

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН С ПРИПОВЕРХНОСТНЫМ ГЕТЕРОГЕННЫМ СЛОЕМ С ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗОЙ

Н.Л. Клиначева¹, Ю.М. Ковалев¹

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,
Российская Федерация

E-mail: klinachevanl@susu.ac.ru, kovalevym@susu.ac.ru

В данной работе представлен анализ численного исследования взаимодействия сферических ударных волн с гетерогенным слоем, расположенным на плоской поверхности. Газовая фаза в гетерогенном слое является химически активной и моделирует состав газообразных продуктов пиролиза лесных горючих материалов. Конденсированная фаза гетерогенного слоя представлена в виде неподвижной решетки, узлами которой являются твердые частицы. Численное моделирование проводилось с разделением расчета химических и газодинамических процессов, обусловленное разным временем их протекания. В силу того, что рассматривается модельная задача, состав газообразных продуктов пиролиза лесных горючих материалов был взят в упрощенном виде. Полученные результаты показали: учет химического превращения в газовой фазе приводит к увеличению скорости и интенсивности ударной волны, распространяющейся по гетерогенному слою. Кроме того, учет энерговыделения в газовой фазе за счет химического превращения приводит к увеличению размера предвестника, соединяющего головной фронт ударной волны и часть ударной волны, движущейся внутри слоя.

Ключевые слова: численный метод; математическая модель; законы сохранения; ударные волны; предвестник.

Введение

Интерес к изучению взаимодействия ударных волн (УВ) с механическими и тепловыми неоднородностями связан с анализом возможности применения взрыва в борьбе с природными и техногенными катастрофами. Успешное применение быстропротекающих процессов в борьбе с лесными пожарами дало возможность построить ряд математических моделей [1, 2], которые позволили выявить некоторые особенности при взаимодействии УВ с фронтом лесного пожара. Полученные закономерности в полной мере применимы к анализу последствий взаимодействия космических объектов с поверхностью Земли. В связи с тем, что в последнее время увеличилось количество крупных метеоритов, упавших на нашу планету, возникает интерес к математическому моделированию данных явлений [3–9] с учетом всего многообразия присущих данному явлению факторов.

Входя в плотные слои атмосферы космическое тело испытывает резкое торможение, в ударном слое создается высокое давление (порядка тысячи атмосфер), что приводит к образованию больших лучистых и тепловых потоков. Под действием высоких механических и термических напряжений происходит разрушение тела (как частичное, так и полное) с выделением энергии. В результате этого образуются ударные волны, которые оказывают разрушающее воздействие на наземные объекты, а часть энергии в виде излучения может привести к возникновению пожаров.

Целью данной работы является исследование влияния возможного химического превращения газообразных продуктов пиролиза лесных горючих материалов в приповерхностном слое на параметры падающей ударной волны.

1. Постановка задачи

Рассмотрим модельную задачу о взаимодействии сферической УВ с гетерогенным слоем на поверхности Земли, заполненным газообразными продуктами пиролиза. Пусть к некоторому моменту времени в атмосфере на некоторой высоте над поверхностью Земли образовался сферический объем сжатого горячего газа, все параметры внутри этого объема распределены равномерно. Данный объем образовался в результате взрыва в атмосфере Земли, например, некоторого космического тела. При сильном атмосферном взрыве на начальном этапе развития процесса значительную роль может играть излучение, однако в рассматриваемой постановке задачи влиянием излучения пренебрегается. Это объясняется тем, что в рассматриваемой задаче «высвечивание» области энерговыделения уже произошло, и к моменту формирования объема постоянного давления роль излучения незначительна [3]. К поверхности Земли прилегает гетерогенный слой высотой H . Такой слой в данной постановке имитирует лесной массив. Газовая фаза в этом слое представляет продукты пиролиза лесных горючих материалов, образованные от воздействия излучения (вспышки) на лесной массив.

В результате разлета объема сжатого газа формируется сферическая ударная волна, которая взаимодействует с гетерогенным слоем и инициирует в нем химические превращения.

Расчетная область (рис. 1) ограничена слева осью Oz цилиндрической системы координат, которая является осью симметрии. Снизу твердой поверхностью (ось Or цилиндрической системы координат). Верхняя граница также является осью симметрии. Численные расчеты поэтому проводились до моментов времени, пока отраженная от нижней стенки ударная волна не достигла верхней границы. Правая граница области – свободная граница.

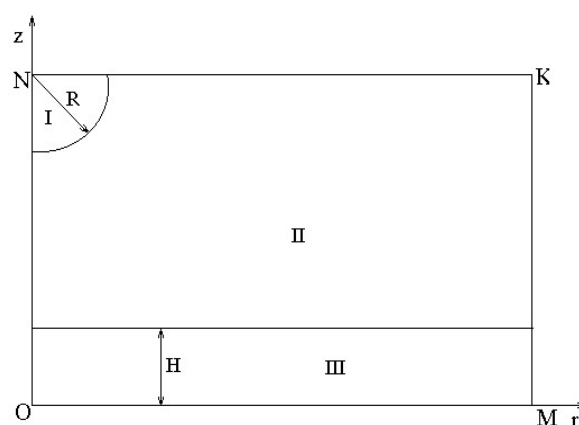


Рис. 1. Схема расчетной области в начальный момент времени

В качестве математической модели гетерогенного слоя рассматривается математическая модель «замороженной» газозвеси, т.е. недеформированная решетка, заполненная газом [10–12]. Твердые частицы имитируют ее узлы, влиянием связей ре-

шетонок пренебрегаем. Анализ инвариантности относительно преобразования Галилея и возможности использования математической модели «замороженной» газозвеси был проведен в работах [12, 13].

Математическая модель изучаемого физического процесса представляет собой систему дифференциальных уравнений Эйлера для двумерного осесимметричного нестационарного движения газа в цилиндрических координатах в области чистого газа и модели «замороженной» газозвеси в области гетерогенного слоя. Система замыкается уравнениями состояния фаз [14] и условиями межфазного взаимодействия [15, 16]:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\rho_1 r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_1 v_1 r)}{\partial z} = 0, \\
 & \frac{\partial(\rho_1 u_1 r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 u_1 r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 v_1 r)}{\partial z} = \alpha_1 P - \frac{\partial(r\alpha_1 P)}{\partial r} - rF_r\alpha_1, \\
 & \frac{\partial(\rho_1 v_1 r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 v_1 u_1 r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_1 v_1 v_1 r)}{\partial z} = -\frac{\partial(r\alpha_1 P)}{\partial z} - rF_z\alpha_1, \\
 & \frac{\partial(\rho_1 E_1 r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 E_1 r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_1 v_1 E_1 r)}{\partial z} + \frac{\partial(u_1 \alpha_1 P r)}{\partial r} + \frac{\partial(v_1 \alpha_1 P r)}{\partial z} = -rQ\alpha_1, \\
 & \frac{\partial \rho_2 e_2}{\partial t} = Q, \quad W_2 = 0, \quad \rho_2^0 = \frac{\rho_2}{\alpha_2} = \text{const}, \\
 & e_1 = \frac{P}{\rho_1^0(\gamma-1)}, \quad E_1 = e_1 + \frac{W_1^2}{2}, \quad \rho_1^0 = \frac{\rho_1}{\alpha_1}, \quad \alpha_1 = 1 - \alpha_2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где r и z – радиальная и осевая координаты; t – время, u и v – компоненты вектора скорости \mathbf{W} ; P – давление; e_1 , E_1 , ρ_1^0 – удельная внутренняя и полная энергии газа, истинная плотность; γ – показатель адиабаты газа; α_2 – объемная доля частиц; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении твердой фазы; F и Q – интенсивности силового и теплового взаимодействия газа с узлами решетки. Уравнения, определяющие силовое и тепловое взаимодействие газа и частиц, аналогичны уравнениям [15, 16]:

$$\begin{aligned}
 & F_r = 0, \quad 75C_d\alpha_2\rho_1^0|W_1|u_1Sh_d, \quad F_z = 0, \quad 75C_d\alpha_2\rho_1^0|W_1|v_1Sh_d, \\
 & C_d = C_d^0(Re)\Psi(M)\varphi(\alpha), \quad C_d^0 = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4, \quad Re = \rho_1^0|W_1|\frac{d}{\mu_1}, \\
 & Q = 6\alpha_2\lambda + 1Nu\left(e_1 - \frac{c_1}{c_2}e_2\right)\frac{\gamma Sh_d}{PrRe_d^0}, \quad Re_d^0 = \rho_1^0 a_0 \frac{d}{\mu_1}, \quad Sh_d = \frac{H}{d}, \\
 & Nu = 2exp(-M) + 0,459Re^{0,55}Pr^{0,33}, \quad Pr = \frac{c_p\mu_1}{\lambda_1},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления сферы; C_d^0 – коэффициент аэродинамического сопротивления частиц в несжимаемом безграничном потоке газа; M , Re , Nu и Pr – числа Маха, Рейнольдса, Нуссельта и Прандтля; d – диаметр частиц; λ_1 , μ_1 , a_1 – теплопроводность, вязкость и местная скорость звука газа; a_0 – характерная скорость звука в невозмущенном газе.

Уравнения, описывающие химическую кинетику протекающих процессов в гете-

рогенном слое, имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_1 c_i r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1 c_i r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_1 v_1 c_i r)}{\partial z} &= r s_i, \\ J &= \sum_j q_j s_j, \\ \sum_i c_i &= 1, \quad e = T \sum_i c_{v_i} c_i + \sum_i e_{0_i} c_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где c_i , c_{v_i} , e_{0_i} – объемные концентрации, молярные массы, теплоемкости и теплоты образования компонентов газа; s_i – массовая скорость образования (убыли) компонента газовой фазы; q_j – тепловой эффект j -ой независимой реакции, s_j – скорость j -й независимой реакции, e – внутренняя энергия газовой смеси.

В силу того, что в данной работе рассматривается модель взаимодействия ударной волны с хвойным лесным массивом, где лесной массив представлен набором экранирующих решеток с малой объемной долей лесных горючих материалов, необходимо в формулах, определяющих межфазное взаимодействие [15, 16] перейти к эффективному значению диаметра частиц $d_{эфф}$. Его значение можно найти через значение объемной доли и удельной поверхности S лесных горючих материалов [17, 18]. Так как $S = nS_3/V$, где S_3 – площадь поверхности элемента лесных горючих материалов; n – количество их элементов в объеме смеси V . Сделаем некоторые преобразования:

$$S = \frac{S_3 n V_3}{V_3 V} = \frac{S_3}{V_3} \alpha_2, \quad (4)$$

где V_3 – объем элемента лесных горючих материалов. Для хвойного леса такой элемент имеет цилиндрическую форму с радиусом r и длиной l . Тогда:

$$\frac{S_3}{V_3} = \frac{2\pi r l + 2\pi r^2}{\pi r^2 l} \approx \frac{2}{l}, \quad r \ll l. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5) имеем:

$$S = \frac{2}{r} \alpha_2.$$

С другой стороны, объемную долю и удельную поверхность S частиц можно записать через эффективный радиус частиц:

$$4\pi r_{эфф}^2 = \frac{24}{r} \pi n r^2.$$

Тогда связь между $d_{эфф}$ с радиусом хвоинки r будет иметь вид:

$$d_{эфф} = 3r.$$

Для хвойного леса $d_{эфф} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, а коэффициент аэродинамического сопротивления частиц $C_d^0 = 0,03$ [19]. Определим состав газовой фазы в гетерогенном слое. В результате воздействия излучения (вспышки) на лесной массив, происходит прогрев лесных горючих материалов, что приводит к образованию газообразных продуктов пиролиза. В силу того, что процесс взрыва рассматривается с момента образования

объема постоянного давления, то предполагается что в слое распределение параметров газовой фазы равномерно. В данной работе, аналогично [18] будем считать, что газовая фаза состоит из следующих компонентов: N_2 , O_2 , CO , CO_2 , H_2O , и в ней происходит одна эффективная химическая реакция окисления окиси углерода CO . Это связано с тем, что концентрации остальных компонентов настолько малы, что не могут повлиять на величину энерговыделения смеси газообразных продуктов пиролиза. Для влажных смесей окиси углерода CO с воздухом, скорость реакции окисления окиси углерода имеет вид [20]:

$$s = -k_0 c_{CO} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right),$$

где $k_0 = 1,4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$, $E_a = 96370 \text{ Дж/моль}$ – энергия активации, $R = 8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ – универсальная газовая постоянная.

Численное моделирование рассматриваемой модельной задачи проводилось методом крупных частиц [21], а анализ достоверности полученных результатов проверялся путем уменьшения шагов по пространству. Особенностью численного моделирования является разделение расчетов по процессам. Это объясняется разным временем протекания химических и газодинамических процессов. На каждом временном шаге решаются сначала уравнения химической кинетики, а затем производится расчет газодинамических параметров потока.

В начальный момент времени давление в центре взрыва задавалось равным 2500 атм. Радиус объема постоянного давления в начальный момент времени выбирался таким, чтобы при подходе к слою температура на фронте ударной волны была равной около 1500 К. Такой выбор обусловлен возможностью протекания реакции горения угарного газа. Состав газовой фазы в гетерогенном слое представлен в таблице. Определяющими параметрами задачи являются температура газовой фазы и объемная доля частиц в гетерогенном слое. Первый определяет наличие газообразных продуктов пиролиза, способных к химическим превращениям, а второй – сопротивление движущейся ударной волне. Результаты приведены для значения $T/T_0=3$, где T_0 температура воздуха вне гетерогенного слоя в начальный момент времени и объемной доли твердой фазы $\alpha_2=0,005$.

Таблица

Состав газовой фазы

Компонент	N_2	O_2	CO	CO_2	H_2O
Концентрация	0,6799	0,199	0,0796	0,00961	0,0319

2. Основные результаты

На рис. 2 представлены изолинии давлений. Видно, что учет энергии реакции окисления окиси углерода приводит к увеличению скорости и интенсивности падающей сферической ударной волны в гетерогенном слое. Кроме того, это приводит к большему росту «ножки» Маха, образованной в результате перехода регулярного

отражения к нерегулярному, и предвестника, соединяющего головной фронт ударной волны и часть ударной волны, движущейся по гетерогенному слою.

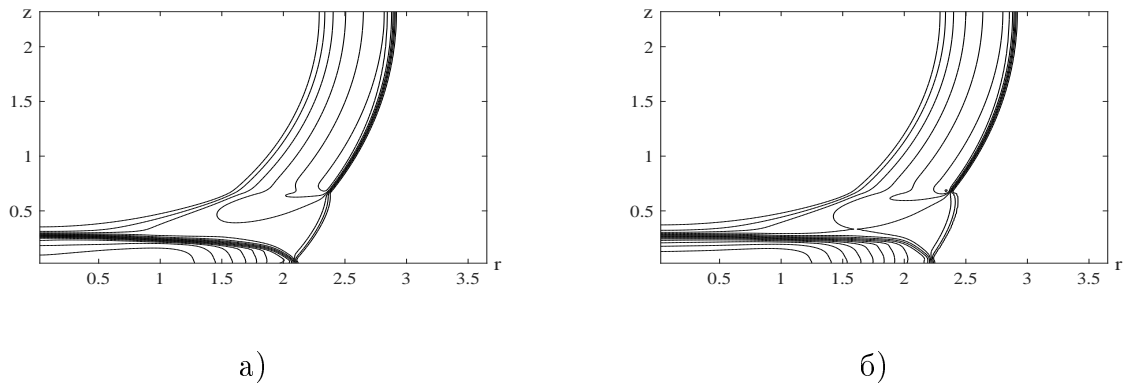


Рис. 2. Изолинии давления: а) без учета химического превращения; б) с учетом химического превращения

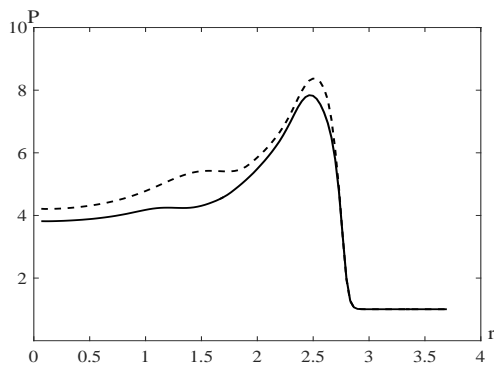


Рис. 3. Распределение давления вдоль поверхности гетерогенного слоя

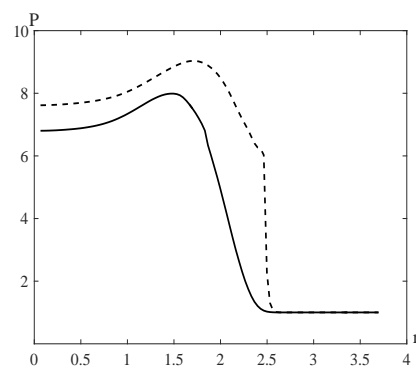


Рис. 4. Распределение давления вдоль стенки

Изменение давления вдоль поверхности гетерогенного слоя и распределение давления вдоль стенки на момент времени $t=0,39$ показано на рис. 3, 4 (сплошная линия – без учета химического превращения, пунктирная – с учетом химического превращения).

Таким образом, в результате численного исследования показано, что учет химического превращения приводит к увеличению интенсивности и скорости ударной волны, распространяющейся по гетерогенному слою. Следовательно, при рассмотрении задач о воздействии ударных волн, образованных в результате взрыва, на лесные массивы необходимо учитывать энергию химических реакций. Это позволит дать более реальную оценку воздействия взрывной волны на лесной массив.

Литература

1. Гришин, А.М. Экспериментальное исследование воздействия взрыва конденсированных ВВ на фронт верхового лесного пожара / А.М. Гришин, Ю.М. Ковалев // Доклады Академии наук СССР. – 1989. – Т. 308, № 5. – С. 1074–1078.
2. Гришин, А.М. Об усилении ударных волн при их взаимодействии с фронтом лесного пожара / А.М. Гришин, Ковалев Ю.М. // Доклады Академии наук СССР. – 1990. – Т. 312, № 1. – С. 50–54.
3. Коробейников, В.П. Моделирование разрушения космических тел при движении в атмосферах планет / В.П. Коробейников, В.И. Власов, Д.Б. Волков // Прикладная механика и техническая физика. – 1994. – Т. 6, № 8. – С. 61–75.
4. Андрущенко, В.А. Моделирование падения челябинского метеорита / В.А. Андрущенко, Н.Г. Сызранова, Ю.Д. Шевелев // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5, № 6. – С. 927–940.
5. Андрущенко, В.А. Обстрел Земли из космоса – хроника столетия / В.А. Андрущенко, Ю.Д. Шевелев // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5, № 6. – С. 907–916.
6. Андрущенко, В.А. Моделирование падения челябинского метеорита / В.А. Андрущенко, Н.Г. Сызранова // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 15–19.
7. Шевелев, Ю.Д. Некоторые вопросы оценки тепловых потоков при движении затупленных тел в атмосфере планет / Ю.Д. Шевелев, Н.Г. Сызранова, В.А. Андрущенко // Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 410, № 5. – С. 624–629.
8. Андрущенко, В.А. Моделирование падения челябинского метеорита / В.А. Андрущенко, Н.Г. Сызранова, Ю.Д. Шевелев, В.А. Головешкин // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28, № 2. – С. 31–39.
9. Клиначева, Н.Л. Ослабление сферических ударных волн в гетерогенных средах / Н.Л. Клиначева, Ю.М. Ковалев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 35–45.
10. Ковалев, Ю.М. Ослабление воздушных ударных волн системой решеток / Ю.М. Ковалев, А.Ю. Черемохов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 1997. – № 3. – С. 209–287.
11. Ковалев, Ю.М. Математическая модель газовой взвеси с химическими превращениями в приближении парных взаимодействий / Ю.М. Ковалев, Е.Е. Пигасов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2014. – Т. 7, № 3. – С. 40–49.
12. Клиначева, Н.Л. Модифицированная математическая модель «замороженной» газовой взвеси / Н.Л. Клиначева, Ю.М. Ковалев, В.Ф. Куропатенко // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1398–1403.
13. Ковалев, Ю.М. Математический анализ уравнений сохранения двухфазных смесей / Ю.М. Ковалев, Е.А. Ковалева // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 29–37.
14. Антонов, В.А. Моделирование взрыва шнурового заряда в пологе леса при отсутствии пожара / В.А. Антонов, А.М. Гришин, Ю.М. Ковалев, Д.Ю. Наймушина // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т. 29, № 4. – С. 115–123.
15. Кругликов, Б.С. Ослабление воздушных ударных волн слоями запыленного газа и решетками / Б.С. Кругликов, А.Г. Кутушев // Прикладная механика и техническая физика. – 1988. – № 1. – С. 51–57.

16. Кругликов, Б.С. Ослабление ударных волн экранирующими решетками / Б.С. Кругликов, А.Г. Кутушев // Физика горения и взрыва. – 1988. – № 1. – С. 115–117.
17. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992.
18. Гришин, А.М. Экспериментальное и теоретическое исследование воздействия взрыва на фронт верхового лесного пожара / А.М. Гришин, Ю.М. Ковалев // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25, № 6. – С. 72–79.
19. Валендик, Э.Н. Крупные лесные пожары / Э.Н. Валендик, П.М. Матвеев, М.А. Софронов. – М.: Наука, 1979.
20. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
21. Белоцерковский, О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука, 1982.

Наталия Леонидовна Клиначева, кандидат физико-математических наук, кафедры «Вычислительная механика», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск, Российская Федерация), klinachevanl@susu.ru.

Юрий Михайлович Ковалев, доктор физико-математических наук, профессор, кафедры «Вычислительная механика», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск, Российская Федерация), kovalevym@susu.ru.

Поступила в редакцию 8 апреля 2018 г.

MSC 76L05

DOI: 10.14529/mmp180305

THE INTERACTION OF SPHERICAL SHOCK WAVES WITH A NEAR-SURFACE HETEROGENEOUS LAYERS WITH A CHEMICALLY ACTIVE GAS PHASE

N.L. Klinacheva¹, Yu.M. Kovalev¹

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

E-mail: klinachevanl@susu.ac.ru, kovalevym@susu.ac.ru

This paper presents an analysis of the numerical study of the interaction of spherical shock waves with a heterogeneous layer located on the strip surface. The gas phase in the heterogeneous layer is chemically active and simulates the composition of gaseous pyrolysis products of forest combustible materials. The condensed phase of the heterogeneous layer is represented as a fixed lattice, the nodes of which are solid particles. The numerical simulation was carried out with the separation of chemical and gas-dynamic processes calculation because of different time of their course. Of the fact that the model problem is considered, the composition of gaseous pyrolysis products of forest combustible materials was taken in a simplified form. The results showed that the account of chemical transformation in the gas phase leads to the increase of the speed and intensity of the shock wave propagating through the heterogeneous layer. In addition, taking into account the energy release in the gas phase of chemical transformation, leads to an increase in the size of the precursor connecting the front of the shock wave and part of the shock wave moving inside the layer.

Keywords: numerical procedure; mathematical model; conservation laws; Courant number.

References

1. Grishin A.M, Kovalev Yu.M. [Experimental Study of the Impact of the Explosion of Condensed Explosives on the Front of a Forest Fire]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1989, vol. 308, no. 5, pp. 1074–1078. (in Russian)
2. Grishin A.M, Kovalev Yu.M. [On the Amplification of Shock Waves in Their Interaction with the Front of a Forest Fire]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1990, vol. 312, no. 1, pp. 50–54. (in Russian)
3. Korobeinikov V.P, Vlasov V.I., Volkov D.B. [Modelling the Destruction of Cosmic Bodies in Motion in the Atmospheres of the Planets]. *Computer Research and Modeling*, 1994, vol. 6, no. 8, pp. 61–75. (in Russian)
4. Andryushchenko V.A., Syzranova N.G., Shevelev Yu.D. [Simulation of the Chelyabinsk Meteorite Fall]. *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 927–940. (in Russian)
5. Andryushchenko V.A., Shevelev Yu.D. [The Bombardment of the Earth From Space the Chronicle of the Century]. *Komputeryse Issledovaniy i Modelirovanie*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 907–916. (in Russian)
6. Andryushchenko V.A., Syzranova N.G. [On the Destruction of the Chelyabinsk Meteorite]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 7, pp. 15–19. (in Russian)
7. Shevelev Yu.D., Syzranova N.G., Andryushchenko V.A. [Some Questions of Estimation of Heat Flows at Motion of Blunt Bodies in the Atmosphere of Planets]. *Doklady Physics*, 2006, vol. 410, no. 5, pp. 624–629. (in Russian)
8. Andryushchenko V.A., Syzranova N.G., Shevelev Yu.D., Goloveshkin V.A. [On Mechanisms of Destruction of Meteor Bodies and Heat Transfer to Their Surface]. *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 28, no. 2, pp. 31–39. (in Russian)
9. Klinacheva N.L., Kovalev Yu.M. Attenuation of Spherical Shock Waves in Heterogeneous Media. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 35–45. (in Russian) DOI:10.14529/mmp170404
10. Kovalev Yu.M., Cheremohov A.Yu. [The Attenuation of Air Shock Waves by a System of Grids]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Series: Mathematical Modelling of Physical Processes*, 1997, no. 3, pp. 39–43. (in Russian)
11. Kovalev Yu.M., Pigasov E.E. [Mathematical Model of Gas Suspension with Chemical Transformations in the Approximation of Pair Interactions]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 40–49. (in Russian) DOI: 10.14529/mmp140304
12. Klinacheva N.L., Kovalev Yu.M., Kuropatenko V.F. Modified Mathematical Model of a "Frozen" Gas Suspension. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 6, pp. 1456–1462. DOI: 10.1007/s10891-014-1150-x
13. Kovalev Yu.M., Kovaleva E.A. [Mathematical Analysis of the Conservation Equations of Two-Phase Mixtures]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 29–37. (in Russian) DOI: 10.14529/mmp140202
14. Antonov V.A., Grishin A.M., Kovalev Yu.M., Naymushina L.Yu. [Modelling of Explosion of a Cord Charge in the Forest Canopy in the Absence of Fire]. *Physics of Combustion and Explosion*, 1993, no. 4, pp. 115–123. (in Russian)

15. Kruglikov B.S., Kugushev A.G. [The Attenuation of Air Shock Waves by Layers of Dusty Gas and Lattices]. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 1988, no. 1, pp. 51–57. (in Russian)
16. Kruglikov B.S., Kutushev A.G. [The Weakening of Shock Waves Louvers]. *Physics of Combustion and Explosion*, 1988, no. 1, pp. 115–117. (in Russian)
17. Grishin A.M. *Matematicheskoe modelirovanie lesnyh pozharov i novye sposoby bor'by s nimi* [Mathematical Modelling of Forest Fires and New Ways of Fighting Them], Novosibirsk, Nauka, 1992. (in Russian)
18. Grishin A.M., Kovalev Yu.M. [Experimental and Theoretical Study of the Impact of the Explosion on the Front of the Forest Fire]. *Physics of Combustion and Explosion*, 1989, vol. 25, no. 6, pp. 72–79. (in Russian)
19. Valendik, E.N., Matveev, P.M., Sofronov M.A. *Krupnye lesnye pozhary* [Large Forest Fires]. Moscow, Nauka, 1979. (in Russian)
20. Pomerantsev V.V., Aref'ev K.V., Akhmedov D.V., Konovich M.N., Korchunov Yu.N., Rundygin Yu.A., Shagalova S.L., Shestakov S.M. *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* [Fundamentals of Practical Combustion Theory]. Leningrad, Energoatomizdata, 1986. (in Russian)
21. Belocerkovskiy O.M., Davydov Ju.M. *Metod krupnykh chastic v gazovoj dinamike* [The Method of Large Particles in Gas Dynamics]. Moscow, Nauka, 1982. (in Russian)

Received April 8, 2018