

ОСЛАБЛЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ

Н.Л. Клиначева, Ю.М. Ковалев

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

В данной работе приводится анализ численного исследования взаимодействия сферических ударных волн (УВ) с механическими и тепловыми неоднородностями, расположенными на плоской поверхности. Результаты расчетов показали, что наличие на плоской поверхности гетерогенного слоя приводит к ослаблению падающей УВ внутри этого слоя в зависимости от объемной доли конденсированной фазы. Достаточно большая объемная доля твердой фазы в гетерогенном слое приводит к деформации головного фронта УВ и сильное ее торможение, в результате чего отражения от стенки практически не происходит и ножка Маха не образуется, однако при $\alpha_2 \geq 5 \cdot 10^{-2}$ – она образуется над поверхностью гетерогенного слоя. Увеличение температуры газа в слое приводит к возрастанию скорости (УВ), в то время как амплитуда ее снижается. Приведенные в работе расчеты показали, что увеличение температуры газа в слое способствует увеличению момента силы, действующей на решетку из твердых частиц. При высоких температурах газа в гетерогенном слое, несмотря на силовое и тепловое взаимодействие газа и частиц, происходит образование предвестника.

Ключевые слова: математическое моделирование; уравнения Эйлера; газозвесь; ударные волны; число Куранта.

Введение

Исследование поведения ударных волн (УВ) в неоднородных средах представляет как практический, так и теоретический интерес. Это связано с тем, что в настоящее время являются актуальными проблемы обеспечения безопасности при изучении быстропотекающих процессов, сопровождающихся образованием УВ в результате взрыва в атмосфере различных тел (например, метеоритов). В последние годы активность вокруг проблемы «Астероидно-кометная опасность» резко возросла. Вопросы возможных столкновений Земли с астероидами и кометами и их вероятных последствий начали обсуждаться на уровне правительств, национальных и международных организаций и ведомств. При входе космического тела в плотные слои атмосферы происходит резкое торможение тел, в ударном слое создается давление порядка тысячи атмосфер, возникают большие лучистые и тепловые потоки. Внутри тела появляются значительные массовые силы инерции; под действием высоких механических и термических напряжений происходит полное или частичное разрушение тела с выделением энергии. Все это приводит к образованию сферической УВ, которая взаимодействует с механическими и тепловыми неоднородностями вблизи поверхности Земли.

К настоящему времени проведено достаточно большое количество исследований процессов взаимодействия плоской УВ с гетерогенными слоями, посвященных различным аспектам данной проблемы: ослабление УВ при прохождении их через решетки или слои запыленного газа [1–7]; инвариантность к преобразованиям Галилея законов сохранения, описывающих движение многокомпонентных сред [8, 9], и т.д.

В работах [10, 11] было установлено, что при взаимодействии мелкомасштабных сферических ударных волн, инициированных лазерным пробоем, с абсолютно твердой поверхностью в присутствии теплового слоя происходит: частичное запыление УВ внутри слоя, образование предвестника, формирование двух тройных точек. Если изучению закономерностей взаимодействия плоских УВ посвящено достаточно большое количество исследований, то процессы взаимодействия сферических УВ с гетерогенным слоем на плоской поверхности в настоящее время изучены еще недостаточно, несмотря на значительный практический интерес.

Целью данной работы является исследование особенностей взаимодействия сферической УВ с гетерогенным слоем, расположенным на плоской поверхности.

1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу о взаимодействии сферической УВ с гетерогенным слоем твердых частиц в следующей постановке: пусть в результате взрыва над поверхностью Земли образовался сферический объем сильно нагретого газа. Давление внутри этого объема постоянно $P = \text{const}$ (рис. 1). Центр объема находится на оси симметрии Oz цилиндрической системы координат. В качестве расчетной области выбирается плоскость, левая граница которой совпадает с осью Oz , а нижняя – с осью Or . К поверхности прилегает гетерогенный слой высотой H . Для простоты проведения расчетов и анализа результатов газ будем считать идеальным во всей расчетной области. Реализация расчетов с более сложными уравнениями состояния [12] в области повышенного давления не представляет принципиальных трудностей. Для изучения движения УВ в гетерогенном слое принимаются обычные для «замороженной» газовзвеси допущения. Согласно этим допущениям гетерогенный слой можно рассматривать как недеформированную решетку, заполненную газом. Узлами решетки являются твердые частицы, а влиянием связей пренебрегаем. Обоснование модели «замороженной» газовзвеси для описания законов взаимодействия с преградами УВ в слоях запыленного газа и решеток детально обсуждалась в работах [2, 3, 6].

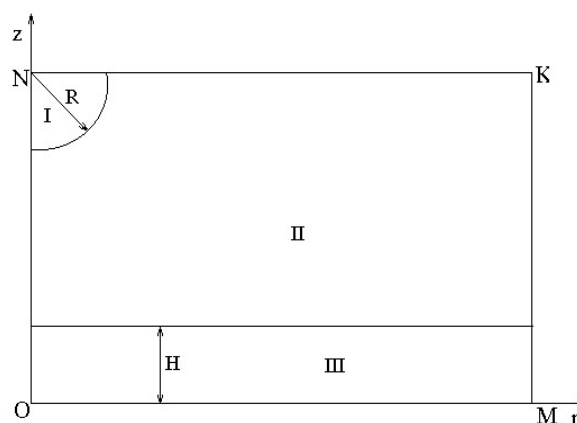


Рис. 1. Схема расчетной области в начальный момент времени

При достаточно сильном взрыве на начальном этапе развития процесса в гетерогенном слое значительную роль играет излучение, но в данной постановке задачи его влияние не рассматривается. Это обусловлено тем, что в рассматриваемой задаче

«высвечивание» области энерговыделения уже произошло, и на момент входа УВ в гетерогенный слой роль излучения несущественна.

В качестве математических моделей изучаемого физического процесса выбраны система уравнений Эйлера, записанная в цилиндрической системе координат в области чистого газа, модель «замороженной» газозвеси, которые замыкаются уравнениями состояния фаз. С целью получения обобщенных результатов система законов сохранения была приведена к безразмерному виду. Характерными параметрами для обезразмеривания были выбраны: высота гетерогенного слоя H , плотность при нормальных условиях ρ_0^0 , скоростной напор $\rho_0^0 \cdot a_0^2$ и квадрат скорости звука a_0^2 в невозмущенном газе соответственно, безразмерная скорость газа определялась отношением скорости газа к скорости звука a_0 , а характерное время значением $t_0 = H/a_0$. Вид остальных безразмерных параметров определен соотношениями (1):

$$\begin{aligned} r &= H\bar{r}, & z &= H\bar{z}, \\ u &= a_0\bar{u}, & v &= a_0\bar{v}, \\ \rho &= \rho_0^0\bar{\rho}, & P &= \rho_0^0 a_0^2 \bar{P}, \\ t &= t_0\bar{t}, & E &= a_0^2 \bar{E}. \end{aligned} \tag{1}$$

Для выбранных параметров система законов сохранения и уравнения состояния в безразмерной форме имеют следующий вид:

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

При записи системы законов сохранения (2) черта над безразмерными переменными для удобства была опущена. Здесь r и z – радиальная и осевая координаты; t – время, u и v – компоненты вектора скорости 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:

$$\begin{aligned}
 F_r &= 0,75C_d\alpha_2\rho_1^0|W_1|u_1Sh_d, & F_z &= 0,75C_d\alpha_2\rho_1^0|W_1|v_1Sh_d, \\
 C_d &= C_d^0(Re)\Psi(M)\varphi(\alpha), & C_d^0 &= \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4, & Re &= \rho_1^0|W_1|\frac{d}{\mu_1}, \\
 Q &= 6\alpha_2\lambda + 1Nu\left(e_1 - \frac{c_1}{c_2}e_2\right)\frac{\gamma Sh_d}{PrRe_d^0}, & Re_d^0 &= \rho_1^0a_0\frac{d}{\mu_1}, & Sh_d &= \frac{H}{d}, \\
 Nu &= 2exp(-M) + 0,459Re^{0,55}Pr^{0,33}, & Pr &= \frac{c_p\mu_1}{\lambda_1},
 \end{aligned} \tag{3}$$

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.

Система дифференциальных уравнений (2) – (4) решалась методом крупных частиц [13, 14] и его модификациями [15, 16]. В начальный момент времени параметры имеют следующие значения: в зонах II и III газ находится при нормальных условиях $P_0 = 10^5$ Па и плотность $\rho_0 = 1,21$ кг/м³. В 1 зоне давление равно $2500P_0$, высота взрыва равна $7H$, а давление за УВ у поверхности гетерогенного слоя составляло около 5 атм. Теплоемкость газа $c_1 = 716$ Дж/(кг · К), теплопроводность $\lambda_1 = 26,2 \cdot 10^5$ Дж/(м · К), вязкость $\mu_1 = 18,5 \cdot 10^5$ (Па · с), местная скорость звука $a_1 = 341$ м/с, характерная скорость звука $a_0 = 287$ м/с. Для твердой фазы диаметр частиц принимался равным 300 нм, плотность $\rho_2 = 7800$ кг/м³, теплоемкость $c_2 = 460$ Дж/(кг · К). Объемная доля частиц изменялась от $\alpha_2 = 10^{-4}$ до $\alpha_2 = 5 \cdot 10^{-2}$. Расчеты проводились на сетке размером 112x72 узла.

2. Основные результаты

При значениях $\alpha_2 \leq 1 \cdot 10^{-3}$ сферическая УВ, падающая на гетерогенный слой частично отражается от его поверхности, в результате образуется ударная волна, которая движется к центру взрыва (рис. 2). При значениях $\alpha_2 \leq 5 \cdot 10^{-4}$ отражения УВ от верхней границы гетерогенного слоя практически нет, поскольку наличие неоднородностей не оказывает существенного влияния на картину течения. В этом случае УВ проходя внутрь слоя достигает стенки и отражается от нее. Происходит переход от регулярного отражения к нерегулярному и образуется ножка Маха. Фронт ударной волны остается близким к сферическому.

Увеличение объемной доли частиц в слое ($\alpha_2 \geq 5 \cdot 10^{-3}$) приводит к изменению формы головного фронта УВ. Часть УВ отражается от его поверхности, при этом отраженная волна движется в направлении к центру взрыва (рис. 3), а часть проходит в слой, где испытывает торможение. Интенсивность УВ в слое становится слабой и она практически гасится внутри него.

Дальнейшее увеличение объемной доли частиц до значений $\alpha_2 \geq 5 \cdot 10^{-2}$ приводит к сильной деформации головного фронта УВ внутри решетки. Ножка Маха вблизи стенки не образуется, но она формируется на верхней границе гетерогенного слоя (рис. 4).

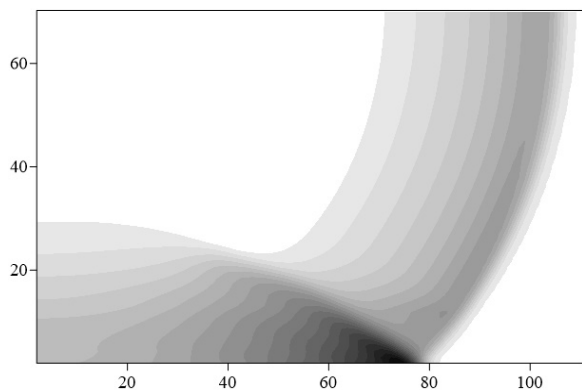


Рис. 2. Изолинии давлений $\alpha_2 = 5 \cdot 10^{-4}$

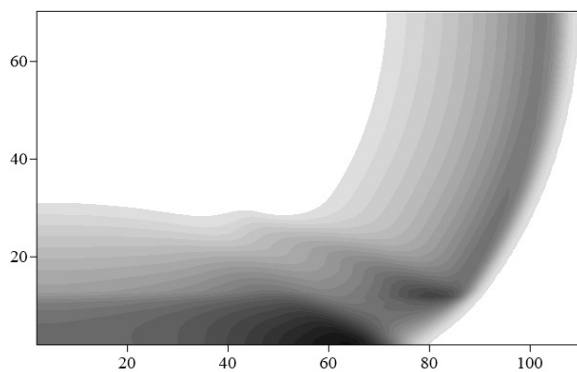


Рис. 3. Изолинии давлений $\alpha_2 = 5 \cdot 10^{-3}$

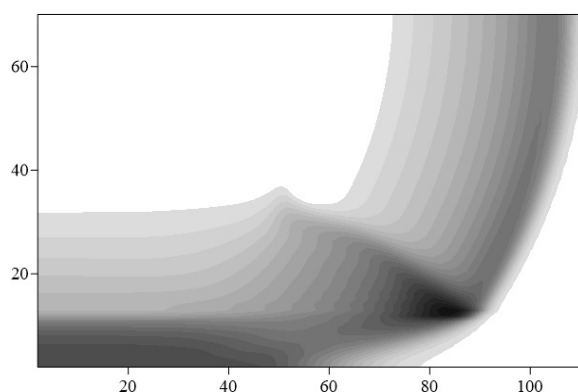


Рис. 4. Изолинии давлений $\alpha_2 = 5 \cdot 10^{-2}$

Зависимость давления от времени в эпицентре взрыва представлена на рис. 5: кривая 1 – $\alpha_2 = 0$, кривая 2 – $\alpha_2 = 0,0001$, кривая 3 $\alpha_2 = 0,001$ и кривая 4 – $\alpha_2 = 0,005$. Видно, что с ростом α_2 растет и время, за которое УВ достигает поверхности, а ее амплитуда падает. С увеличением объемной доли частиц в слое максимальное давление в эпицентре взрыва падает (рис. 6), а время, за которое достигается максимум давления, линейно растет с ростом α_2 (рис. 7).

Распределения давления вдоль стенки представлены на рис. 8. Видно, что наличие частиц приводит к снижению амплитуды падающей сферической УВ и более медленному падению давления за фронтом УВ. Для больших значений объемной доли УВ в слое не имеет четко выраженного фронта.

Рассмотрим теперь влияние температуры газа в слое на динамику течения. В данном случае характерными параметрами задачи являются объемная доля твердой фазы и относительная плотность газа в теплом слое w . Первый параметр оказывает влияние на характер отражения УВ от верхней границы гетерогенного слоя, а второй – на образование предвестника.

На рис. 9 представлены поля давлений для трех значений параметра w на один и тот же момент времени. Скорость УВ, движущейся по слою, тем больше, чем выше температура газа в слое. Уменьшение температуры газа в гетерогенном слое приводит к деформации фронта ударной волны, движущейся по этому слою. Ножка Маха растет с увеличением прогрева газа в гетерогенном слое. При значении параметра $w=0,1$,

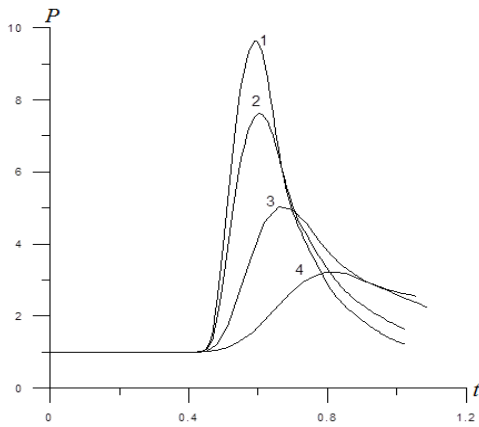


Рис. 5. Зависимость давления в эпицентре взрыва от времени

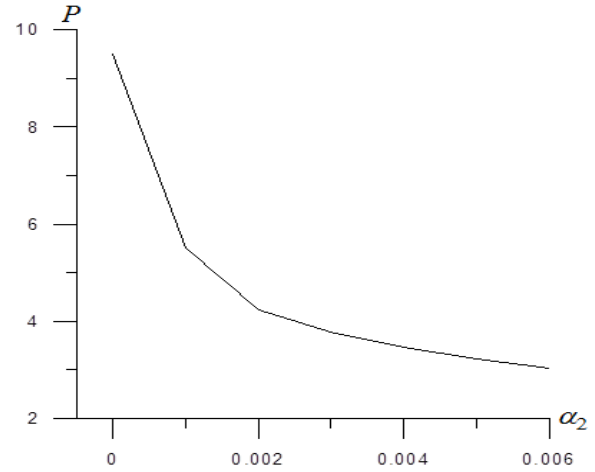


Рис. 6. Зависимость времени достижения максимального давления в эпицентре взрыва от объемной доли частиц

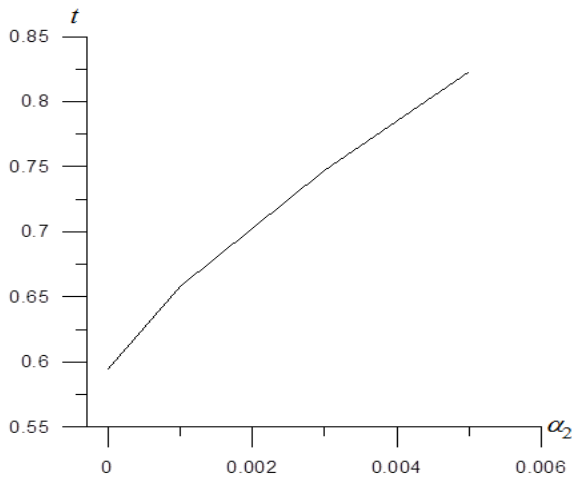


Рис. 7. Зависимость времени достижения максимального давления в эпицентре взрыва от объемной доли частиц

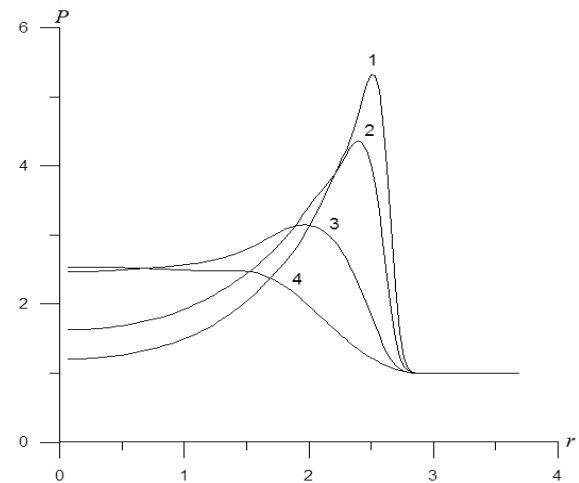


Рис. 8. Распределение давления вдоль поверхности

несмотря на наличие силового и теплового взаимодействия газа и частиц, УВ в слое ускоряется настолько, что обгоняет головной фронт, что, в свою очередь, приводит к образованию предвестника.

На рис. 10, 11 представлены зависимости давлений в эпицентре взрыва от времени и от координаты на момент времени $t=0,76$: кривая 1 – $w=0,1$, кривая 2 – $w=0,5$, кривая 3 – $w=1$. Рост температуры приводит к снижению интенсивности УВ, а ее скорость увеличивается.

Анализ силового воздействия сферической УВ на наземные объекты можно провести, рассчитав значение момента силы, действующей на решетку:

$$M(r, t) = \int_0^H F_r(r, z, t) z dz. \quad (4)$$

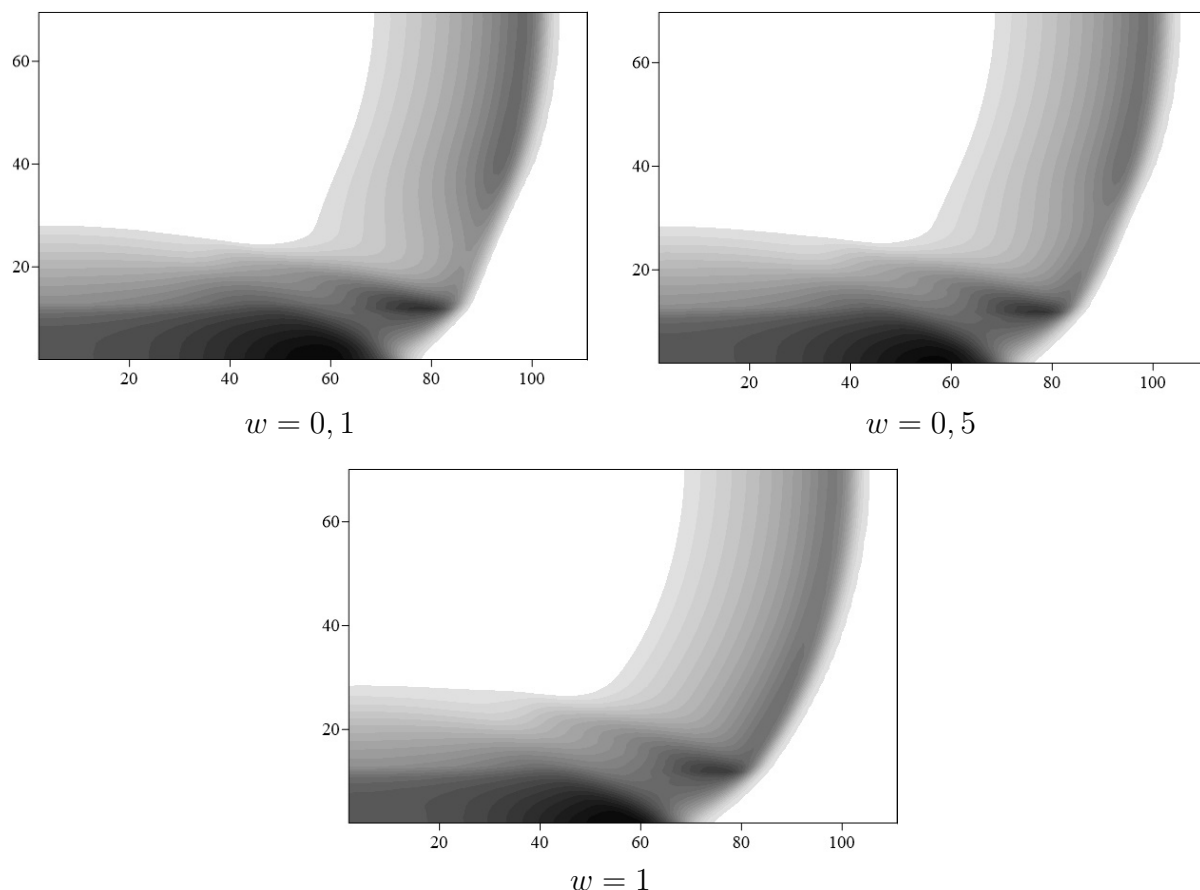


Рис. 9. Изолинии давлений

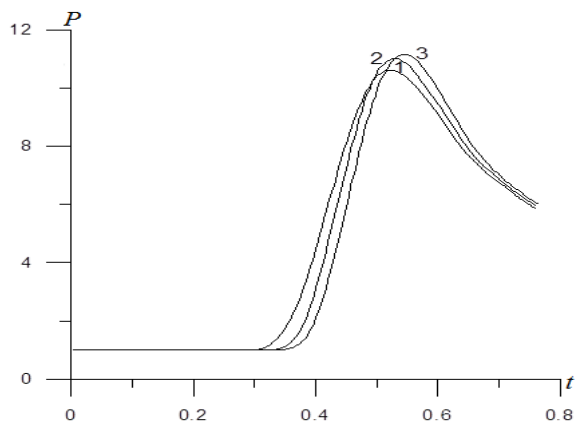


Рис. 10. Зависимость давления от времени в эпицентре взрыва

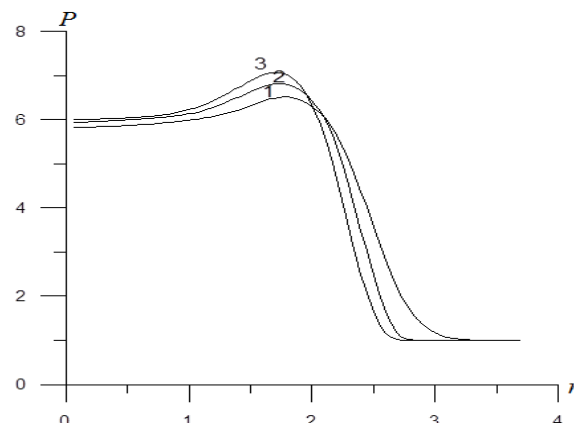


Рис. 11. Распределение давления вдоль поверхности

В данной работе представлено распределение максимального по времени момента силы, действующей на решетку вдоль стенки (рис. 12):

$$M_{max}(r) = \max_{0 \leq t \leq t'} M(r, t), \tag{5}$$

где t' – время окончания расчета по координате r .

Увеличение температуры газа в слое при фиксированной объемной доле способствует увеличению максимального момента силы.

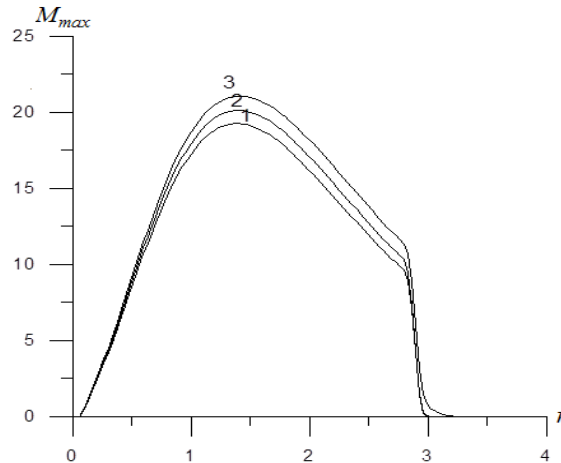


Рис. 12. Распределение максимального момента силы вдоль поверхности

Выводы

В результате проведения численных исследований было показано:

1. Наличие гетерогенного слоя на поверхности приводит к ослаблению падающей УВ внутри этого слоя.

2. При достаточно большой объемной доле твердой фазы происходит деформация головного фронта УВ и сильное ее торможение, в результате чего отражения от стенки практически не происходит и ножка Маха не образуется, однако при $\alpha_2 \geq 5 \cdot 10^{-2}$ – она образуется над поверхностью гетерогенного слоя.

3. С ростом температуры газа в гетерогенном слое скорость ударной волны возрастает, а интенсивность падает.

4. Момент силы, действующей на решетку, тем больше, чем выше температура газа в гетерогенном слое.

5. При высоких температурах газа в гетерогенном слое, несмотря на силовое и тепловое взаимодействие газа и частиц, происходит образование предвестника.

Литература

1. Ивандаев, А.И. Влияние экранирующих слоев газозвеси на отражение ударных волн / А.И. Ивандаев, А.Г. Кутушев // Прикладная механика и техническая физика. – 1985. – № 21. – С. 115–120.
2. 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.
3. Кругликов, Б.С. Ослабление ударных волн экранирующими решетками / Б.С. Кругликов, А.Г. Кутушев // Физика горения и взрыва. – 1988. – № 1. – С. 115–117.
4. Газовая динамика многофазных сред. Ударные и детонационные волны в газозвесах / А.И. Ивандаев, А.Г. Кутушев, Р.И. Нигматулин // Итоги науки и техники. Серия: Механика жидкости и газа; Всероссийский институт научной и технической информации. – 1981. – Т. 16. – С. 209–287.

5. Кутушев, А.Г. Ослабление воздушных ударных волн слоями запыленного газа и решетками / А.Г. Кутушев, Д.А. Рудаков // Прикладная механика и техническая физика. – 1993. – № 25. – С. 25–31.
6. 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. 39–43.
7. Беляев, П.Е. Влияние экранирующего слоя газозвеси на силовое воздействие ударной волны на жесткую стенку / П.Е. Беляев, Н.Л. Клиначева // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 49–55.
8. Клиначева, Н.Л. Модифицированная математическая модель «замороженной» газозвеси / Н.Л. Клиначева, Ю.М. Ковалев, В.Ф. Куропатенко // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1398–1403.
9. 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.
10. Андрущенко, В.А. Отражение сферической ударной волны от плоскости при наличии на ней слоя нагретого газа / В.А. Андрущенко, М.В. Мещеряков, Л.А. Чудов // Механика жидкости и газа. – 1989. – № 24. – С. 141–147.
11. Андрущенко, В.А. Взаимодействие сферических ударных волн с приповерхностными тепловыми газовыми неоднородностями / В.А. Андрущенко, М.В. Мещеряков // Физика горения и взрыва. – 1990. – № 3. – С. 77–82.
12. Антонов, В.А. Моделирование взрыва шнурового заряда в пологе леса при отсутствии пожара / В.А. Антонов, А.М. Гришин, Ю.М. Ковалев, Л.Ю. Наймушина // Физика горения и взрыва. – 1993. – № 4. – С. 115–123.
13. Белоцерковский, О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука, 1982.
14. Белоцерковский, О.М. Нестационарный «метод крупных частиц» для газодинамических расчетов / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов // Прикладная механика и техническая физика. – 1971. – № 21. – С. 182–207.
15. Гришин, Ю.А. Повышение устойчивости вычислительного алгоритма метода крупных частиц / Ю.А. Гришин, В.А. Зенкин // Наука и образование. – 2011. – № 9. – 5 с. – URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/221488.html>
16. Ковалев, Ю.М. Анализ некоторых модификаций метода крупных частиц на примере исследования течений газозвесей / Ю.М. Ковалев, Е.А. Ковалева, Е.Е. Пигасов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 71–77.

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

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

Поступила в редакцию 25 августа 2017 г.

THE ATTENUATION OF SPHERICAL SHOCK WAVES
IN HETEROGENEOUS MEDIA*N.L. Klinacheva, Y.M. Kovalev,*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

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

This article represents the analysis of the numerical investigation of the interaction of spherical shock waves (SW) with mechanical and thermal inhomogeneities located on a flat surface. The results of the calculations showed that the presence of the mechanical and thermal heterogeneity on a flat surface of the heterogeneous layer leads to attenuation of the incident SW within this layer, depending on the volume fraction of the condensed phase. A sufficiently large volume fraction of the solid phase in the heterogeneous layer leads to the deformation of the head front to the SW and strong braking, with the result that reflections from the wall hardly occurs and the leg of the Mach is not formed, however, when $\alpha_2 \geq 5 \cdot 10^{-2}$ – it is formed over the surface of the heterogeneous layer. With the increase of the gas temperature in the heterogeneous layer the velocity (SW) increases while the intensity of its amplitude falls. The calculations given in this particular work showed that the increasing of the gas temperature in the layer promotes the increasing of the moment force acting on the lattice of solid substances. At high temperatures of the gas in the heterogeneous layer, despite power and heat interaction of gas and substances the precursor is formed.

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

References

1. Ivandaev A.I., Kutushev A.G. [The Effect of the Shielding Layers of the Gas Suspension on the Reflection of Shock Waves]. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 1985, no. 21, pp. 115–120. (in Russian)
2. 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)
3. 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)
4. Ivandaev A.I., Kutushev A.G., Nigmatulin R.I. [Gas Dynamics of Multiphase Media. Shock and Detonation Waves in Gas Suspensions]. *Itogi nauki i tehniki. Seriya: Mehanika zhidkosti i gaza*, 1981, vol. 16, pp. 209–287. (in Russian)
5. Kutushev A.G., Rudakov D.A. [Numerical Investigation of the Effect of a Shock Wave on an Obstacle Screened by a Layer of Porous Powdery Medium]. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 1993, no. 25, pp. 25–31. (in Russian)
6. 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)
7. Belyaev P.E., Klinacheva N.L. Impact of Gas Suspension Shielding Layer on The Force Effect of Shock Waves on a Rigid Wall. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 49–55. DOI: 10.14529/mmp160406 (in Russian)

8. 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
9. 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. DOI: 10.14529/mmp140202 (in Russian)
10. Andrushhenko V.A., Meshcheryakov M.V., Chudov L.A. [The Reflection of Spherical Shock Wave from the Plane When It Has a Layer of Heated Gas]. *Fluid Mechanics*, 1990, no. 3, pp. 141–147. (in Russian)
11. Andrushhenko V.A., Meshcheryakov M.V. [The Interaction of Spherical Shock Waves with Near-Surface Thermal Gas Inhomogeneities]. *Physics of Combustion and Explosion*, 1990, no. 1, pp. 77–82. (in Russian)
12. 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)
13. Belocerkovskiy O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnykh chastic v gazovoj dinamike* [The Method of Large Particles in Gas Dynamics], Moscow, Nauka, 1982.
14. Belocerkovskiy O.M., Davydov Yu.M. [Unsteady "Method of Large Particles" for Gas Dynamics Calculations]. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 1971, no. 21, pp. 182–207. (in Russian)
15. Grishin Yu.A., Zenkin V.A. Improving the Stability of the Numerical Algorithm of the Method of Large Particles. *Journal of Science and Education*, 2011, no. 13, 5 p. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/221488.html>
16. Kovalev Yu.M., Kovaleva E.A., Pigasov E.E. The Analysis of Some Modifications of the Large-Particles Method on the Basis of Research of Gas-Suspension Currents. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 71–77. (in Russian)

Received August 25, 2017