

## ОСЛАБЛЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН ЭКРАНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ

Б. С. Кругликов, А. Г. Кутушев

(Москва)

Перспективное использование взрывных процессов в ряде отраслей современной техники ([1, 2] и др.) тесно связано с решением вопросов обеспечения мер безопасности, защиты инженерных сооружений и технологического оборудования от действия ударных волн (УВ). В связи с этим важное прикладное значение представляет изучение проблемы локализации механических эффектов взрыва и ослабление УВ.

В настоящее время на практике ослабление УВ в газе осуществляется путем применения различных экранирующих систем в виде сплошных, перфорированных и разрушающихся перемычек [1, 3]. Один из основных недостатков сплошных и перфорированных перемычек состоит в их весьма большой материалоемкости и соответственно большой величине объемного содержания  $\alpha$  твердого конденсированного вещества ( $\alpha \approx 1 \div 0,1$ ). Указанный недостаток в меньшей степени относится к перемычкам, разрушающимся при взаимодействии с УВ и образующим экранирующие слои или завесы из пены [4] или аэровзвесей [5, 6]. В последних работах, посвященных исследованию закономерностей ослабления УВ слоями аэровзвесей, показывается, что взвеси диспергированного конденсированного материала способны заметно ослабить УВ даже при сравнительно небольших значениях объемного содержания частиц  $\alpha \sim 0,001$ . Сильное затухание УВ в облаках аэровзвеси объясняется интенсивным силовым и тепловым взаимодействием фаз, происходящим во всем объеме смеси и пропорциональным суммарной поверхности всех дисперсных частиц.

В [7, 8] для снижения давлений и импульсов УВ предлагается и обосновывается использование «каркасных систем», представляющих собой систему мелкоячеистых решеток. В настоящей работе проводится численное моделирование процесса ослабления УВ в простейших модельных решетках.

**Основные уравнения и постановка задачи.** Область газа с решеткой моделируется в рамках модели «замороженной» газовзвеси, т. е. смеси газа с жестко закрепленными в эфире (неподвижными) частицами дисперсной конденсированной фазы. «Замороженные» частицы имитируют узлы решеток, влиянием связей решеток на газ пренебрегается (считается, что толщина связей много меньше размеров узлов решетки). Такую систему решеток можно представлять как перфорированную перемычку, для которой аналогом коэффициента перфорации служит величина объемного содержания газа в решетке. Следует заметить, что для кубической решетки отношение расстояния между центрами ее узлов  $h$  к размеру самих узлов  $d$  выражается через объемное содержание конденсированной фазы следующим образом:

$$h/d = (\pi/6 \cdot \alpha)^{1/3}.$$

Нестационарное одномерное плоское движение газа в мелкоячеистых решетках исследуется в рамках известных в механике многофазных сред допущениях [9], в частности следующих: узлы решетки — сферические несжимаемые частицы монодисперсного размера; деформация, дробление и испарение решеток отсутствуют; подвижная фаза — идеальный калорически совершенный газ. При этом с учетом условия неподвижности дисперсной к-фазы в потоке система уравнений двухскоростной двухтемпературной газовзвеси [9] преобразуется к уравнениям обычной газовой динамики и притока тепла для решеток

$$\frac{d_1 \rho_1^0}{dt} + \rho_1^0 \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0, \quad (1 - \alpha) \rho_1^0 \frac{d_1 u_1}{dt} + \frac{\partial p}{\partial x} = -F, \quad u_2 \equiv 0,$$
$$\frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x}, \quad i = 1, 2,$$

$$\rho_1^0 \frac{d_1 E_1}{dt} + \frac{\partial p u_1}{\partial x} = - \frac{Q}{(1-\alpha)}, \quad \alpha \rho_2^0 \frac{d_2 e_2}{dt} = Q, \quad \alpha = \text{const},$$

$$\rho_2^0 = \text{const}, \quad E_1 = e_1 + \frac{u_1^2}{2}.$$

Здесь индексы 1 и 2 относятся к параметрам газа и решеток;  $\rho^0$ ,  $\alpha$ ,  $u$ ,  $e$ ,  $E$  — соответственно истинная плотность, объемное содержание, скорость, удельные внутренняя и полная энергии;  $p$  — давление;  $F$  и  $Q$  — интенсивности «внешнего» силового и теплового взаимодействия газа об узлы решетки, задаваемые с учетом стесненности узлов [5, 9] следующим образом:

$$F = 0,75 C_d \alpha \rho_1^0 |u_1| u_1 d^{-1}, \quad C_d = C_d^0(\text{Re}) \Psi(M) \varphi(\alpha),$$

$$C_d^0 = 24/\text{Re} + 4/\sqrt{\text{Re}} + 0,4, \quad \varphi(\alpha) = (1-\alpha)^{-\kappa}, \quad \kappa \sim 1,$$

$$\Psi(M) = [1 + \exp(-0,427/M^{4,63})], \quad M = u_1/a_1,$$

$$a_1 = \sqrt{\gamma p/\rho_1^0}, \quad \text{Re} = \rho_1^0 |u_1| d/\mu_1,$$

$$Q = 6\alpha \lambda_1 \text{Nu}_1 \left( \frac{e_1}{c_1} - \frac{e_2}{c_2} \right) d^{-2},$$

$$\text{Nu}_1 = 2 \exp(-M) + 0,459 \text{Re}^{0,55} \text{Pr}^{0,33}, \quad \text{Pr} = c_{p1} \mu_1/\lambda_1.$$

В представленных зависимостях  $C_d$  — коэффициент аэродинамического сопротивления сферы, записанный с учетом сжимаемости потока (функция  $\Psi(M)$ ) и стесненности частиц (функция  $\varphi(\alpha)$ );  $C_d^0$  — коэффициент аэродинамического сопротивления частицы в несжимаемом безграничном потоке газа;  $M$ ,  $\text{Re}$ ,  $\text{Nu}_1$ ,  $\text{Pr}$  — числа Маха, Рейнольдса, Нуссельта и Прандтля;  $\gamma$ ,  $\lambda_1$ ,  $\mu_1$ ,  $a_1$  — показатель адиабаты, теплопроводность, вязкость и местная скорость звука газа;  $c_{p1}$ ,  $c_i$  — удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и теплоемкости фаз при постоянном объеме;  $d$  — диаметр частиц.

Рассматривается задача о прохождении плоской УВ со спадающим профилем давления через слой решеток, расположенный перед преградой. Исследуется механическое воздействие УВ на стенку преграды в зависимости от концентрации конденсированного материала в решетках и размера их узлов. Начальные условия для этой задачи формулируются аналогично [5]: параметры газа в зоне разрежения за УВ ( $0 \leq x < x_*$ ) задаются на основе изэнтропических зависимостей для простой волны Римана с треугольным профилем скорости газа, на фронте УВ ( $x = x_*$ ) — на основе соотношений Рэнкина — Гюгонио. Распределение параметров газовой и конденсированной фаз в экранирующем слое решеток ( $x_* < x \leq x_{**}$ ) в момент времени  $t = 0$  полагалось однородным

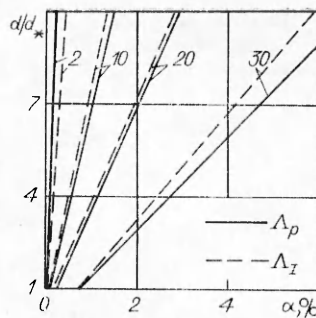
$$\rho_1^0(x, 0) = \rho_{10}^0, \quad u_1(x, 0) = 0, \quad p(x, 0) = p_0, \quad \alpha(x, 0) = \text{const}.$$

На открытой границе ( $x = 0$ ) ставилось условие свободного протекания для газовой фазы, на закрытой границе, стенке ( $x = x_{**}$ ) — условие равенства нулю скорости газа [5].

**Некоторые результаты.** Численно задача решалась методом крупных частиц [10] по алгоритму [11]. Расчеты выполнялись для системы воздух — железо с использованием термодинамических параметров фаз, соответствующих нормальным условиям ( $p_0 = 0,1$  МПа,  $\rho_{10}^0 = 1,21$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2^0 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>). Длина набегающей УВ  $x_* = 0,45$  м, длина экранирующего слоя решеток  $x_{**} - x_* = 1,5$  м, давление на фронте треугольной УВ  $p(x_*, 0) = 2$  МПа. Объемное содержание ж-фазы в решетках и размер их узлов  $0,1 \leq \alpha \leq 6,5\%$  и  $60 \leq d \leq 600$  мкм. Указанному диапазону изменения  $\alpha$  соответствует  $h/d - 8 \div 2$ .

Ослабление УВ решетками можно характеризовать сравнением максимального давления отражения на преграде  $p_{\text{max}}$  с соответствующим давлением на преграде  $p_{\text{max}}^0$  в газе без решеток ( $\alpha = 0$ ). Зависимость

степени уменьшения максимального давления на преграде  $\Lambda_p = p_{\max}^0/p_{\max}$  ( $p_{\max}^0 = 3,8$  МПа) от параметров решеток  $\alpha$  и  $d/d_*$  ( $d = 60$  мкм) проиллюстрирована на рисунке линиями равного ослабления давления ( $\Lambda_p = \text{const}$ ). Видно, что, как и в аэровзвесах, степень ослабления УВ возрастает при увеличении  $\alpha$  и уменьшении  $d$ . При этом одинакового эффекта снижения пикового давления на стенке преграды можно достичь путем вариации значений  $\alpha$  и  $d$ . Например, двадцатикратное снижение  $p_{\max}$  получается в случае решеток с  $d/d_* = 1$ ,  $\alpha = 0,3\%$  и  $d/d_* = 10$ ,  $\alpha \approx 3\%$  (см. линию  $\Lambda_p = 20$  на рисунке).



Для анализа ослабления УВ решетками целесообразно ввести в рассмотрение также степень уменьшения максимального импульса избыточного давления газа на стенке преграды ( $\Lambda_I = I_{\max}^0/I_{\max}$ ). Здесь  $I_{\max}$ ,  $I_{\max}^0$  — значения импульсов избыточного давления газа в случаях наличия и отсутствия решеток, рассчитанные на основе следующего интеграла:

$$I = \int_0^t (p - p_0) d\tau.$$

На рисунке штриховыми линиями продемонстрирована зависимость величины  $\Lambda_I$  ( $I_{\max}^0 \rightarrow 2000$  кг/(м·с)) на преграде от значений  $\alpha$ ,  $d$  решеток. Видно, что наличие экранирующего слоя решеток приводит к уменьшению импульсного воздействия УВ на преграду. Степень ослабления импульсного воздействия УВ возрастает при увеличении объемной доли конденсированного материала в решетках и уменьшении размеров их узлов. Одинаковый эффект ослабления импульса УВ достигается путем вариации  $\alpha$  и  $d$ . В частности, двадцатикратное ослабление импульса на преграде получается в случае решеток с  $d/d_* = 1$ ,  $\alpha = 0,75\%$  и  $d/d_* = 10$ ,  $\alpha = 5,75\%$ .

Таким образом, на основе выполненного исследования в рамках простейших модельных представлений показана высокая эффективность ослабления УВ мелкоячеистыми решетками с весьма незначительным объемным содержанием к-фазы ( $\alpha \sim 0,1-1\%$ ). Следует отметить, что в исследованном диапазоне изменения параметров фаз и УВ установлено слабое влияние эффектов межфазного теплового взаимодействия  $Q$  на ослабление УВ по сравнению с эффектами силового взаимодействия фаз  $F$ . Поэтому при проведении расчетов в ряде практически важных случаев влиянием контактного теплообмена можно пренебречь ( $Q \rightarrow 0$ ).

Авторы выражают признательность Л. В. Альтшулеру за постоянное внимание к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гурии А. А., Малый П. С., Савенко С. К. Ударные воздушные волны в горных выработках. — М.: Недра, 1983.
2. Велихов Е. П., Власов В. П. и др. Атомная энергия, 1978, 45, 1, 9.
3. Клаповский В. Е., Минеев В. Н. и др. ФГВ, 1983, 19, 5, 115.
4. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И. ФГВ, 1981, 17, 4, 129.
5. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г. ПМТФ, 1985, 1, 115.
6. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г. ТВТ, 1985, 23, 3, 506.
7. Альтшулер Л. В., Кругликов Б. С. — В кн.: Высокоскоростная фотография и метрология быстротекущих процессов. — М.: ВНИИОФИ, 1983.
8. Альтшулер Л. В., Кругликов Б. С. ПМТФ, 1984, 5, 24.
9. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г., Нигматуллин Р. И. Итоги науки и техники. Сер. «Механика жидкости и газа». Т. 16. — М.: ВИНТИ, 1981.

10. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. — М.: Наука, 1982.  
 11. Иваидаев А. И., Кутушев А. Г. Численные методы механики сплошной среды, т. 14, № 6. — Новосибирск, 1983.

Поступила в редакцию 11/XI 1985,  
 после доработки — 11/XI 1986

## НЕПРЕРЫВНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДВИЖЕНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ЗА ФРОНТОМ ДВ

В. В. Дорохин, В. Н. Зубарев, Ю. К. Орехин,  
 Н. В. Панов, Н. Л. Шаболдина  
 (Москва)

Для исследования течения за фронтом детонационных волн в конденсированных ВВ рентгенографический метод применялся неоднократно [1—5]. При определенных условиях результаты рентгенографической регистрации позволяют не только определить параметры фронта ДВ в установившемся режиме, но и сделать некоторые выводы о структуре ДВ и об уравнении состояния расширяющихся продуктов детонации.

В отличие от обычной реализации, заключающейся в размещении в заряде параллельных металлических фольг с регистрацией их смещений после прохождения фронта ДВ [1—3], в данной работе использовано наклонное расположение фольги [4, 5], позволяющее более детально регистрировать характеристики течения за фронтом ДВ. Результаты, полученные в опытах с зарядами из взрывчатого состава, используемого в [3], обработаны в предположении равновесности продуктов детонации и приводят к выводам, качественно аналогичным [3].

В эксперименте (рис. 1) проверялись система формирования плоской установившейся ДВ, синхронизация работы рентгеновской установки, измерительной аппаратуры и детонационного процесса, обеспечение защиты регистрирующей пленки от воздействия взрыва и проводились некоторые контрольные измерения для надежности расшифровки экспериментальных данных [3, 4].

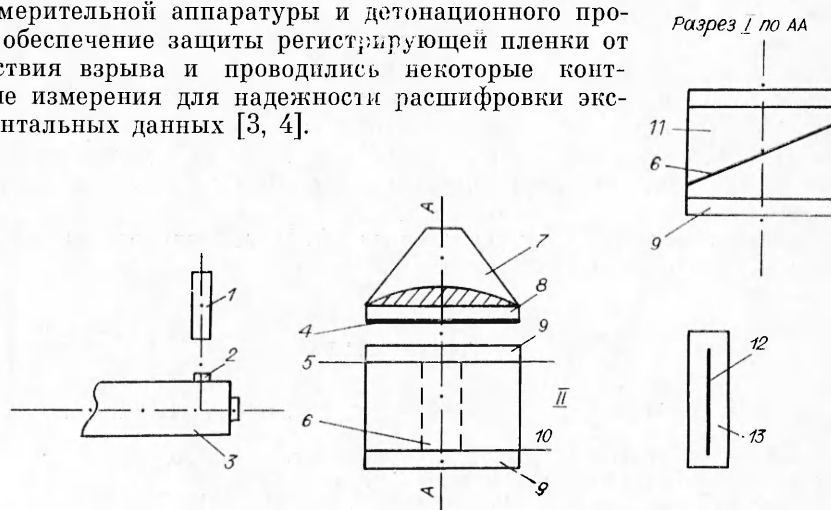


Рис. 1. Схема проведения экспериментов.  
 I — инициирующий заряд, II — блок исследуемого ВВ. 1 — фотоэлемент; 2 — смотровое окно рентгеновской трубки; 3 — рентгеновская трубка; 4 — алюминиевая фольга; 5 — пусковой контакт; 6 — свинцовая фольга; 7 — плосковолновой генератор; 8 — слой ВВ; 9 — накладной диск ВВ; 10 — осциллографические контакты для измерения D; 11 — цилиндрические блоки со скошенными торцами; 12 — рентгеновская пленка; 13 — защитная кассета.