup>3</sup>, *Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
 RAHIMOV S. Yu.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Life Safety, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo st., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 47-16-01, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2\*</sup> Department of vital activity safety, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 47-16-01, e-mail: [0507544273@mail.ru](mailto:0507544273@mail.ru), ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

<sup>3</sup> The firefighting tactics and rescue operations department, , Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of National University of Civil Defense of Ukraine, Head, 8, Onoprienko st., Cherkassy, Ukraine, tel. +38 (097) 435-10-51, e-mail: [maladyka@gmail.com](mailto:maladyka@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-8784-2814

<sup>4</sup> Department of Organization and technical support rescue operations National University of Civil Defence of Ukraine, st. Chernyshevsky 94, Kharkiv, 61023, Ukraine, phone +38 (057) 370-50-52, e-mail: [sergragimov@mail.ru](mailto:sergragimov@mail.ru), ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

**Abstract.** *Purpose.* Validation of the numerical model of the shock tube in predicting the development of an emergency gas emissions by assessing the reliability of compliance with established criteria for the initiation of a gas explosion. *Method.* Analysis and synthesis of theoretical studies, numerical modeling of gas-dynamic process, the ignition gas mixture. *Results.* Completed setting ignition problem-gas mixture from the bulk source having a different nature: solid, heated gas, gas flare in a small volume. Defined boundary conditions for a spherical source of ignition. Decisions task performed by a numerical method of "large particles method," in which the Arrhenius equation was used for the simulation of combustion processes. The result is a dynamic picture of the process of the ignition gas mixture for various conditions: the temperature and the ignition source size, percentage and type of combustible gas, the content of the oxidant (oxygen) in the gas mixture. The convergence of a numerical method with the results of the analytical solution. *Scientific novelty.* The numerical solution of gas-air mixture ignition in the shock tube model matemeticheskoy modified method of "large particles method". The dynamics of the process of ignition of gas-air mixture in the shock tube. An assessment of the reliability of the mathematical model of the shock tube in comparison with the analytical solution. The analytical solution is obtained on the basis of the theory of thermal ignition and static approach by the integral balance. *Practical meaningfulness.* The resulting solution makes it possible to analyze the accuracy of the computing process methods of numerical simulation of gasdynamic parameters of shock waves in the air of the initiation of combustion and explosion of gas-air mixtures. The analysis of the accuracy of the computational process allows the use of numerical methods in practical calculations of finding a safe distance from the centers of the explosion in the liquidation or predicting the consequences of accidents.

*Keywords:* gas-air mixture, ignition criteria, the Arrhenius equation, the combustion kinetics, ignition temperature

## Введение

В технологических процессах газовой, химической, угольной промышленности и других отраслях существует высокая вероятность аварийного образования взрывоопасных объемов и концентраций газозвдушенных смесей. В случае инициирования горения и взрыва таких газовых объемов, на величину поражающих факторов ударных воздушных волн значительное влияние оказывают параметры процесса зажигания [1]. Это может быть влияние мощности, размера и других параметров источника на результат зажигания: возникновения различных видов горения ламинарного, дефлаграционного или детонационного горения, а также влияния места инициирования на параметры волн давления [2].

Задача прогнозирования параметров взрывов с учетом фактора зажигания является актуальной и для ее решения в настоящее время разработаны физико-математические модели процесса газового взрыва и распространения ударных воздушных волн, для которых необходимо обоснование модели инициирования взрывных процессов и оценка адекватности расчета. В работе [3] расчет параметров газовых взрывов выполняется с помощью совмещенной газодинамической модели и модели химической кинетики горения углеводородных газов. Данная совмещенная модель позволяет производить расчет как процессов горения, так и процесса воспламенения газозвдушенных смесей. На ее основании разработана математическая модель ударной трубы [4]. Одним из этапов разработки математической модели является установление адекватности численного решения на основании критериев теоретических моделей процессов горения, предложенных в работе [5].

В работе [4] произведена оценка адекватности математической модели ударной трубы по статическому показателю – расчету давления взрыва газозвдушенной смеси в закрытом объеме. Следующий этап оценки адекватности модели – сравнение динамических показателей, которые возникают с момента зажигания газа.

В связи с этим представляется целесообразным провести аналитический расчет параметров источника зажигания в виде нагретого тела и вспышки небольшого объема горючего газа и оценить достоверность выполнения установленных критериев инициирования газового взрыва в предложенной модели.

## Анализ последних исследований выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

В этом направлении аналитических расчетов, в основном распространены две теории вынужденного воспламенения: тепловая и ионная. В подавляющем большинстве работ расчет процессов зажигания рассматривается с позиции тепловой теории: зажигание накаливаемыми частицами и телами, газовыми струями, ударными волнами, трение, локальное пламя и электрическая искра. Механизм двух последних способов зажигания, как показано в работах

С.И. Таубкина, относится ближе к ионной теории, т.к. сопровождается обогащением газовой фазы активными частицами (ионами с большим запасом энергии и свободными радикалами) и сильным повышением температуры газа (порядка 10000 °С). Для искры это обусловлено высокой концентрацией энергии в малом объеме газоразрядного плазменного канала. Однако в расчетах таких источников предпочтение отдается тепловой теории, как наиболее обоснованной, начиная от работ Вант-Гоффа до Д.А. Франк-Каменецкого, Э.А. Аверсона и Я.Б. Зельдовича. Так в работе [6] на основе тепловой теории устанавливается система уравнений для определения параметров зажигания газозвдушенной смеси в модели взрыва газовой смеси в замкнутом объеме взрывонепроницаемой оболочки. В работе [7] тепловой механизм используется в физико-математическом моделировании зажигания силана ударными волнами.

Предложенная ранее методика численного расчета распространения ударных волн [3] позволяет установить безопасные расстояния по возведению взрывозащитных сооружений в горных выработках при ликвидации аварий. Однако для эффективного ее применения нерешенным является анализ точности вычислительного процесса в части инициирования горения и взрыва газозвдушенных смесей. Эта же задача остается не решенной и в аналогичных численных расчетах, использующих метод крупных частиц [8]. В данной работе в качестве критерия точности предлагается использовать сходимость численного метода с результатами аналитического решения задачи [9, 12].

## Цель статьи

Апробация численной модели ударной трубы в прогнозировании развития аварийной ситуации выбросов газа путем оценки достоверности выполнения установленных критериев инициирования для газового взрыва.

## Изложение основного материала исследования

В работах Э.А. Аверсона отмечается, что разделение теории зажигания по физическому смыслу на газофазную, гетерогенную и твердофазную является некорректным. В них показано, что определяющую роль при зажигании играет не стадия самоускорения химической реакции, а стадия прогрева, в течении которой только создаются условия для развития быстрой реакции горения, а скорость самой реакции еще мала. Поэтому основное значение, в расчетах, необходимо придавать процессам теплопереноса по химически инертному веществу. Особенности развития самой химической реакции становится важным при выходе на режим горения. В соответствии с этим в газофазной реакции можно выделить квазистатический период в течении которого происходит прогрев исходной реакционноспособной смеси и возможно применения методов теории теплопроводности реализованных, например, в работах [10, 11].

На основании этого в работе [12] получено аналитическое решение задачи зажигания газозвушной смеси. Для решения задачи предложено использовать метод интегрального теплового баланса, в котором уравнение теплопроводности заменялось интегралом теплового баланса. Решения такого уравнения ищется в виде многочлена второй степени, т.е. искомый профиль температуры в тепловом слое представляется в виде квадратичной параболы. В результате получено уравнение параболы в виде зависимости температуры от координаты, времени, теплоемкости и теплоприхода от источника зажигания. Это решение позволяет определить тепловой эффект реакции окисления метана и на этой основе показать сходимость численного метода с результатами аналитического решения.

В большинстве теоретических исследованиях зажигание вещества рассматривается вблизи нагретой неограниченной плоскости. При изучении процесса воспламенения газовых смесей установлено, что в начальном очаге имеет место ламинарное горение, а сам очаг имеет форму сферы [13] (рис 1).

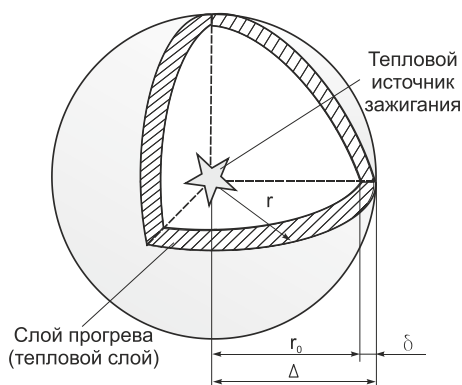


Рис. 1. Постановка задачи зажигания реакционноспособной смеси сферическим источником:  $r$  – текущий радиус сферической системы координат,  $r_0$  – сферическая координата границы нагретого тела,  $\delta$  – толщина теплового слоя,  $\Delta = r_0 + \delta$  / Setting ignition problem reactive mixture of spherical source:  $r$  – the current radius of the spherical coordinate system,  $r_0$  – spherical coordinate heated body boundaries,  $\delta$  – thickness of the thermal layer,  $\Delta = r_0 + \delta$

В качестве критерия зажигания реакционноспособной газозвушной смеси в задаче применялся критерий зажигания Я.Б. Зельдовича, согласно которому критерий зажигания включает не только условие возникновения химической реакции горения, но и условия последующего распространения пламени и самоускорения химической реакции (рис. 2):

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_0} = 0, \quad \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r>r_0} > 0, \quad (1)$$

где  $dT$  – градиент температур на границе нагретого тела;  $r_0$  – сферическая координата границы нагретого тела.

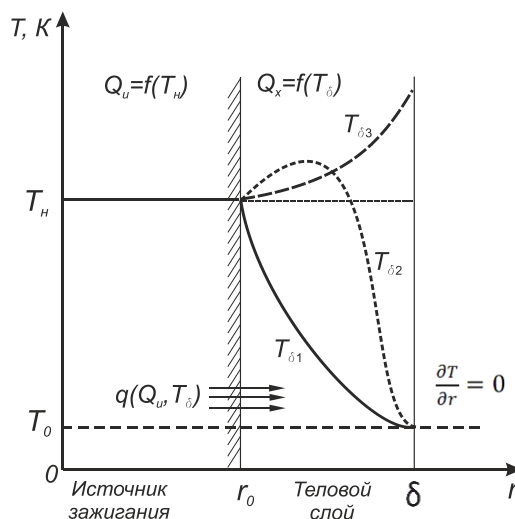


Рис. 2. Распределение температуры (температурный профиль) и результат прогрева в тепловом слое за счет кондуктивной теплопередачи:  $T_{\delta 1}$  – результат прогрева без инициирования химической реакции,  $T_{\delta 2}$  – зажигание без распространения пламени,  $T_{\delta 3}$  – зажигание и самоускорение реакции горения / The temperature distribution (temperature profile) and the result is warm in the thermal layer by conductive heat transfer:  $T_{\delta 1}$  – Warm result without initiating a chemical reaction,  $T_{\delta 2}$  – ignition without flame propagation,  $T_{\delta 3}$  – ignition and self-acceleration of the combustion reaction

В результате решения задачи получено уравнение распределения температуры в тепловом слое:

$$T(r, \tau) = \frac{3qt}{\pi c_1 \rho_1 \delta^2 (\delta + 2r_0)^2} \frac{(\Delta - r)^2}{r}, \quad (2)$$

где  $q$  – мощность энергосвободения в источнике зажигания, Дж/с;  $\delta = \sqrt{12\alpha\tau}$ ,  $r_0 \leq r \leq \Delta$ ;  $t$  – время, с;  $c_1 \rho_1$  – объемная теплоемкость источника зажигания, Дж/м<sup>3</sup>.

Результаты аналитического расчета температурного профиля в тепловом слое. В качестве источника зажигания рассмотрим нагретое металлическое тело сферической формы, которое мгновенно помещается в метановоздушную среду. Использовались следующие характеристики источника (железо) и среды:  $r_0 = 0,01$  м,  $c_1 = 0,444$  кДж/(кг·К),  $\rho_1 = 7000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 1,005$  кДж/(кг·К),  $\rho = 1,22$  кг/м<sup>3</sup>, объемная доля метана – 0,09,  $\alpha_{15^\circ} = 1,9 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $\alpha_{1500^\circ} = 3,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Для газов коэффициент температуропроводности сильно зависит от его температуры (при нагревании газа, например, с 0 до 1200 °С, ее значение увеличивается почти в 17 раз). Это необходимо учитывать при расчете  $\delta$ .

На рис. 3 представлены зависимости температуры среды от координаты в тепловом слое для различных начальных температур в заданных условиях. Видно, что связи с невысокой температуропроводностью газа график имеет экспоненциальный характер.

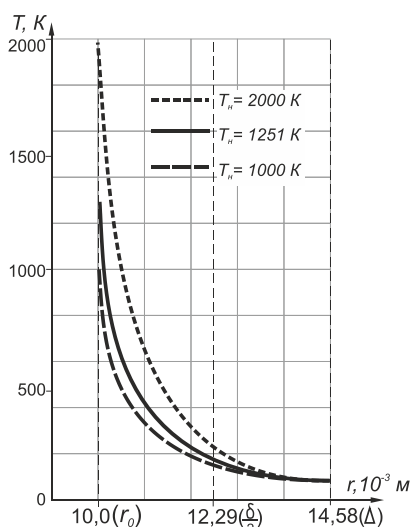


Рис. 3. Температурный профиль в тепловом слое при различных начальных температурах источника зажигания, период времени 5 мс / The temperature profile in the thermal layer for different initial temperatures of the ignition source, the period of time of 5 ms

Полученный температурный профиль позволяет сделать следующий шаг – решить задачу химической кинетики по расчету теплового эффекта окисления метана в тепловом слое и таким образом, определить  $Q_x$ . С учетом сферической формы теплового слоя и содержания горючего компонента в газовой смеси тепловой эффект определяем по уравнению Аррениуса:

$$Q_x = \frac{4}{3} \pi (\Delta^3 - r_0^3) \int_{r_0}^{\Delta} Q_r Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dr \cdot c_1^n c_2^m, \quad (3)$$

где  $c_1, c_2$  – концентрации метана и кислорода в газовой среде;  $n, m$  – порядок реакции.

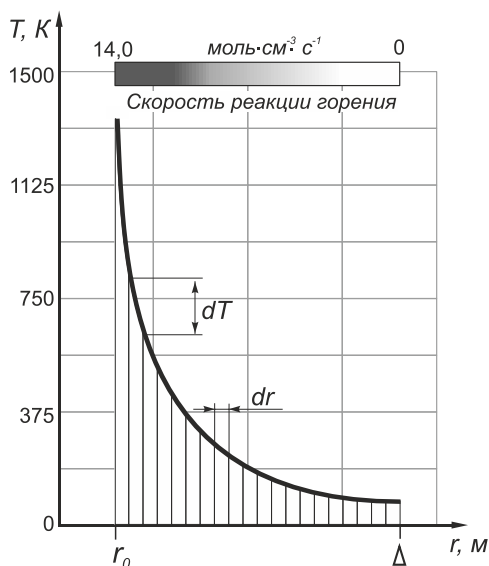


Рис. 4. Схема численного решения интегрального уравнения теплового эффекта окисления метана / Driving the numerical solution of the integral equation of thermal oxidation of methane effect

Интегральное уравнение (3) не имеет аналитического решения, поэтому для определения  $Q_x$  воспользуемся численным решением. Для этого, полученный температурный профиль на отрезке  $[r_0; \Delta]$  разобьем на 20 участков и в каждом по его средней температуре определим тепловыделение  $q_{xi}$  (рис. 4). По результатам расчета тепловыделения в тепловом слое была установлена скорость химической реакции горения.

На рис. 5 показан тепловой профиль  $q_x$  результат химической реакции, которая определяется температурным профилем  $T$ .

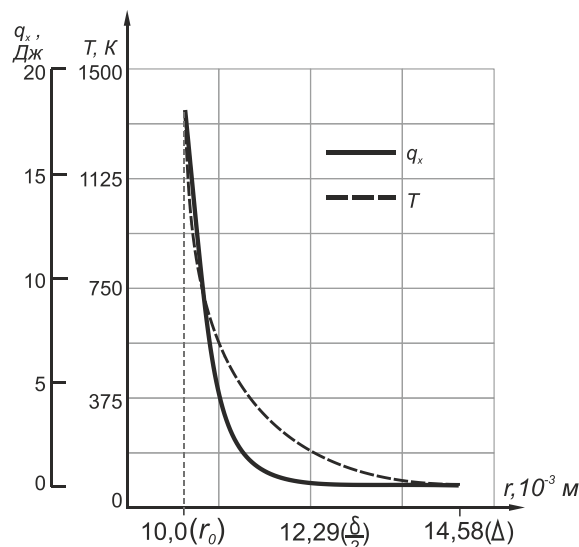


Рис. 5. Тепловой  $q_x$  и температурный  $T$  профиль в тепловом слое / Heat  $q_x$  and temperature profile  $T$  in the thermal layer

Как видно из графика (рис. 5) несмотря на прогрев всего теплового слоя, скорость реакции существенна лишь в тонком приграничном слое, не более чем в  $\frac{1}{2}$  его ширины –  $2,29 \cdot 10^{-3}$  м. В начальный момент времени возникает слоевое горение со скоростью  $0,36$  м/с, поэтому время горения слоя этого слоя не меньше  $6,4 \cdot 10^{-3}$  с. Расчетное время прогрева слоя составляет  $5 \cdot 10^{-3}$  с, т.е. принятый квазистатический подход в решении задачи допустим, что хорошо согласуется с известными данными [2, с.37].

В результате, построив зависимости теплоприхода от источника зажигания  $Q_{in}$  и химической реакции  $Q_x$  можно определить температуру зажигания системы в конкретных условиях (рис. 6). Для рассматриваемых условий были получены температуры зажигания метановоздушной смеси  $978, 1013, 1059$  °С соответственно для 9, 7 и 5 % объемного содержания метана.

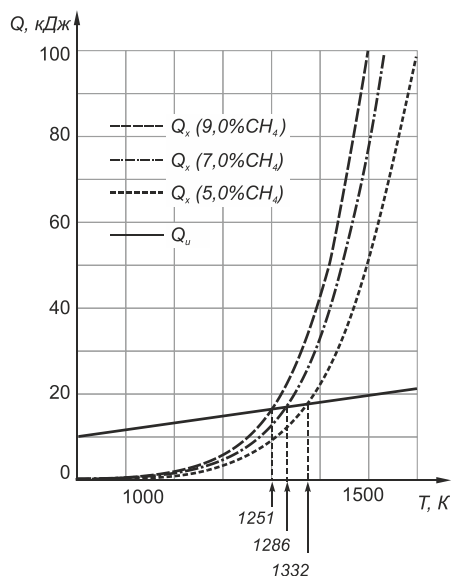


Рис. 6. Определение температуры зажигания по зависимости теплоприхода источника зажигания  $Q_u$  и химической реакции  $Q_x$  от начальной температуры / Determination of ignition temperature depending on teploprihoda ignition source and a chemical reaction  $Q_u$  and  $Q_x$  the initial temperature

Для оценки сходимости результатов численного расчета зажигания газовой смеси был произведен численный эксперимент воспламенения смеси метана и воздуха в математической модели ударной трубы, с параметрами, принятыми для аналитического расчета. Источник зажигания в расчетной области задавался в виде цилиндра с объемом близким по значению объему источника  $V_{ц} \approx V_{об.ист.зажиг}$  (рис. 7).

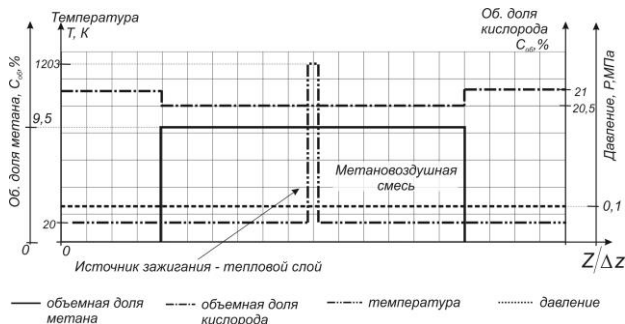


Рис. 7. Профиль начальных параметров в газовой смеси и источника зажигания / Profile of initial parameters in the gas-air mixture and ignition source

Плотность и теплоемкость среды в области источника зажигания принималась равной характеристикам железа. Численный эксперимент показал

устойчивое зажигание 9%-й метановоздушной смеси при температуре источника 930 °С. Для 7 и 5%-й метановоздушной смеси критерий зажигания выполнялся при температуре 983 и 996 °С (рис 8).

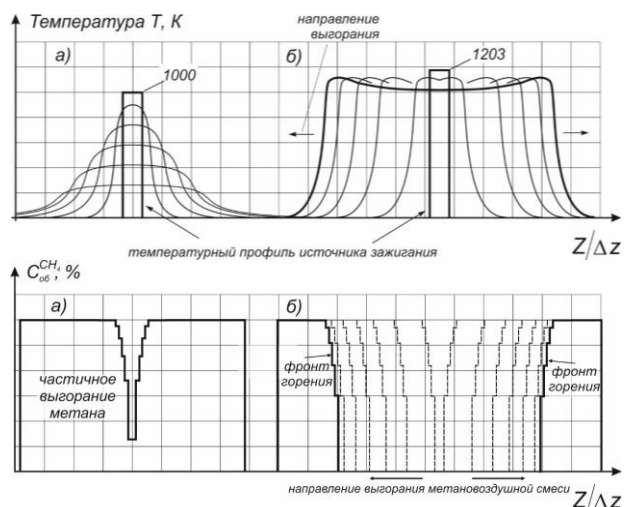


Рис. 8. Динамика температурного профиля  $T$  и объемной доли метана  $C_{vol}^{CH_4}$  в численном решении задачи: а) частичное воспламенение без горения, б) зажигание и горение метана / The temperature profile  $T$  and the volume fraction of methane  $C_{vol}^{CH_4}$  in the numerical solution of the problem: a) partial combustion, no combustion, b) the ignition and combustion of methane

Таким образом, расхождения численного расчета с аналитическим решением не превышает 7%, которое можно объяснить некоторым упрощением принятой модели физического процесса в аналитическом решении в отличие от численного решения, а именно, отсутствие учета массопереноса (в формуле (3) концентрации  $c_1, c_2$  приняты постоянны, хотя на самом деле за принятый промежуток времени они успевают измениться практически до нуля).

### Выводы исследования и перспективы дальнейшего развития в этом направлении

Апробация разработанной математической модели ударной трубы в задаче воспламенения газовой смеси показала адекватность получаемых результатов численных расчетов и возможность использования модели в реальном прогнозировании развития аварийных ситуаций, повышая, таким образом, безопасность работ по ликвидации аварий.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голинько, В. И. Аварийно-спасательные работы в шахтах [Текст] / В. И. Голинько, С. А. Алексеенко, И. Н. Смоланов; под общ. ред. Голинько В. И. – Днепропетровск: Лира, 2011. – 479 с;
2. Теория горения и взрыва [Текст] / А. В. Тотай, О. Г. Казаков, Н. О. Радькова и др.; под ред. А. В. Тотая, О. Г. Казакова.– Москва: Изд. «Юрайт», 2013.– 296 с;
3. Чернай, А. В. Кинетика окисления метана кислородом и его роль в формировании взрывной воздушной волны в шахтных выработках [Текст] / А. В. Чернай, Н. Н. Налысько, А. С. Деревянко // Науковий вісник НГУ.– 2016.– №1(151).– С. 63-69;

4. Налисько Н.Н. Оценка адекватности математической модели ударной трубы в численном эксперименте взрыва газозвушной смеси в закрытом объеме [Текст] / Н.Н. Налисько // Збірник наукових праць Національного гірничого університету.– Дніпропетровськ: НГУ, 2015.– №48.– С. 270-276;
5. Мержанов А.Г. Об адекватности экспериментальных и теоретических моделей процессов горения [Текст] / А.Г. Мержанов, В.И. Быков // Физика горения и взрыва.– 2010.– Т. 46.– №5.– С. 65–70.
6. Ткачук, А. Н. Математическое моделирование взрыва горючей смеси внутри взрывонепроницаемой оболочки [Текст] / А. Н. Ткачук, В. А. Шевкуненко // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна.– 2009.– Вип.17(157).– С. 245-255;
7. Тропин, Д. А. Физико-математическое моделирование воспламенения и горения силана в проходящих и отраженных ударных волнах [Текст] / Д. А. Тропин, А. В. Фёдоров // Физика горения и взрыва.– 2015.– №4.– С. 37-45;
8. Поландов, Ю. Х. Об одном варианте снижения давления взрыва в многоходовых газовых топках [Текст] / Ю. Х. Поландов, М. А. Барг, В. А. Бабанков // Пожаровзрывобезопасность.– 2012.– №11.– С. 41-47;
9. Соболев, В. В. О методе получения механических импульсов нагружения, основанном на лазерном подрыве покрытий из взрывчатых составов [Текст] / В. В. Соболев, А. В. Чернай, М. А. Илюшин, Н. Е. Житник // Физика горения и взрыва.– 1994.– №2.– С.67-73;
10. Поздеев, С. В. Математическое моделирование тепловых процессов в огневой печи при испытании на огнестойкость железобетонной колоны [Текст] / С. В. Поздеев // Промислова гідравліка та пневматика [Всеукраїнський науково-технічний журнал]. – Вінниця: ВНАУ.– №1(31).– 2011.– С. 19-24;
11. Беликов, А. С. К вопросу обеспечения безопасной эксплуатации металлических конструкций в очаге пожара [Текст] / А. С. Беликов, В. А. Шаломов, Ю. Ф. Стаценко, Е. Н. Корж // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия безопасность жизнедеятельности: Сб. научн. трудов.–Днепропетровск: ГВУЗ «Приднепр. гос. академия стр-ва и архитектуры», 2015.– Вып. 83.– С. 34-39;
12. Чернай А.В. Математическое моделирование вынужденного воспламенения газозвушной смеси при расчете поражающих факторов аварийных взрывов [Текст] / А.В. Чернай, Н.Н. Налисько // Науковий вісник Національного гірничого університету.– 2016.– №5.– С. 162-170.
13. Захаров Е.А. Теория форсирования горения топливовоздушной смеси локальными добавками горючих газов в область межэлектродного зазора свечи зажигания [Текст] / Е.А. Захаров, Г.Н. Злотин, В.Д. Зорин // Известия ВолгГТУ.– 2007.– Выпуск 2.– №8.– С. 7-13.

## REFERENCES

1. Golinko V.I., Alekseenko S. A. and Smolanov I.N. (2011), *Avariyno-spatatelnyie raboty v shahтах* [Rescue works in mines], Lira, Dnepropetrovsk, Ukraine. (in Russian);
2. Totay A.V., Kazakov O.G. and Radkova N.O. (2013), *Teoriya goreniya i vzryva* [The theory of combustion and explosion], Yurayt, Moscow, Russia. (in Russian);
3. Chernay A.V., Nalisko N.N. and Derevyanko A.S. (2016), “The kinetics of oxidation of methane with oxygen and its role in the formation of explosive air waves in mine workings”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.1, pp. 63–69. (in Russian);
4. Nalisko N.N. (2015), *Otsenka adekvatnosti matematicheskoy modeli udarnoy trubyy v chislennom eksperimente vzryva gazovozdushnoy smesi v zakrytom ob'eme* [Assessing the adequacy of the mathematical model of the shock tube in a numerical experiment explosion of gas-air mixture in a closed volume], *Zbirnik naukovih prats Natsionalnoho girnichogo universytetu* [Collection of scientific works the National Mining University], Dnepropetrovsk, NGU, issue 48, pp. 270-276. (in Russian);
5. Merzhanov A.G. and Byikov V.I. (2010), *Ob adekvatnosti eksperimentalnyih i teoreticheskikh modeley protsessov goreniya* [The adequacy of the experimental and theoretical models of combustion processes], *Fizika goreniya i vzryiva*, vol.46, no. 5, pp. 65–70. (in Russian);
6. Tkachuk A.N. and Shevkunenko V. A. (2009), Mathematical modeling of the explosion of a gas mixture within the impermeable shell explosion, *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: Girnicho-elektromekhanichna*, issue17, pp. 245–255. (in Russian).
7. Tropin, D. A. and Fyedorov, A. V. (2015), Physical and mathematical modeling of ignition and burning of silane in passing and reflected blow-waves, *Fizika goreniya i vzryiva*, no. 4, pp. 37–45. (in Russian);
8. Polandov Yu. Kh., Barg M. A. and Babankov V. A. (2012), On one embodiment, reducing the explosion pressure in the multi-pass gas furnaces, *Pozharovzryvobezopasnost*, no.11, pp. 41- 47. (in Russian);
9. Sobolev V. V., Chernay A. V., Ilyushin M. A. and Zhitnik N. E. (1994), The method of producing the mechanical pulse loading based on the laser-blasting explosive compositions of coatings, *Fizika goreniya i vzryiva*, no.2, pp. 67-73. (in Russian);
10. Pozdeyev S. V. (2011), Mathematical modeling of thermal processes in the firing furnace at a fire test jelly zobetonnoy columns, *Promislova gidravlika ta pnevmatika*, no. 1, pp. 19-27. (in Russian);
11. Belikov A.S., Shalomov V.A., Statsenko Yu.F. and Korzh E.N. *K voprosu obespecheniya bezopasnoy ekspluatatsii metallicheskikh konstruksiy v ochage pozhara* [To a question ensure the safe operation metal structures on the hearth fire]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie. Seriya bezopasnost zhiznedeyatelnosti: Sb. nauchn. trudov.* [Construction, materials science, mechanical engineering. Series life safety: Proceedings]. PDABA. Dnepropetrovsk, 2015, issue 83, pp. 34-39. (in Russian);
12. Chernay A.V. and Nalisko N.N. (2016), *Matematicheskoe modelirovanie vyinuzhdennoho vosplamneniya gazovozdushnoy smesi pri raschete porazhayuschih faktorov avariynih vzryivov* [Mathematical simulation of the forced ignition of the gas mixture in the calculation of the factors affecting emergency explosions], *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no. 5, pp. 162–170. (in Russian);
13. Zaharov E.A., Zlotin G.N. and Zorin V.D. (2007) *Teoriya forsirovaniya goreniya toplivovozdushnoy smesi lokalnyimi dobavkami goryuchih gazov v oblast mezhelektrodnoho zazora svechi zachiganiya* [Theory forcing combustion air-fuel mixture of combustible gases local additions to the spark plug electrode gap], *Izvestiya VolgGTU*, issue 2, no. 8, pp. 7-13. (in Russian).