

УДК 533

ВЗРЫВ КОЛЬЦЕВОГО ЗАРЯДА НА ЗАПЫЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.А. ЛЕВИН¹, В.В. МАРКОВ², Г.Б. СИЗЫХ³

¹НИИ механики МГУ им М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Математический институт им В.А. Стеклова РАН, г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Москва, Россия

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 16-29-01092)
и Министерства образования и науки РФ (НШ-8425.2016.1)

Рассматриваемая задача связана с проблемой безопасности полетов в зоне лесных пожаров. Известно, что прекратить пожар можно, сбив пламя, например, мощным потоком воздуха. Такой поток возникает за взрывной ударной волной. Естественно предположить, что для усиления воздействия взрывной волны можно использовать заряд взрывчатого вещества кольцевой формы. Ударная волна, возникающая при взрыве такого заряда, должна усиливаться по мере движения к центру и может служить средством транспортировки ингибирующей пыли в очаг пожара. Кроме того, возникающий после схлопывания сходящейся ударной волны сильный восходящий поток сможет поднять пыль на большую высоту и способствовать гашению пламени осаждающимся ингибитором на большой площади. Этот восходящий поток может оказаться опасным для летательных аппаратов, находящихся в небе над пожаром. Для выяснения ширины и высоты опасной для полетов зоны проводится численное моделирование кольцевого взрыва и последующих за этим движений пылегазовых смесей. Газ считается идеальным и совершенным. Взрыв моделируется мгновенным повышением удельной внутренней энергии в кольцевой области на величину удельного тепловыделения взрывчатого вещества. Течение рассматривается как двумерное и осесимметричное. Для описания движения неравновесной пылегазовой смеси в рамках модели взаимопроникающих континуумов используются уравнения Эйлера в цилиндрической системе координат. Ось симметрии перпендикулярна поверхности, которая считается абсолютно жесткой и является границей расчетной области. На ней выставляется условие непротекания. Для численных расчетов используется метод С.К. Годунова с движущейся сеткой и явным выделением головной ударной волны в качестве границы зоны вычисления. Одна система линий расчетной сетки перемещается в соответствии с движением этой ударной волны, а другая остается неподвижной. Расчеты проведены при различных величинах радиусов кольцевой области и размеров ее прямоугольного поперечного сечения. Численные результаты показывают, что кумуляция потока происходит вблизи оси симметрии, и в результате сильная ударная волна распространяется вверх вдоль оси симметрии, и частицы поднимаются высоко над поверхностью. Эти расчеты позволяют оценить для типичных ситуаций размеры опасной зоны.

Ключевые слова: взрыв кольцевого заряда, подъем пыли, тушение пожара, безопасность полетов.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что проблема тушения пожара является одной из наиболее важных для нашего времени из-за его очень большой опасности для природы, промышленности и людей. Есть много способов тушения пожара, и среди них есть способы, основанные на использовании пыли, состоящей из инертных частиц [1–3]. Пылевые облака можно образовывать с помощью точечных подрывов. Весьма привлекательно для усиления воздействия взрывной волны использовать заряд взрывчатого вещества кольцевой формы. В этом случае образуется сходящаяся ударная волна, которая усиливается при распространении в направлении оси симметрии. Эта ударная волна может быть использована для транспортировки ингибирующей пыли в очаг пожара. После схлопывания сходящейся ударной волны может возникнуть сильный восходящий поток, который сможет поднять пыль на большую высоту. Очевидно, что таким образом будет усилен эффект воздействия пыли за счет ее оседания сверху в очаг пожара. Такой способ тушения пожара требует соблюдения мер безопасности. В частности, запрета поле-

тов в зоне проведения взрыва. Данная статья посвящена оценке размеров опасной для полетов зоны.

Самым простым способом исследования описанного процесса является численное моделирование. Конечно-разностный метод, который используется в настоящем исследовании, был предложен в [4]. Он основан на схеме Годунова для уравнений газовой динамики [5, 6] и на методе крупных частиц для уравнений, описывающих движение частиц [7]. Разработанная математическая модель основана на фундаментальной концепции взаимопроникающих континуумов для многофазных смесей [8].

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Как уже было сказано, газовая среда и частицы пыли рассматриваются как два взаимопроникающих континуума. Газ считается идеальным, и поэтому транспортные эффекты, такие как вязкость и теплопроводность, не учитываются внутри потока, за исключением силового и теплового взаимодействия между газом и частицами. Для простоты газовая фаза рассматривается как совершенный газ с постоянным отношением удельных теплоемкостей. Что касается другой фазы, то предполагается, что частицы представляют собой гладкие твердые шарики одного и того же радиуса. Объемная доля частиц и взаимодействие между ними не учитываются. Скорости и температура каждой фазы могут отличаться. В рамках этих предположений уравнения, описывающие двухфазный поток, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial r} + \frac{\partial \rho_1 v_1}{\partial z} &= 0, \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial r} + \frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \rho_1 u_1 r}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1^2 r}{\partial r} + \frac{\partial \rho_1 u_1 v_1 r}{\partial z} + \frac{\partial p r}{\partial r} &= p - r F_r, \\ \frac{\partial \rho_1 v_1 r}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 v_1 u_1 r}{\partial r} + \frac{\partial \rho_1 v_1^2 r}{\partial z} + \frac{\partial p r}{\partial z} &= -r(F_z + \rho_1 g), \\ \frac{\partial \rho_2 u_2 r}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2^2 r}{\partial r} + \frac{\partial \rho_2 u_2 v_2 r}{\partial z} &= r F_r, \\ \frac{\partial \rho_2 v_2 r}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 v_2 u_2 r}{\partial r} + \frac{\partial \rho_2 v_2^2 r}{\partial z} &= r(F_z - \rho_2 g), \\ \frac{\partial E_1 r}{\partial t} + \frac{\partial (E_1 + p) u_1 r}{\partial r} + \frac{\partial (E_1 + p) v_1 r}{\partial z} &= -r(F_r u_2 + F_z v_2 + v_1 \rho_1 g + Q_T), \\ \frac{\partial E_2 r}{\partial t} + \frac{\partial E_2 u_2 r}{\partial r} + \frac{\partial E_2 v_2 r}{\partial z} &= r(F_r u_2 + F_z v_2 - v_2 \rho_2 g + Q_T), \end{aligned}$$

где индексы 1 и 2 обозначают параметры газа и частиц соответственно, ρ_i – плотность, u_i и v_i – r - и z -компоненты векторов скорости газа $\vec{V}_1 = (u_1, v_1)$ и частиц $\vec{V}_2 = (u_2, v_2)$, p – давление газа, $\vec{F} = (F_r, F_z)$ сила межфазного взаимодействия, действующая на частицы со стороны газовой фазы, Q_T – интенсивность теплообмена между фазами (конвективный тепловой поток), $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ – ускорение свободного падения. Эти уравнения замыкаются следующими соотношениями:

$$E_1 = 0,5 \rho_1 (u_1^2 + v_1^2) + \rho_1 e_1, \quad E_2 = 0,5 \rho_2 (u_2^2 + v_2^2) + \rho_2 e_2,$$

$$e_1 = c_1 T_1, \quad e_2 = c_2 T_2, \quad p = \rho_1 R T_1,$$

где e_i , T_i , R – обозначают внутреннюю энергию, температуру и универсальную газовую постоянную соответственно, c_1 , c_2 – удельные теплоемкости при постоянном объеме для газа и частиц.

Плотность твердой фазы ρ_2 связана с плотностью числа частиц n , их диаметром d и плотностью вещества ρ_{dust} , из которого состоят частицы пыли, формулой

$$\rho_2 = n \rho_{dust} \pi d^3 / 6.$$

Межфазное взаимодействие определяется конвективным тепловым потоком, который вычисляется по формуле

$$Q_T = n \pi d \lambda_1 Nu (T_1 - T_2),$$

и силой межфазного взаимодействия \vec{F} , действующей на частицы пыли со стороны газа и состоящей из силы сопротивления \vec{f}_R , связанной с разностью скоростей газа и частиц, и силой Магнуса \vec{f}_M , связанной с вращением частиц. (То есть $\vec{F} = \vec{f}_R + \vec{f}_M$.) Сила сопротивления, действующая на частицы пыли со стороны газа, вычисляется по формуле

$$\vec{f}_R = n \pi d^2 C_D \rho_1 |\vec{V}_1 - \vec{V}_2| (\vec{V}_1 - \vec{V}_2) / 8,$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности для газовой фазы, C_D и Nu рассчитываются с помощью эмпирических функций через число Рейнольдса Re и число Прандтля Pr следующим образом:

$$C_D = 24(1 + Re^{2/3} / 6) / Re, \quad Nu = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad Pr = 0,72, \quad Re = d \rho_1 |\vec{V}_1 - \vec{V}_2| / \mu,$$

где μ – коэффициент динамической вязкости.

Было установлено [9], что сила Магнуса имеет важное значение для понимания механизма переноса частиц и диспергирования. В рассматриваемой модели предполагается, что каждая частица вовлекается во вращение благодаря завихренности потока, и угловая скорость ее вращения пропорциональна завихренности газа. В этом предположении силу Магнуса, действующую на частицы пыли со стороны газа, можно представить в виде

$$\vec{f}_M = n K_M d^3 \rho_1 [(\vec{V}_1 - \vec{V}_2), rot \vec{V}_1] / 8,$$

где K_M – безразмерный коэффициент, величина которого не может быть получена аналитически, и ее следует оценивать экспериментально. Тем не менее некоторые оценки, проведенные с помощью вычислительного эксперимента [9], показывают, что эта величина колеблется в пределах от нескольких единиц до нескольких десятков.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается задача о многофазном течении, возникающем в результате взрыва кольцевого заряда. Эскиз-схема, иллюстрирующая постановку задачи, представлена на рис. 1.

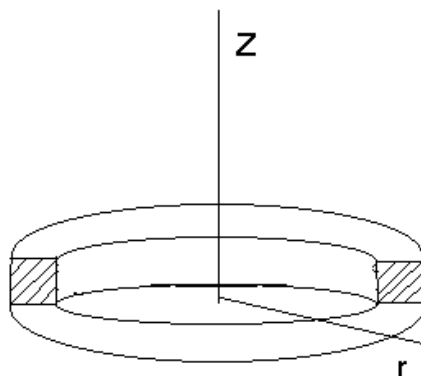


Рис. 1. Кольцевой объем горючей смеси
Fig. 1. The annular volume of the fuel mixture

Предполагается, что кольцевой заряд располагается на земле (на твердой поверхности) и представляет собой газообразное взрывчатое вещество. Взрыв заряда моделируется мгновенным увеличением удельной внутренней энергии на величину тепловыделения взрывчатого вещества. Геометрия заряда определяется внутренним R_{int} и внешним R_{ext} радиусами и высотой H_{exp} .

Предполагается, что пыль находится внутри кольца, и она заполняет либо весь цилиндрический объем, либо тонкий слой толщиной h_{dust} вблизи поверхности земли при начальной плотности твердой фазы $\rho_2 = \rho_{20}$. Соответствующие граничные условия выставляются на границах расчетного поля течения. Этими границами являются ударная волна и поверхность земли. На ударной волне выполняются законы сохранения массы, импульса и полной энергии газа. Что касается другой фазы, то, в соответствии с пренебрежением объемной долей частиц, предполагается непрерывность параметров пыли при переходе через ударную волну. На поверхности земли выполняется условие непротекания для газа и условие упругого отражения для частиц. В начальный момент газ и частицы находятся в состоянии покоя при атмосферном давлении и комнатной температуре.

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Численная процедура основана на принципе физического расщепления дифференциальных операторов основных уравнений в частных производных. В соответствии с этим принципом сначала рассчитываются параметры газа, затем параметры пыли, и, наконец, параметры пылегазовой смеси после взаимодействия между ее фазами. Расчет течения газа осуществляется при помощи классической схемы С.К. Годунова с подвижной расчетной сеткой при явном выделении головной ударной волны в качестве границы расчетной области. Способ явного выделения ударной волны давно известен и хорошо зарекомендовал себя при вычислении ударных волн сложной формы. Для расчета течения пыли используется вариант метода крупных частиц. Взаимодействие фаз рассчитывается с помощью метода релаксации, предложенного Г.Б. Сизых в работе [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты взрыва проводились для воздуха при атмосферном давлении, температуре $T_0 = 298 K$ и коэффициенте вязкости $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5} kg/ms$ при различных внутренних радиусах кольцевой области и размерах ее прямоугольного поперечного сечения. Некоторые результаты численного моделирования для частиц диаметром $d = 60 \mu m$ с плотностью вещества

$\rho_{dust} = 1600 \text{ kg/m}^3$ и удельной теплоемкостью $c_2 = 1050 \text{ kg/(s}^2 \cdot \text{K)}$ представлены ниже на рисунках. На этих рисунках показаны область, заполненная пылегазовой смесью (серым цветом), и положение фронта ударной волны (сплошная линия). Рис. 2 соответствует времени, когда ударная волна достигла высоты 29 м. Рис. 2, а и 2, б относятся к случаю $\rho_{20} = 13 \text{ kg/m}^3$, $h_{dust} = 0,06 \text{ m}$, $R_{int} = 5,0 \text{ m}$, $R_{ext} = 5,5 \text{ m}$, $H_{exp} = 0,5 \text{ m}$, при разных значениях K_M : $K_M = 20,0$ (2, а) и $K_M = 200,0$ (2, б). Рис. 2, с соответствует $\rho_{20} = 130 \text{ kg/m}^3$ и $K_M = 20,0$. Рис. 2, д – относится к случаю $\rho_{20} = 13 \text{ kg/m}^3$, $h_{dust} = 1,0 \text{ m}$, $R_{int} = 10,0 \text{ m}$, $R_{ext} = 11,0 \text{ m}$, $H_{exp} = 1,0 \text{ m}$, $K_M = 20,0$. Рис. 3 демонстрирует динамику облака пыли при $\rho_{20} = 13 \text{ kg/m}^3$, $h_{dust} = 0,06 \text{ m}$, $R_{int} = 5,0 \text{ m}$, $R_{ext} = 5,5 \text{ m}$, $H_{exp} = 0,5 \text{ m}$, $K_M = 200,0$.

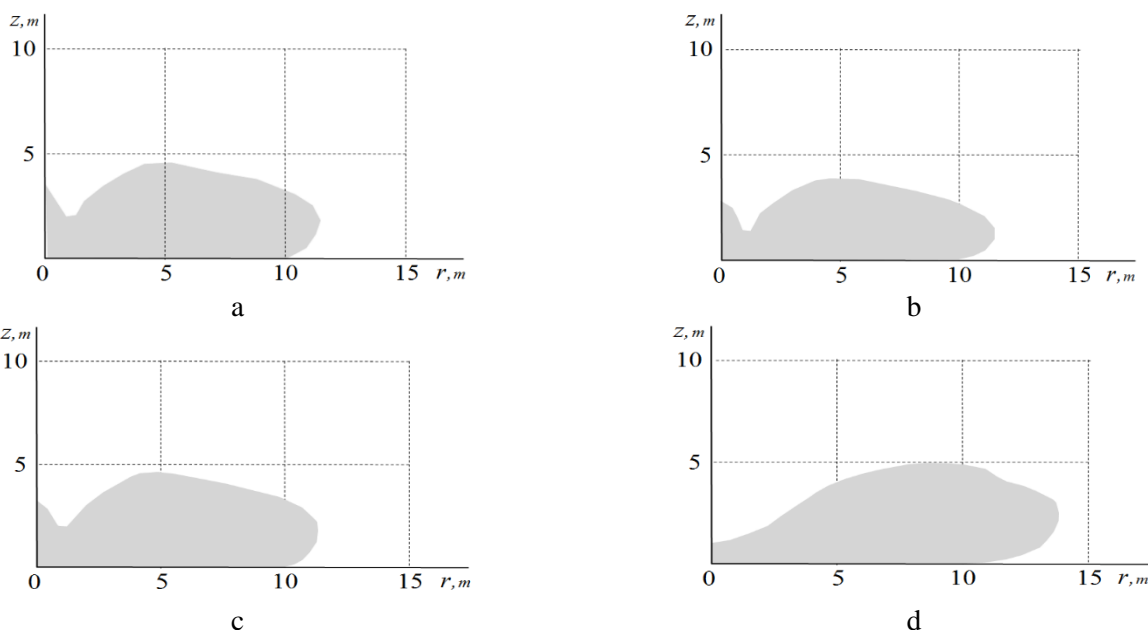


Рис. 2. Область, заполненная пылегазовой смесью
 Fig. 2. The region filled with dust-air mixture

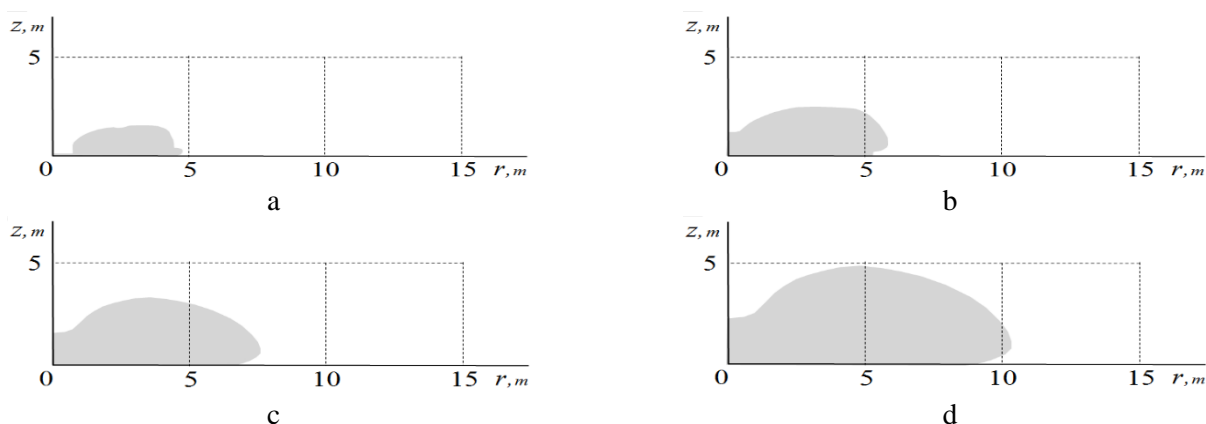


Рис. 3. Динамика формирования пылевого облака
 Fig. 3. Dynamics of the formation of dust cloud

На рис. 4 представлены результаты расчетов для случая, когда первоначально пыль заполняет весь объем внутри тора, при $\rho_{20} = 13 \text{ kg/m}^3$, $h_{dust} = 0,5 \text{ m}$, $R_{int} = 5,0 \text{ m}$, $R_{ext} = 5,5 \text{ m}$, $H_{exp} = 0,5 \text{ m}$, $K_M = 20,0$.

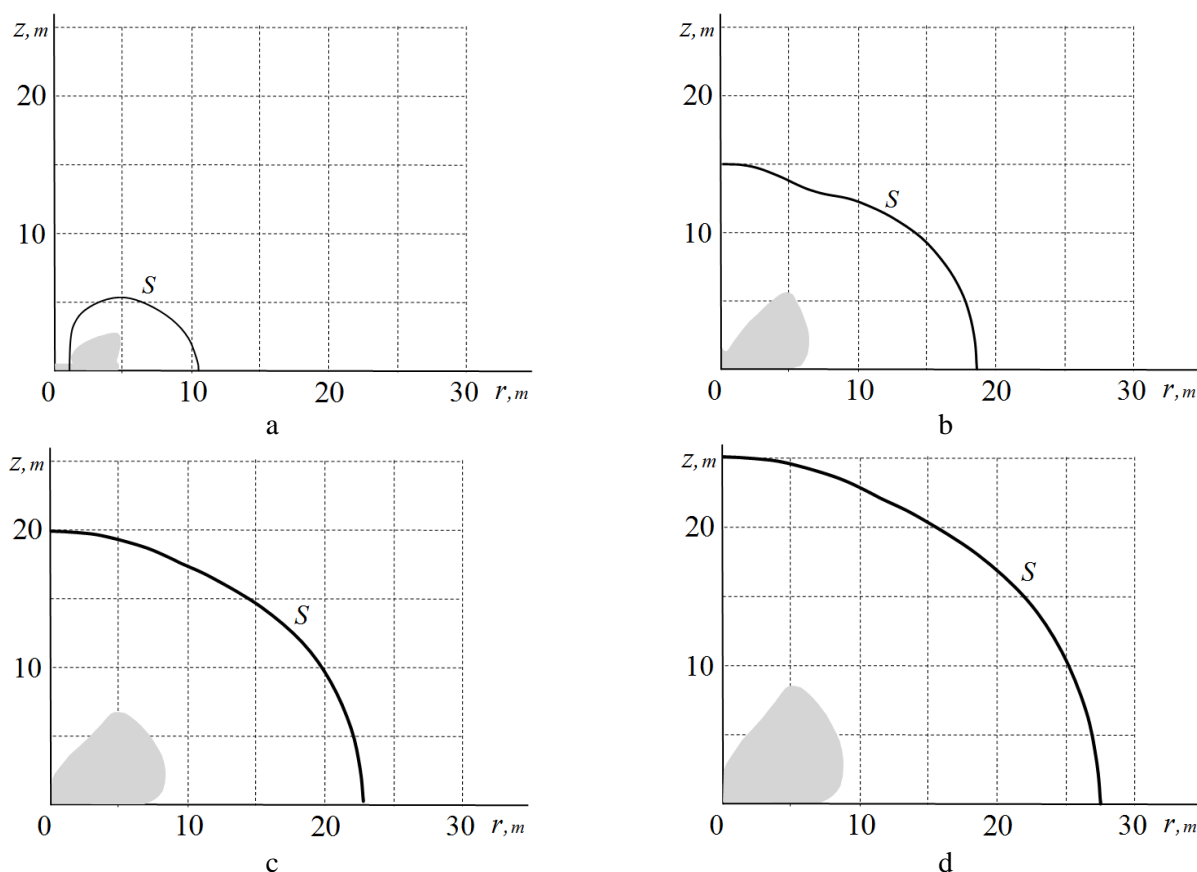


Рис. 4. Область, заполненная пылегазовой смесью, и положение фронта ударной волны (S)
Fig. 4. The region filled with dust-air mixture and position of the shock wave (S)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты показали, что кумуляция потока происходит вблизи оси симметрии, и, как результат, сильная ударная волна распространяется вверх вдоль оси симметрии, а частицы достаточно высоко поднимаются над поверхностью. Сравнение динамики пылевого облака при различных значениях коэффициента K_M в выражении для силы Магнуса показывает, что этот коэффициент практически не влияет на динамику облака (рис. 2, *a* и 2, *b*). Динамика облака также не зависит от начальной плотности частиц (рис. 2, *a* и 2, *c*). Увеличение линейных размеров заряда практически не влияет на высоту пылевого облака (рис. 2, *a* и 2, *d*). Она существенно возрастает, когда первоначально пыль заполняет весь цилиндрический объем внутри заряда (рис. 4). Установлено, что пылевое облако разрастается вдоль поверхности земли из-за сильного расходящегося потока газа, возникающего после отражения сходящейся ударной волны от оси симметрии. Около оси формируется сильный вихрь. Как и при проведении любых взрывных работ, следует уделять особое внимание вопросу безопасности. В случае использования кольцевых зарядов при проведении пожаротушения следует избегать появления в зоне взрыва летательных аппаратов различных систем и назначения, участвующих в пожаротушении. Численные расчеты позволяют для конкретных условий определить размеры опасной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рычков А.Д. Моделирование работы твердотопливного импульсного генератора аэрозолей при тушении возгорания метановоздушной смеси в штреках угольных шахт // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 1. С. 24–30.

2. Федоров А.В., Тропин Д.А. Моделирование прохождения детонационной волны через облако частиц в двухскоростной двухтемпературной постановке // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, N 2. С. 61–70.
3. Федоров А.В., Тропин Д.А. Определение критического размера облака частиц, необходимого для подавления газовой детонации // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 4. С. 100–108.
4. Markov V.V. A New Numerical Method for Two – Phase Flows. Poland, 5-th Int. Coll. On Dust Explosions, 1993, 57 p.
5. Годунов С.К., Забродин А.В., Прокопов Г.П. Разностная схема для двумерных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1961. № 6. С. 1020–1050.
6. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. М.: Наука, 1976. 400 с.
7. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.
8. Рахматулин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред // ПММ. 1956. Т. 20, вып. 2. С. 184–195.
9. Численный анализ движения и газификации частиц пылегазовой смеси за ударной волной при явлениях взрывного характера / В.П. Коробейников, В.В. Марков, И.С. Меньшов, И.В. Семенов // Математическое моделирование. Проблемы и результаты / под ред. О.М. Белоцерковского. М.: Наука, 2003. С. 435–455.
10. Коробейников В.П., Марков В.В., Сизых Г.Б. Численное решение двумерных нестационарных задач о движении горючей пылегазовой смеси // ДАН. 1991. Т. 316, № 5. С. 1077–1081.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Левин Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, академик РАН, профессор, заведующий лабораторией НИИ механики МГУ, levin@imec.msu.ru.

Марков Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник МИАН, markov@mi.ras.ru.

Сизых Григорий Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики МФТИ, o1o2o3@yandex.ru.

EXPLOSION OF ANNULAR CHARGE ON DUSTY SURFACE

Vladimir A. Levin¹, Vladimir V. Markov², Grigory B. Sizykh³

¹Research Institute of Mechanics, MSU, Moscow, Russia

²Steklov Mathematical Institute, RAS, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russia

ABSTRACT

This problem is related to the safety problem in the area of forest fires. It is well known that is possible to extinguish a fire, for example, by means of a powerful air stream. Such flow arises from the explosive shock wave. To enhance the impact of the blast wave can be used an explosive charge of annular shape. The shock wave, produced by the explosion, increased during moves to the center and can serve as a means of transportation dust in the seat of the fire. In addition, emerging after the collapse of a converging shock wave strong updraft can raise dust on a greater height and facilitate fire extinguishing, precipitating dust over a large area. This updraft can be dangerous for aircraft that are in the sky above the fire. To determine the width and height of the danger zone performed the numerical simulation of the ring of the explosion and the subsequent movement of dust and gas mixtures. The gas is considered ideal and perfect. The explosion is modeled as an instantaneous increase in the specific internal energy in an annular zone on the value of the specific heat of explosives. The flow is considered as two-dimensional, and axisymmetric. The axis of symmetry perpendicular to the Earth surface. This surface is consid-

ered to be absolutely rigid and is considered as the boundary of the computational domain. On this surface is exhibited the condition of no motion. For the numerical method S. K. Godunov is used a movable grid. One system of lines of this grid is moved in accordance with movement of the shock wave. Others lines of this grid are stationary. The calculations were performed for different values of the radii of the annular field and for different sizes of rectangular cross-sectional of the annular field. Numerical results show that a very strong flow is occurring near the axis of symmetry and the particles rise high above the surface. These calculations allow us to estimate the sizes of the zone of danger in specific situations.

Key words: explosion annular charge, lift the dust, fire fighting, flight safety.

REFERENCES

1. **Rychkov A.D.** Modeling of Operation of a Solid-Propellant Pulse Aerosol Generator during Extinguishing of Methane-Air Mixture Ignition in Coal Mine Drifts. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2013, vol. 49, no. 1, pp. 19–25.
2. **Fedorov A.V., Tropin D.A.** Modeling of Detonation Wave Propagation through a Cloud of Particles in a Two-Velocity Two-Temperature Formulation. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2013, vol. 49, no. 3, pp. 178–187.
3. **Fedorov A.V., Tropin D.A.** Determination of the Critical Size of a Particle Cloud Necessary for Suppression of Gas Detonation. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2011, vol. 47, no. 4, pp. 464–472.
4. **Markov V.V.** A New Numerical Method for Two – Phase Flows. Poland, 5-th Int. Coll. On Dust Explosions, 1993, 57 p.
5. **Godunov S.K., Zabrodin A.V., Prokopov G.P.** *Raznostnaia schema dlia dvumernykh zadach gazovoy dimamiki i raschiot obtekaniya s otoshedshey udarnoy volnoy* [A Difference Scheme For Two-dimensional Nonstationary Problems of Gas Dynamics and Calculation of the Flow With a Receding Shock Wave]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1961, no. 6, pp. 1020–1050. (in Russian)
6. **Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.J., Krayko A.N., Prokopov G.P.** *Chislennoje reshenije mnogomernykh zadach gazovoj dinamiki* [Numerical Solution of Multi-dimensional Problems of Gas Dynamics]. Moscow, Science, 1976, 400 p. (in Russian)
7. **Belotserkovsky O.M., Davydov Yu.M.** *Metod krupnykh chastits v gazovoj dinamike* [Method of Coarse Particles in the Gas Dynamics]. Moscow, Nauka, 1982, 392 p. (in Russian)
8. **Rakhmatulin H.A.** *Osnovy gazodimaniki vzaimopronikavshih dvizheniy szhimaemykh sred* [Fundamentals of Gas Dynamics Interpenetrating Motions of Compressible Media]. *Prikladnaja matematika i mehanika* [Journal of Applied Mathematics and Mechanics], 1956, vol. 20, no. 2, pp. 184–195. (in Russian)
9. **Korobeynikov V.P., Markov V.V., Menshov I.S., Semenov I.V.** *Chislennij analiz dvizheniya i gazifikatsii chastits pilegazovoj smesi za udarnoy volnoj pri javlenijakh vzrивnogo haraktera. Matematicheskoe modelirovanije. Problemi i rezultati, pod red. O.M. Belotserkovskogo* [Numerical Analysis of Particle Movement and Gasification of Dust-gas Mixture Behind the Shock Wave at the Phenomena of Explosive Nature. Math Modeling. Results and Problems, eds. O.M. Belotserkovsky]. Moscow, Nauka, 2003, pp. 435–455. (in Russian)
10. **Korobeynikov V.P., Markov V.V., Sizykh G.B.** Numerical Solution of Two-dimensional Nonstationary Problems of the Motion of a Dusty Gas-fuel Mixture. *Soviet Physics Doklady*, 1991, vol. 36, no. 2, pp. 125–127.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Levin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, Research Institute of Mechanics, MSU, levin@imec.msu.ru.

Vladimir V. Markov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, SMI, RAS, markov@mi.ras.ru.

Grigory B. Sizykh, PhD, associate professor, MIPT, o1o2o3@yandex.ru.