

УДК 331.452:519.6

## ОЦЕНКА БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ВЗРЫВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГНОЗА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УДАРНОЙ ТРУБЫ

БЕЛИКОВ А. С.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
НАЛИСЬКО Н. Н.<sup>2\*</sup>, *к.т.н., доц.*,  
ШАЛОМОВ В. А.<sup>3</sup>, *к.т.н., доц.*,  
УЛИТИНА М. Ю.<sup>4</sup>, *соискатель.*

<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 безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: shalomov\_v\_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

<sup>4</sup> Департамент науки и образования Харьковской областной государственной администрации, г. Харьков, Украина, тел. +38 (057) 705-03-14 e-mail: m\_ulitina@ro.ru, ORCID ID: 0000-0001-9678-6842

**Аннотация.** *Цель.* Взрывы газовой среды в зданиях и подземных сооружениях (например, в выработках угольных шахт) являются одними из самых опасных аварийных ситуаций промышленных предприятий, связанных с использованием, переработкой или добычей горючих материалов. В угольных шахтах такие взрывы могут происходить не только в процессе эксплуатационных работ, но и во время работ по ликвидации уже произошедших аварий – пожаров и взрывов метана на добычных и проходческих участках. Для надежного расчета устойчивости промышленных объектов, сооружений защищающих горноспасателей или ликвидаторов аварий от повторных взрывов, необходимо знать достоверные параметры опасных факторов взрывных воздушных волн, а именно избыточное давление, импульс взрыва действующий на взрывозащитное сооружение и другие параметры. Цель работы – обоснование критериев адекватности и установление сходимости результатов численного счета для математической модели зажигания и взрыва газовой среды по результатам численного эксперимента. *Методика.* Анализ и обобщение теоретических исследований, математическое моделирование газодинамического процесса взрыва газовой смеси в закрытом объеме. *Результаты.* Рассмотрены существующие экспериментальные и теоретические исследования по определению давления взрыва в замкнутом объеме при обосновании возможности применения математической модели ударной трубы в оценке безопасных условий эксплуатации промышленных объектов производств, которые используют или перерабатывают горючие жидкости и вещества, образующие взрывчатую пыль, а также для условий эксплуатации зданий и сооружений где используется горючие газы (например, для отопления). Приняты критерии оценки адекватности математической модели ударной трубы приняты в соответствии с известным подходом для моделей процессов горения. *Научная новизна.* В работе установлен четвертый уровень адекватности для математической модели ударной трубы в первом этапе по оценке статических параметров в численных экспериментах. Произведен численный расчет давления взрыва газовой смеси в закрытом объеме. *Практическая значимость.* Результаты численного эксперимента позволяют установить достоверные значения давления взрыва газовой смеси в закрытом объеме и таким образом оценить факторы риска безопасной эксплуатации промышленных объектов.

*Ключевые слова:* промышленный объект; давление взрыва; опасные факторы; математическая модель; ударная труба; закрытый объем; газовый взрыв

## ОЦІНКА БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ НАЯВНОСТІ ВИБУХУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГНОЗУ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ УДАРНОЇ ТРУБИ

БЕЛІКОВ А. С.<sup>1</sup>; *д.т.н., проф.*,  
НАЛИСЬКО М. М.<sup>2\*</sup>, *к.т.н., доц.*,  
ШАЛОМОВ В. А.<sup>3</sup>, *к.т.н., доц.*,  
УЛІТИНА М. Ю.<sup>4</sup> *здобувач.*

<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 та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, м. Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: 0507544273@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

<sup>3</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: shalomov\_v\_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

<sup>4</sup> Департамент науки і освіти Харківської обласної державної адміністрації, м. Харків, Україна, тел. +38 (057) 705-03-14 e-mail: m\_ulitina@ro.ru, ORCID ID: 0000-0001-9678-6842

**Анотація. Ціль.** Вибухи газоповітряного середовища в будинках і підземних спорудах (наприклад, у виробках вугільних шахт) є одними із самих небезпечних аварійних ситуацій промислових підприємств, пов'язаних з використанням, переробкою або видобутком горючих матеріалів. У вугільних шахтах такі вибухи можуть відбуватися не тільки в процесі експлуатаційних робіт, але й під час робіт з ліквідації аварій які вже відбулися, – пожежі та вибухи метану на видобувних і прохідницьких ділянках. Для надійного розрахунку стійкості промислових об'єктів та споруджень, що захищають гірничорятувальників або ліквідаторів аварій від повторних вибухів, необхідно знати достовірні параметри небезпечних факторів вибухових повітряних хвиль, а саме надлишковий тиск, імпульс вибуху, що діє на спорудження та інші параметри. Ціль роботи – обґрунтування критеріїв адекватності й установлення збіжності результатів чисельного рахунку для математичної моделі запалювання й вибуху газоповітряних сумішей за результатами чисельного експерименту. **Методика.** Аналіз і узагальнення теоретичних досліджень, математичне моделювання газодинамічного процесу вибуху газоповітряних сумішей в закритому об'ємі. **Результати.** Розглянуто існуючі експериментальні й теоретичні дослідження з визначення тиску вибуху в замкнутому об'ємі при обґрунтуванні можливості застосування математичної моделі ударної труби в оцінці безпечних умов експлуатації промислових об'єктів виробництва, які використовують або переробляють горючі рідини й речовини, що утворюють вибуховий пил, а також для умов експлуатації будинків і споруджень де використовуються горючі гази (наприклад, для опалення). Прийнято критерії оцінки адекватності математичної моделі ударної труби прийняті відповідно до відомого підходу для моделей процесів горіння. **Наукова новизна.** У роботі встановлений четвертий рівень адекватності для математичної моделі ударної труби в першому етапі по оцінці статичних параметрів у чисельних експериментах. Виконано чисельний розрахунок тиску вибуху газоповітряної суміші в закритому об'ємі. **Практична значимість.** Результати чисельного експерименту дозволяють установити достовірні значення тиску вибуху газоповітряної суміші в закритому об'ємі й у такий спосіб оцінити фактори ризику безпечної експлуатації промислових об'єктів.

**Ключові слова:** промисловий об'єкт; тиск вибуху; небезпечні фактори; математична модель; ударна труба; закритий об'єм; газовий вибух

## SAFETY ASSESSMENT OF USE OF INDUSTRIAL FACILITIES IN THE PRESENCE OF EXPLOSION OF FORECAST MATHEMATICAL MODEL SHOCK TUBE

BELIKOV A. S.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
NALISKO N. N.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
SHALOMOV V. A.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
ULITINA M. Yu.<sup>4</sup>, *competitor.*

<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, 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, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

<sup>3</sup> Department of Life Safety, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (056) 756-34-57, e-mail: shalomov\_v\_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

<sup>4</sup> Department of science and education of Harkiv regional state administration, Harkiv, Ukraine, phone +38 (057) 705-03-14 e-mail: m\_ulitina@ro.ru, ORCID ID: 0000-0001-9678-6842

**Abstract. Purpose.** The explosions of gas-air environment in buildings and underground structures (for example, in coal mines) are among the most dangerous industrial accidents related to the use, processing or production of combustible materials. The coal mine such explosions can occur not only in the course of maintenance work, but also during the work on the liquidation has occurred accidents - fires or explosions of methane in the mining and tunneling sites. To reliably calculate the stability of industrial facilities, installations protecting rescuers and emergency workers from repeated explosions, you must know the accurate parameters of the hazards of explosive air waves, namely the overpressure blast impulse acting on the protective structure, and other parameters. Purpose - to study the adequacy of the criteria

and the establishment of the convergence of the numerical calculation results of a mathematical model of ignition and explosion of the gas mixture as a result of numerical experiment. **Method.** Analysis and synthesis of theoretical studies, mathematical modeling of the dynamic processes of the explosion gas mixture in a closed volume. **Results.** The existing experimental and theoretical studies on the explosion pressure in a closed volume in justifying the use of a mathematical model of the shock tube to assess the safe operating conditions of industrial production facilities that use or recycle flammable liquids and substances that form combustible dust, as well as to the operating conditions of buildings and facilities where flammable gases are used (eg for heating). Adopted the criteria for assessing the adequacy of the mathematical model of the shock tube adopted in accordance with well-known approach to models of combustion processes. **Scientific novelty.** In the fourth set the level of adequacy of the mathematical model of the shock tube in the first stage of the evaluation of static parameters in numerical experiments. Produced by a numerical calculation of the explosion pressure gas mixture in a closed volume. **Practical meaningfulness.** Numerical experimental results allow us to establish reliable explosion pressures and gas mixture in a closed volume, and thus to evaluate risk factors for the safe operation of industrial facilities.

*Keywords: industrial facility; explosion pressure; hazards; mathematical simulation; shock tube; closed volume; gas explosion*

**Постановка проблемы.** Взрывы газовоздушной среды в зданиях и подземных сооружениях (например, в выработках угольных шахт) являются одними из самых опасных аварийных ситуаций промышленных предприятий, связанных с использованием, переработкой или добычей горючих материалов. В угольных шахтах такие взрывы могут происходить не только в процессе эксплуатационных работ, но и во время работ по ликвидации уже произошедших аварий – пожаров и взрывов метана на добычных и проходческих участках.

Для надежного расчета устойчивости промышленных объектов, сооружений защищающих горноспасателей или ликвидаторов аварий от повторных взрывов, необходимо знать достоверные параметры опасных факторов взрывных воздушных волн, а именно избыточное давление, импульс взрыва действующий на взрывозащитное сооружение и другие параметры.

**Анализ последних исследований, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** В настоящее время в нормативных документах расчет параметров ударных воздушных волн выполняется на основе экспериментальных данных и эмпирических зависимостей, полученных для некоторых условий. Такие зависимости не вполне удовлетворяют разнообразным условиям производства. В связи с этим продолжают работы по разработке аналитических и численных решений для расчета параметров ударных воздушных волн с учетом всех физических процессов, возникающих при взрыве газовоздушных смесей. Например, известны расчеты на основе термодинамики сгорания углеводородовоздушных смесей [1]. Однако такие решения не учитывают газодинамику взрыва, поэтому современные подходы к расчету параметров, как правило, основаны на численных решениях уравнений газовой динамики. Наиболее известные численные решения приведены в работах [2...5]. Для условий взрыва газовоздушных смесей в ограниченных пространствах авторами получено решение газодинамической задачи [6]. Задача решена численным методом крупных частиц в которой для моделирования процессов зажигания и взрыва газовоздушных смесей использованы уравнения химической кинетики горения углеводородных газов в форме Аррениуса.

**Цель работы.** Одним из этапов разработки математической модели процесса зажигания и горения газовоздушных смесей является установление ее сходимости и адекватности. Цель работы – обоснование критериев адекватности и установление сходимости результатов численного счета для математической модели зажигания и взрыва газовоздушных смесей по результатам численного эксперимента.

**Изложение основного материала исследований.** Для решения рассматриваемой задачи – расчета избыточного давления взрыва рудничной атмосферы в угольных шахтах, использовался газодинамический подход, основанный на численном решении системы уравнений газовой динамики. Задача решалась путём использования методов численного счёта уравнений гидродинамики в системе "газовая взрывчатая среда – окружающая среда". Движение среды в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Эйлера (в дивергентном виде):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{W}) &= 0, & \text{неразрывности} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= \tau \delta \delta \dot{I} dz, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{движения (1)}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{W}) + \operatorname{div}(P \bar{W}) = q \dot{I} dz, \quad \text{энергии,}$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $P$  – давление, Па;  $\bar{W}$  – вектор скорости, м/с;  $u, v$  – компоненты скорости  $\bar{W}$  по оси  $z$  и  $r$  соответственно, м/с;  $z, r$  – цилиндрические координаты;  $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$  – полная энергия, Дж;  $J$  – внутренняя энергия газа, Дж;  $\tau_{\text{тр}}$  – сила трения газового потока о стенки выработки;  $q$  – интенсивность теплового потока, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $\Pi$  – периметр выработки, м.

Для замыкания этой системы используется уравнение состояния идеального газа:

$$P = (\gamma - 1) \rho \cdot J, \quad (2)$$

где  $J$  – внутренняя энергия;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $\rho$  – плотность газа.

Таким образом, система уравнений (1) является

замкнутой и полностью описывает среду при решении газодинамических задач. Решения системы уравнений (1) производилось с использованием однородной схемы сквозного счёта. В качестве такой схемы был применен модифицированный метод крупных частиц.

Поскольку формирование избыточного давления при взрыве определяется скоростью тепловыделения, то для ее расчета предлагается использовать уравнения химической кинетики газозвездных реакций горения в форме Аррениуса:

$$Q = q \cdot c_1^n \cdot c_2^m \cdot k(T), \quad (3)$$

где:  $q$  – тепловой эффект реакции, кДж/моль;  $c_1, c_2$  – концентрации компонентов смеси (метан, кислород);  $n, m$  – порядок реакции;  $k(T)$  – константа скорости химической реакции:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (4)$$

где  $A$  – предэкспонент;  $E$  – энергия активации  $T$  – температура компонентов реакции,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Выделившееся в результате реакции тепло увеличивает внутреннюю энергию частиц газа  $J$ , зная которую можно определить избыточное давление взрыва по уравнению состояния газа (2).

Представленная задача решена в цилиндрической системе координат, в которой расчетная область представлена в виде цилиндрического канала. По сути, такая схема представляет собой ударную трубу с некоторым участком заполненным газозвездной смесью. Быстрое горение смеси вызывает формирование и распространение ударных воздушных волн в цилиндрической трубе.

Адекватность математической модели ударной трубы предполагается установить на основании критериев теоретических моделей процессов горения принятых в работе [7]. В работе отмечается, что на физическом уровне строгости адекватность экспериментальных и теоретических моделей означает равенство условий, параметров и основных характеристик изучаемого процесса и сопоставляемой ему модели. Процессы горения очень разнообразны. Это создает трудности для обобщения результатов численных экспериментов. Поэтому, согласно работы [7], степень адекватности теоретических моделей включает четыре уровня соответствия экспериментальным представлениям. Требования первого уровня минимальны и предполагают совпадение главных характеристик процесса с учетом упрощений, принятых в математической постановке. Второй уровень предполагает не только сходство процессов, но и качественное совпадение их закономерностей (возрастающие, убывающие, с насыщением и др.). На этом уровне сравнивается только характер поведения зависимостей, а их количественное выражение может быть различным. Третий уровень адекватности

требует, чтобы зависимость каких-либо характеристик процесса совпадали не только качественно, но и количественно. Если одни характеристики процесса совпали количественно, а другие только качественно, такой случай относят ко второму уровню. Четвертый уровень предполагает абсолютное совпадение результатов: математическая модель полностью количественно описывает процесс, т.е. физический эксперимент может быть полностью предсказан.

Поскольку в рассматриваемом процессе важны не только количественные параметры ударных воздушных волн и фронта горения (максимальное и мгновенное значение избыточного давления, температуры, импульса и др.), а и динамические характеристики процесса (скорость увеличения давления  $dp/dt$ , скорость химической реакции, скорость разгрузки и др.), а также характеристики химической кинетики, то оценку адекватности математической модели предлагается разделить на три этапа (рис. 1).

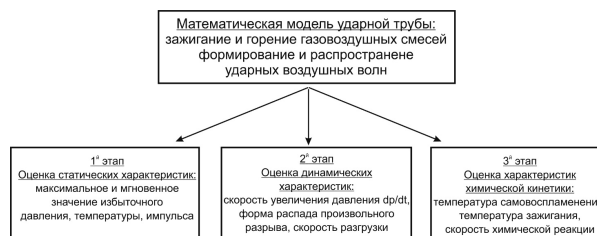


Рис. 1. Этапы оценки адекватности математической модели ударной трубы / Stages of assessing the adequacy of the mathematical model of the shock tube

В представленной статье оценка адекватности математической модели ударной трубы производится по первому этапу. Для этого предлагается произвести оценку статических характеристик в численном эксперименте взрыва газозвездной смеси в закрытом объеме.

Задача взрыва газозвездных смесей в закрытом объеме сама по себе очень интересна с практической точки зрения, т.к. через неё исследователи пытаются установить максимальные давления взрыва при оценке их последствий внутри некоторых объемов (помещений, корпусов технологического оборудования и др.). Такие задачи в настоящее время рассматриваются в квазистатических подходах.

На сегодняшний день проведено достаточно много теоретических расчетов и экспериментальных исследований по данной проблеме, однако однозначных значений давлений не получено. Так во многих экспериментальных исследованиях взрывы метановоздушных смесей стехиометрической концентрации давали максимальные давления от 0,7 до 1,3 МПа [1, 8, 9, 11]. Официальные справочные данные в нормативных расчетах рекомендуют принимать данную величину в пределах от 0,717 до 0,9 МПа или принимать из экспериментальных исследований для конкретных условий [10].

Существующие теоретические расчеты дают значительно отличающиеся максимальные значения давления. Теоретические значения, как правило, дают завышенные значения т.к. предлагаемые модели расчета имеют упрощения и не учитывают некоторых факторов, в то время как в экспериментальных измерениях могут не учитываться различного вида потери. В работах Б. Е. Гельфанда приведены расчеты давления взрыва внутри газового облака – 1,7 МПа. В работе [1] расчеты выполненные на основе термодинамики сгорания метановоздушной смеси дают значения максимального адиабатического давления в закрытом сосуде 8,7 МПа.

Для того, чтобы в тестовых расчетах исследовать только статические характеристики процесса горения необходима постановка задачи о самовозгорании метановоздушной смеси. В режиме самовозгорания процесс горения будет происходить одновременно в каждой расчетной ячейке и таким образом, исключаются газодинамические процессы, возникающие при перепаде давлений на их границах, т.е. волновые процессы отсутствуют. В связи с тем, что на динамику процесса горения и энерговыделения влияют параметры уравнения Аррениуса, а именно величина предэкспоненты, энергии активации и порядок уравнения по компонентам смеси, то влияние этих компонент исключается, а на величину давления будет влиять только величина теплового эффекта реакции – теплота сгорания метана, вне зависимости как долго будет происходить процесс горения.

Численный эксперимент самовозгорания в математической модели ударной трубы можно реализовать достаточно эффективно и в идеальных адиабатических условиях. Согласно условиям натурального эксперимента, самовозгорание вызывается путем равномерного медленного нагрева сосуда с газом. В численном эксперименте равномерный нагрев моделируется начальными условиями по температуре. Начальная температура во всех расчетных ячейках задается равной температуре самовозгорания газа или выше. Такое температурное поле вносит погрешность в расчет максимального значения давления в сторону увеличения, т.к. начальная температура увеличивает внутреннюю энергию газа, которая в свою очередь определяет его давление (2):

$$J = C_v t + \Delta C_v t^2, \quad (5)$$

где  $J$  – внутренняя энергия газа, Дж/кг;  $C_v$  – удельная изохорная теплоемкость смеси при 0°C, Дж/(кг·°C);  $\Delta C_v$  – приращение удельной изохорной теплоемкости смеси, Дж/(кг·°C);  $t$  – температура газа, °C.

Для того, чтобы нивелировать данную погрешность необходимо после окончания расчета внести поправку в результат путем определения давления газа, полученного от начального поля температур согласно (2), (5) и вычитания его из результата расчета.

Схема математической постановки задачи приведена на рис. 2.

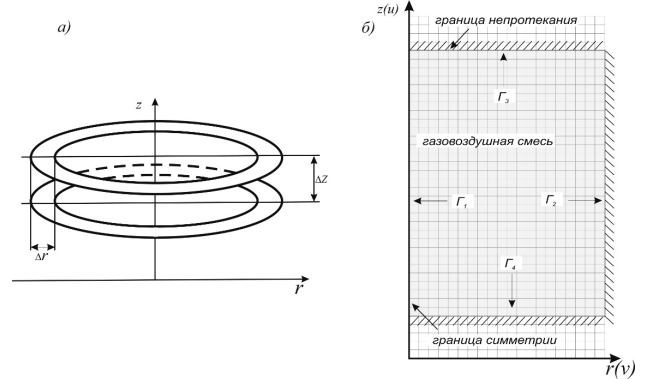


Рис. 2. Математическая постановка задачи: а) цилиндрический элемент расчетной сетки, б) расчетная сетка / The mathematical formulation of the problem: a) a cylindrical element of the computational grid, b) the estimated grid

Начальные условия задачи:  $p_0 = p_{атм}$ ;  $C_{CH4} = 9,5\%$ ,  $C_{O2} = 21\%$ ,  $C_{N2} = 69,5\%$ ,  $T_0 = T_{зажиг}$ ;  $v_0=0$ ,  $u_0=0$ ;  $\rho_0 = \rho_{см}$ .

Граничные условия:

$$\Gamma_1 - \frac{du_{0-1}}{dt} = \frac{du_0}{dt}; \quad \frac{dv_{0-1}}{dt} = -\frac{dv_0}{dt};$$

$$\frac{dc_{0-1}}{dt} = \frac{dc_0}{dt}; \quad \frac{d\rho_{0-1}}{dt} = \frac{d\rho_0}{dt} \text{ симметрия};$$

$$\Gamma_2 - \frac{du_{\max+1}}{dt} = -\frac{du_{\max}}{dt}; \quad \frac{dv_{\max+1}}{dt} = -\frac{dv_{\max}}{dt};$$

$$\frac{dc_{\max+1}}{dt} = \frac{dc_{\max}}{dt}; \quad \frac{d\rho_{\max+1}}{dt} = \frac{d\rho_{\max}}{dt} \text{ непротекание};$$

$$\Gamma_3 - \frac{du_{\max+1}}{dt} = -\frac{du_{\max}}{dt}; \quad \frac{dv_{\max+1}}{dt} = -\frac{dv_{\max}}{dt};$$

$$\frac{dc_{\max+1}}{dt} = \frac{dc_{\max}}{dt}; \quad \frac{d\rho_{\max+1}}{dt} = \frac{d\rho_{\max}}{dt} \text{ непротекание};$$

$$\Gamma_4 - \frac{du_{\min-1}}{dt} = -\frac{du_{\min}}{dt}; \quad \frac{dv_{\min-1}}{dt} = -\frac{dv_{\min}}{dt};$$

$$\frac{dc_{\min-1}}{dt} = \frac{dc_{\min}}{dt}; \quad \frac{d\rho_{\min-1}}{dt} = \frac{d\rho_{\min}}{dt} \text{ непротекание}.$$

Расчетная область представляет собой цилиндр, длиной 1,0 м, диаметром 0,5 м. Размер расчетной ячейки 0,01 м, шаг по времени  $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$  с. Величина начальной температуры принимается выше температуры зажигания для ускорения и полноты процесса сгорания. Результат расчета представлен на рис. 3.

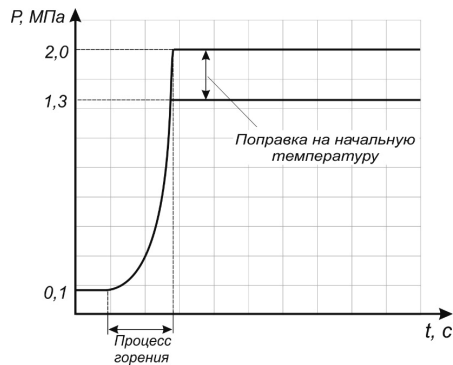


Рис. 3. Результаты численного расчета давления взрыва метановоздушной смеси стехиометрической концентрации с учетом теплоты сгорания метана / The results of numerical calculation of methane-air mixture explosion pressure stoichiometric concentration, taking into account the heat of combustion of methane

Результаты расчета показали, что величина давления взрыва метана стехиометрической концентрации в закрытом объеме с учетом поправки на начальную температуру, составит 1,3 МПа, значительно ближе к значениям, полученным в экспериментальных исследованиях, чем расчетные величины в других теоретических исследованиях.

Величину давления взрыва в закрытом объеме также можно оценить из следующих соображений. Поскольку в процессе отсутствуют газодинамические эффекты, то вся тепловая энергия сгорания топлива расходуется на увеличения внутренней энергии газа. В адиабатических условиях закрытой камеры:

$$J = Q \cdot C,$$

где  $Q$  – теплота сгорания метана, Дж/кг;  $C$  – массовая стехиометрическая концентрация метана в воздухе;

$$J = 50 \cdot 10^6 \cdot 0,055 = 2,75 \text{ МДж/кг.}$$

Согласно (2) давление в закрытой камере составит:

$$P = (\gamma - 1) \rho \cdot J = (1,3779 - 1) \cdot 2,75 \cdot 10^6 \cdot 1,236 = 1,28 \text{ МПа,} \quad (6)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты для смеси газов азот плюс продукты горения ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ );  $\rho$  – плотность смеси газов,  $\text{кг/м}^3$ .

Низкие значения давления, полученные в лабораторных экспериментах, в сравнении расчетом для идеальных условий (6) можно объяснить потерями на газодинамические процессы (ударные волны, перемещение масс) которые возникают в закрытом объеме, несмотря на медленный прогрев камеры. Возгорание, предположительно, возникает не по всему объему одновременно, а в пристеночном слое, что вызывает возникновению фронта распространения горения и других процессов, приводящих к потерям энергии. Этот процесс, более выраженный если зажигание производят от точечного источника.

**Выводы.** Результаты численного эксперимента позволяют установить достоверные значения давления взрыва газовой смеси в закрытом объеме и таким образом оценить факторы риска безопасной эксплуатации промышленных объектов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамова А.В., Гири А.А. Компьютерное моделирование аварийных взрывных процессов. / Сб. докл. и тез. II-го Межд. молод. форума «Информ. технологии в XXI веке» УГХТУ, 2004, стр. 4–6.
2. Агеев В.Г. Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана // Горноспасательное дело. – 2010. – Вып. 47. – С. 5–10.
3. Агеев В.Г., Зинченко И.Н. Моделирование распространения ударных волн при мгновенной и цепной реакциях горения метана и пыли в горных выработках // «Форум гірників – 2012»: Матеріали міжнародної конференції, 3-6 жовтня 2012 г., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ: НГУ, 2012. – С. 12-16.
4. Бабури А.В., Нестеров М.Ю. Параметры взрывного горения метана в окислительной среде // Материалы XX научно-техн. конференции "Системы безопасности –2011". – М.: Академия ГПС МЧС России, 2011. – С. 163-165. – Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/sb/2011/section-2>.
5. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрыва. – Санкт-Петербург: ООО «Издательство «Полигон», 2002. – 272 с.
6. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. – М.: Пожнаука, 2007. – 266 с.
7. Мержанов А.Г., Быков В.И. Об адекватности экспериментальных и теоретических моделей процессов горения // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46. – №5. – С. 65–70.
8. НАПБ Б.03.002-2007. Нормы определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – Киев, 2007. – 27 с.
9. Поландов Ю.Х., Барг М.А., Власенко С.А., Моделирование процессов горения газовой смеси методом крупных частиц // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16. – №3. – С. 6–9.
10. РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей // Методики оценки последствий в опасных производственных объектах: Сб. док. – Сер. 27. – Вып. 2. – Москва: НТЦ «Промышленная безопасность», 2005. – С. 4–34.
11. Свідोцтво авторського права на твір № 64123 від 16.02.2016 Україна: Комп'ютерна програма VL-MCE 1.0 «Моделирование розповсюдження ударної повітряної хвилі в ударній трубі» [Текст] / Налисько М.М.; Заявник та власник авторського права Придніпровська державна академія будівництва та архітектури;
12. СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003 Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром».
13. Warnatz, J. Maas, U. and Dibble, R.W. (2001), Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulations, experiments, pollutant formation, Springer, 352 p.

## REFERENCES

1. Abramova A.V. and Girin A.A. Kompyuternoe modelirovanie avariynnykh vzryivnykh protsessov [Computer simulation of emergency explosive processes]. Sbornik dokladov i tezisov II-go Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma «Informatsionnyie tehnologii v XXI veke» [The collection of reports and theses II-th International Youth Forum "Information technology in the XXI century"]. Ukrainskiy gosudarstvennyiy himiko-tehnologicheskii universitet. Dnipro, 2004, pp. 4–6. (in Russian).
2. Ageev V. G. Matematicheskaya model formirovaniya udarnykh voln v gornyykh vyirabotkakh pri vzryivakh metana [The mathematical model of the shock wave formation in the mines by the methane explosions]. Gornospasatelnoe delo [The mine rescue work]. 2010, issue 47, pp. 5-10. (in Russian).
3. Ageev V.G. and Zinchenko I.N. Modelirovanie rasprostraneniya udarnykh voln pri mgnovennoy i tsepnoy reaktsiyah gorenii metana i pyili v gornyykh vyirabotkakh [Modeling of shock waves propagation at momentary and chain reaction of methane and dust combustion in mine working]. «Forum hirnykiv – 2012»: Materialy mizhnarodnoi konferentsii, 3-6 zhovtnia 2012 h., Dnipropetrovsk, Ukraina [«Miners forum – 2012»: Materials of the international conference, 3-6th of October 2012, Dnipro, Ukraine]. Dnipropetrovsk: The National Mine University Publ., 2012, pp.12-16. (in Russian).
4. Baburin A.V. and Nesterov M.Yu. Parametry vzryivnogo gorenii metana v oksidativnoy srede [Parameters explosive combustion of methane in an oxidative environment]. Materialy XX nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Sistemy bezopasnosti –2011» [Proceedings of the IX scientific-technical conference "Safety Systems 2011"].: Akademiya gosudarstvennoy pozharnoy sluzhby Rossii. Moscow, 2011, pp. 163-165. (in Russian). Available at: <http://ipb.mos.ru/sb/2011/section-2>.
5. Gelfand B.E. and Silnikov M.V. Fugasnyie efekty vzryiva [High-explosive blast effects]. Sankt-Peterburg: OOO «Izdatelstvo «Poligon», 2002, 272 p.
6. Korolchenko A.Ya. Protsesty gorenii i vzryiva [The process of combustion and explosion]. Moscow: Pozhnauka, 2007, 266 p. (in Russian).
7. Merzhanov A.G. and Byikov V.I. Ob adekvatnosti eksperimentalnykh i teoreticheskikh modeley protsessov gorenii [The adequacy of the experimental and theoretical models of combustion processes]. Fizika gorenii i vzryiva [The physics of combustion and explosion]. 2010, vol. 46, no. 5, pp. 65-70. (in Russian).
8. Nalisko M.M. Svidotstvo avtorskogo prava na tvir № 64123 vid 16.02.2016 Ukrayina: Komp'yuterna programa VL-MCE 1.0 «Modelyuvannya rozpovsyudzhennya udarnoyi povitryanoyi hvili v udarniy trubi» [The certificate copyright number 64123 of 02.16.2016 Ukraine: Computer program VL-MCE 1.0 «Modeling the distribution of air shock waves in the shock tube»]. Zayavnik ta vlasnik avtorskogo prava Pridniprovska derzhavna akademiya budivnitstva ta arhitekturi [The applicant and the owner of the copyright Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. (in Ukrainian).
9. NAPB B.03.002-2007. Normy opredeleniya kategoriy pomescheniy, zdaniy i naruzhnykh ustanovok po vzryivopozharney i pozharney opasnosti [NAPB B.03.002-2007 The rules specify the category of rooms, buildings and outdoor facilities for explosion and fire hazard]. Kiev, 2007, 27 p. (in Russian). Available at: <http://www.112.gov.ua/files/2014/8/29/NAPB.pdf>.
10. Polandov Yu.H., Barg M.A. and Vlasenko S.A. Modelirovanie protsessov gorenii gazovozdushnoy smesi metodom krupnykh chastits [Modelling of processes of combustion gas mixture by large particles]. Pozharovzryivobezopasnost [Fire and Explosive Safety]. 2007, vol. 16, no. 3, pp. 6–9. (in Russian).
11. RD 03-409-01. Metodika otsenki posledstviy avariynnykh vzryivov toplivno-vozdushnykh smesey [RD 03-409-01. Methods of assessing the effects of accidental explosions of fuel-air mixtures]. Metodiki otsenki posledstviy na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh: Sbornik dokladov [Methods impact assessment at hazardous production facilities: Collection of reports]. Moscow: NTTs «Promyshlennaya bezopasnost», 2005, Vol. 27, iss. 2. pp. 4-34. (in Russian).
12. STO RD Gazprom 39-1.10-084-2003 Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska dlya opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov gazotransportnykh predpriyatiy OAO «Gazprom» [STO RD Gazprom 39-1.10-084-2003 Guidelines for risk analysis of hazardous production facilities for transport enterprises OJSC «Gazprom»]. (in Russian).
13. Warnatz, J. Maas, U. and Dibble, R.W. (2001), Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulations, experiments, pollutant formation, Springer, 352 p.

Статья поступила в редколлегию 23.08.2016