

с собственной частотой процесса в инерционной части зоны горения (к-фаза). Оценка характерной частоты протекания процесса, по известному выражению $\omega = u^2/\kappa$, где u — линейная скорость, κ — температуропроводность к-фазы, оказалась в 4 раза больше экспериментальной. Наличие собственной частоты колебаний скорости нестационарного горения качественно согласуется с теоретическими результатами [5, 6].

Экспериментальные частотные характеристики скорости горения при использовании аппарата теории автоматического регулирования [7] можно применять в расчете динамики более сложных систем, включающих горящее конденсированное вещество, например горение в полужамкнутом объеме.

Ленинградский
механический институт

Поступила в редакцию
12/V 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Михеев, С. М. Борин. ФГВ, 1973, 9, 2.
2. В. Е. Зарко, В. Н. Симоненко, К. П. Куценогий. ФГВ, 1975, 11, 4.
3. П. В. Новицкий и др. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л., «Энергия», 1970.
4. Н. Т. Кузнецов. Теория автоматического регулирования, основанная на частотных методах. М., Оборонгиз, 1960.
5. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., «Наука», 1973.
6. О. Я. Романов. ФГВ, 1975, 11, 2.
7. В. М. Бобылев. ФГВ, 1970, 5, 4.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛН ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВАХ ГАЗООБРАЗНЫХ И КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

О. Е. Попов, С. М. Когарко

Полученные в [1] результаты измерений параметров волн давления при подводных взрывах газовых смесей позволяют провести сравнение их с известными данными для тротила [2]. Из [3] следует, что при подводных взрывах ВВ принцип энергетического подобия не выполняется, и параметры волн давления зависят не только от энергии источника взрыва, но и от объемной плотности энергии. Естественно ожидать значительного нарушения энергетического подобия и при сравнении волн взрывов газообразных и конденсированных взрывчатых веществ, объемные плотности энергии которых могут отличаться на три порядка.

Представляет также интерес определение степени отклонения от энергетического подобия на различных расстояниях от места взрыва и от величины объемной плотности энергии газовой смеси. Последнюю можно изменять благодаря зависимости плотности газа от глубины погружения заряда.

Соотношения для основных параметров волн, измеренных на расстоянии r от центра взрыва с энергией W , выражаются через приведенное расстояние $R_W^0 = r/W^{1/3}$, где $[R_W^0] = \text{м/МДж}^{1/3}$. В этом случае интерполяционные формулы [2] для тротила с плотностью $1,52 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

могут быть представлены в виде

$$p = 305 \cdot 10^5 / (R_W^0)^{4,13}, \quad (1)$$

$$\frac{I}{W^{1/3}} = 2,33 \cdot 10^3 / (R_W^0)^{0,89}, \quad (2)$$

$$\frac{E}{W^{1/3}} = 1,89 \cdot 10^4 / (R_W^0)^{2,05}, \quad (3)$$

где p — пиковое давление, Н/м²; I — удельный импульс, Н·с/м²; E — плотность потока энергии, Вт/м². Указанные формулы описывают экспериментальные данные [2] при $0,26 \leq R_W^0 \leq 8,21$, что соответствует относительным расстояниям от центра заряда тротила $7,7 \leq r/R_0 \leq 245$.

Для постоянной времени волны θ (мс) в [2] имеется лишь графическая зависимость, которую при $1,5 \leq R_W^0 \leq 7,8$ можно аппроксимировать степенным выражением [4]

$$\frac{\theta}{W^{1/3}} = 0,0697 (R_W^0)^{0,24}. \quad (4)$$

В случае подводного взрыва газовой смеси из [1] следует

$$p = 0,149 \cdot q^{2/3} / R_W^0. \quad (5)$$

Это соотношение справедливо при $r/R_0 > 2 \div 3$, где R_0 — начальный радиус заряда, q — объемная плотность энергии, МДж/м³. В частности, для газовой смеси с $q = 7,2$ МДж/м³ соотношение

$$p = 5,56 \cdot 10^5 / R_W^0 \quad (5')$$

описывает экспериментальные данные для смеси $C_3H_8 + 5O_2$ при начальном давлении 10^5 Н/м².

На рис. 1 сопоставлены пиковые давления в волнах взрывов газовой смеси $C_3H_8 + 5O_2$ и тротила. Хотя энергетическое подобие и не выполняется, тем не менее выбранная система координат позволяет показать, как отличаются давления в волнах при равенстве выделяющейся энергии. Штриховой вертикальной линией обозначена поверхность заряда взрывчатой газовой смеси (ВГС). Штрихпунктиром нанесена зависимость давления от расстояния в области $r < (2 \div 3)R_0$, где падение амплитуды отлично от акустического. Радиус заряда рассматриваемой ВГС при давлении в 10^5 Н/м² превышает радиус заряда тротила в 9,62 раза, а при изменении объемной плотности энергии может быть найден по соотношению

$$R_0^* = \left(\frac{q^{**}}{q^*} \right)^{1/3} R_0^{**}$$

(верхние индексы: * — ВГС, ** — ВВ).

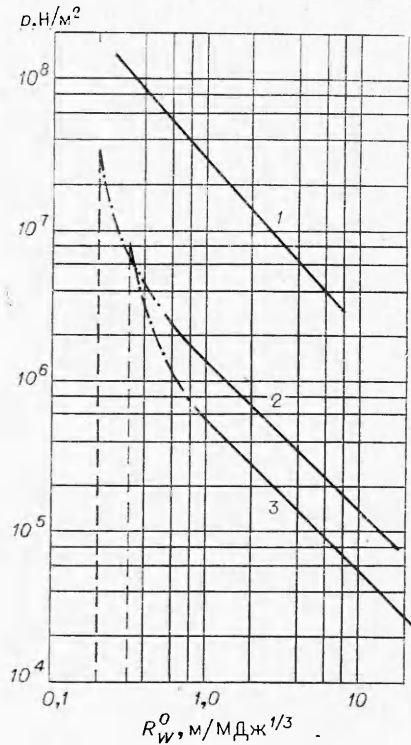


Рис. 1. Сравнение амплитуд волн на различных приведенных расстояниях. q , МДж/м³: 1 — $9,4 \cdot 10^3$ (ВВ), 2 — 28,8 (ВГС), 3 — 7,2 (ВГС).

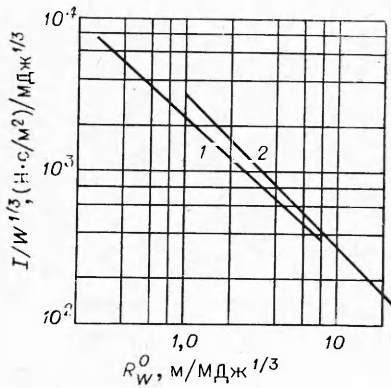


Рис. 2. Удельные импульсы от взрыва тротила (1) и газа (2).

Как следует из рис. 1, повышение объемной плотности энергии газовой смеси при сохранении общего запаса энергии уменьшает степень отклонения от энергетического подобия. Это отклонение также уменьшается и при увеличении расстояния от места взрыва, что связано с более быстрой диссипацией энергии в волне взрыва конденсированного ВВ.

Интерполяционные формулы, описывающие экспериментальные данные [1] для удельного импульса и плотности потока энергии при $q = 7,2 \text{ МДж/м}^3$ в координатах энергетического подобия, имеют вид:

$$\frac{I}{W^{1/3}} = 3,19 \cdot 10^3 / R_W^0, \quad (6)$$

$$\frac{E}{W^{1/3}} = 6,83 \cdot 10^2 / (R_W^0)^2. \quad (7)$$

Сопоставление соотношений (2) и (6) для импульса дано на рис. 2, а соотношений (3) и (7) для плотности потока энергии — на рис. 3 ($q^* = 7,2 \text{ МДж/м}^3$, $q^{**} = 9,4 \cdot 10^3 \text{ МДж/м}^3$). Видно, что плотность потока энергии волны газового взрыва, так же как и пиковое давление (5), ниже, чем у ВВ,

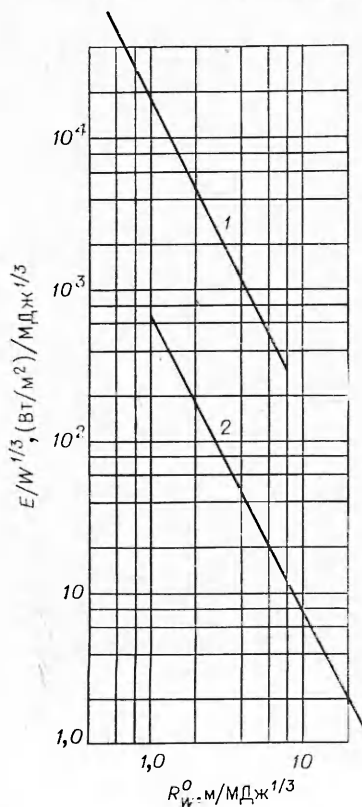


Рис. 3. Плотности потока энергии от взрыва тротила (1) и газа (2).

а удельные импульсы близки. Последний факт объясняется тем, что снижение объемной плотности энергии на три порядка по сравнению со взрывом ВВ приводит к заметно меньшим скоростям расширения продуктов взрыва, в результате чего продолжительность волны увеличивается примерно на два порядка. На рис. 4 показаны величины постоянной времени волны θ для тротила [2]. Для сравнения там же нанесены данные [1] о длительности положительной фазы волны τ_+ при газовом взрыве. В отличие от взрыва ВВ, где с удалением от места взрыва имеется постепенное растяжение волны, при газовом взрыве волна

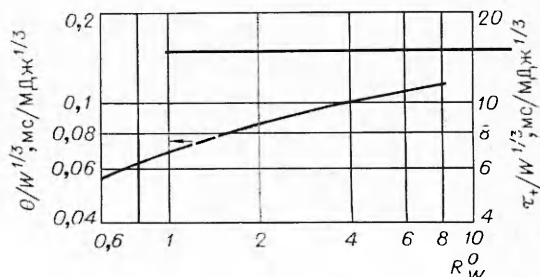


Рис. 4. Сравнение временных характеристик волн при взрыве тротила и газа.

ведет себя как акустическая и не меняет продолжительности.

Для того, чтобы яснее представить, как в зависимости от расстояния изменяется соотношение основных параметров волн взрывов газобразных и конденсированных взрывчатых веществ с одинаковым начальным запасом энергии, целесообразно использовать относительные

величины $\pi = p^{**}/p^*$, $i = I^{**}/I^*$, $\varepsilon = E^{**}/E^*$, закон изменения которых с расстоянием может быть описан следующими формулами:

$$\pi = 54,8/(R_W^0)^{0,13},$$

$$i = 0,73/(R_W^0)^{0,11}, \quad \varepsilon = 27,7/(R_W^0)^{0,05}.$$

Приведенные формулы справедливы не только в области сравнительно малых расстояний (до $R_W^0 \sim 8$), что соответствует относительным расстояниям $r/R_0^{**} \sim 240$, но и, в соответствии с экспериментальными данными [5], могут быть, так же как и соотношения (1)–(3), распространены на область до $R_W^0 \sim 300$ ($r/R_0^{**} \sim 10000$).

Сравнение указанных относительных величин приведено в таблице, где в качестве масштаба длины выбран радиус заряда ВГС. Цифры, приведенные в нижней строке таблицы и заключенные в скобки, — результаты сравнения взрыва тротила и газовой смеси $C_3H_8 + 5O_2$, полученные в [6] методом Кирквуда — Бете для относительных расстояний $r \geq 120R_0^*$. Расчетные данные [6] для пикового давления разумно согласуются с экспериментальными, тогда как импульсы и плотности потока энергии волн газового взрыва получаются завышенными. Причиной такого завышения является, по-видимому, использование в расчетах интегральных характеристик так называемого «пикового приближения», плохо оправдывающегося для знакопеременной кривой давления — время газового взрыва.

Институт химической физики
АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
20/VII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Когарко, О. Е. Попов, А. С. Новиков. ФГВ, 1975, 11, 5.
2. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
3. Б. Д. Христофоров. ПМТФ, 1960, 2.
4. Ю. С. Яковлев. Гидродинамика взрыва. Л., Судпромгиз, 1961.
5. А. В. Агопс. J. Acoust. Soc. Amer., 1954, 26, 3.
6. В. М. Любошиц, В. Е. Первушин. МЖГ, 1971, 2.