

ПАРАМЕТРЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ВОДЕ ВБЛИЗИ СФЕРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

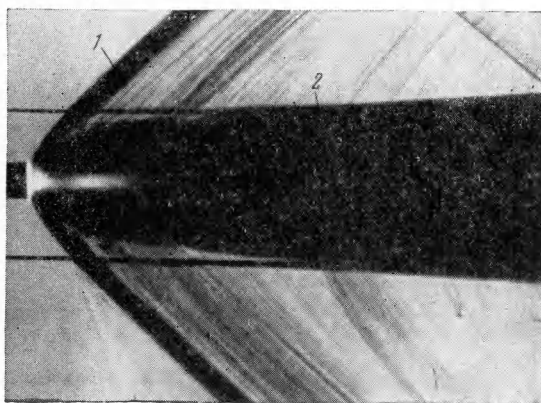
В. Н. Костюченко

(Москва)

Параметры ударной волны подводного взрыва сферического заряда ВВ довольно широко исследованы экспериментально в области не очень больших давлений (~ 1000 атм [1, 2]). Однако ударные волны в близкой к заряду области изучены очень мало, что связано, видимо, с трудностями прямых методов измерения очень высоких давлений. В то же время, ряд задач, возникающих при исследовании подводного взрыва вблизи преград или границы раздела разных сред (например, вблизи свободной поверхности воды или у дна водоема), требует для своего решения знания параметров ударной волны в близкой к заряду зоне.

Ниже приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований этих параметров.

1. Описание эксперимента. Исследовался взрыв сферических зарядов весом 0.85 г. Заряды прессовались из тэна, плотность зарядов составляла 1.54 г/см³, радиус зарядов $R_0 = 5.1$ мм. Иницирование взрыва осуществлялось пережиганием манганинового мостика, помещенного в центр заряда, импульсом тока высокого напряжения. Фронт ударной волны и граница газового пузыря фотографировались при помощи полутеневого устройства прибором ЖФР [3]. Типичная фотография развертки процесса взрыва во времени приведена на фиг. 1 (щель регистратора ЖФР совмещена с центром изображения заряда, время возрастает слева направо).



Фиг. 1. Фотография развертки процесса взрыва во времени (1—фронт ударной волны, 2—граница продуктов взрыва; время возрастает слева направо)

2. Давление во фронте ударной волны. Фотография развития процесса позволяет непосредственно получить зависимость радиуса расширения сферического фронта ударной волны R от времени. Графическим дифференцированием этой зависимости определялась скорость фронта N на различных расстояниях от центра заряда.

Используя ударную адиабату воды [4, 5] и зная величину скорости фронта N , можно рассчитать параметры фронта ударной волны (давление p , массовую скорость u , скорость звука c и т. д.). На фиг. 2 в логарифмическом масштабе представлены определенные таким образом давления во фронте волны p в тысячах атмосфер (кружочки) на различных приведенных расстояниях $h = R/R_0$.

Из фиг. 2 видно, что давление во фронте довольно быстро спадает с расстоянием, причем в области $1.5 \leq h \leq 6$ экспериментальные точки хорошо описываются зависимостью $p = 80\,000 h^{-2}$ атм.

На больших расстояниях затухание давления происходит медленнее, приближаясь к зависимости, полученной для примерно таких же зарядов путем непосредственного измерения давления в ударной волне пьезодатчиками [2] (на фиг. 2 эта зависимость показана пунктирной линией). Определение скорости фронта на поверхности заряда ($h = 1$) затруднено. Однако вычисленная по экспериментальным данным величина давления в ударной волне (120—140 тыс. атм) согласуется с оценкой этого давления из распада разрыва на границе продукты взрыва — вода. На фиг. 2 представлена зависимость давления от расстояния, рассчитанная Кирквудом и Бринкли [1] (штрих-пунктирная линия). Расхождение экспериментальных и теоретических величин (в особенности вблизи заряда) объясняется тем, что в теории Кирквуда — Бринкли не учитывается влияние детонационной волны.

Экспериментальные данные [6], показанные на фиг. 2 крестиками, лежат заметно ниже наших. Это, видимо, можно объяснить искажениями в записях давления, неизбежно возникающими из-за сравнительно больших размеров датчиков, использовавшихся в этой работе.

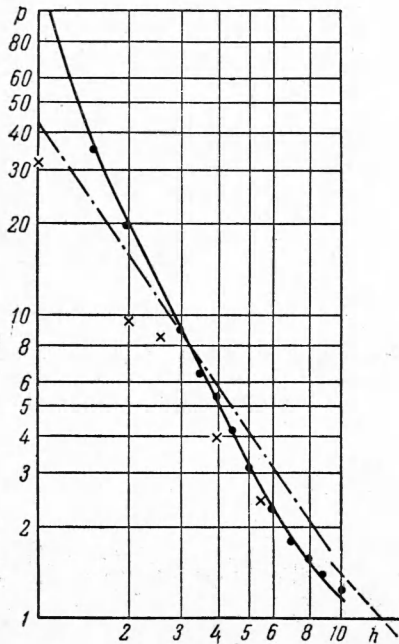
3. Постоянная времени θ . Используя уравнения гидродинамики и зная зависимость давления во фронте ударной волны от расстояния, можно определить производную по времени от давления за фронтом $\partial p/\partial t$. Для четырех неизвестных $\partial p/\partial t$, $\partial p/\partial R$, $\partial u/\partial t$, $\partial u/\partial R$ на фронте волны имеем систему уравнений

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{u}{c^2} \frac{\partial p}{\partial R} + \rho \frac{\partial u}{\partial R} = - \frac{2up}{R}$$

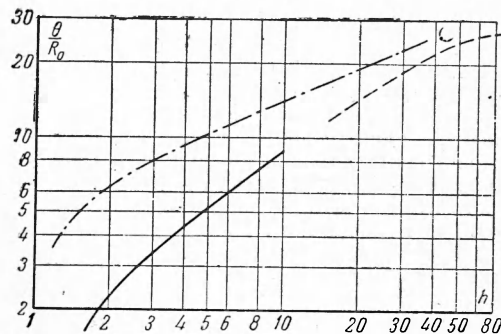
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial R} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial R}$$

$$\frac{du}{dR} = \frac{\partial u}{\partial R} + \frac{1}{N} \frac{\partial u}{\partial t}, \quad \frac{dp}{dR} = \frac{\partial p}{\partial R} + \frac{1}{N} \frac{\partial p}{\partial t}$$

Здесь N , p , u , c , ρ , dp/dR , du/dR будут известными функциями расстояния.



Фиг. 2



Фиг. 3

Предположим, что давление в ударной волне в данной точке спадает со временем по экспоненциальному закону с постоянной времени θ , как это обычно имеет место на больших расстояниях от заряда. Используя соотношение

$$\frac{1}{\theta} = - \frac{\partial}{\partial t} \ln p$$

получим из уравнений следующее выражение

$$\frac{1}{\theta} = - \frac{N}{1 - [(N-u)/c]^2} \left[\left(1 + \frac{(N-u)u}{c^2} \right) \frac{d}{dR} \ln p + \frac{\rho N}{p} \frac{du}{dR} + \frac{2}{R} \right]$$

Результаты вычислений θ представлены в логарифмическом масштабе на фиг. 3 (сплошная линия) в виде зависимости θ/R_0 от h (θ в мк сек, R_0 в см). Как можно видеть, они хорошо согласуются с результатами, полученными путем непосредственного измерения θ по эпюре давления ударной волны [2] (пунктирная кривая). На этой же фигуре показана зависимость θ/R_0 от h , рассчитанная по теории Кирквуда — Бринкли [1] (штрих-пунктирная линия). Заметное расхождение расчетной и определенной по экспериментальным данным кривых объясняется той же причиной, о которой говорилось при обсуждении результатов по давлению.

Интересно отметить, что экспоненциальный закон изменения давления в данной точке со временем дает для небольших расстояний $h \leq 3$ давление на границе вода — газовый пузырь, близко совпадающее с давлением в продуктах взрыва, вычисленным из адиабаты продуктов взрыва Джонса [1].

Поступила 4 III 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Коул Р. Подводные взрывы. ИИЛ, 1950.
2. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов из тана малого веса. ПМТФ, 1960, № 2.
3. Дубовик А. С., Чурбаков А. И. Высокоскоростной фоторегистратор непрерывного действия ЖФР. Оптико-механическая промышленность, 1959, № 1.
4. Rice M. H., Walsh I. M. Equation of State of water to 250 kilobars. Jour. Chem. Phys., 1957, Vol. 26, No. 4.
5. Альтшулер Л. В., Баканова А. А. и Трунин Р. Ф. Фазовые превращения при сжатии воды сильными ударными волнами. ДАН СССР, 1953, т. 121, № 1.
6. Webb A. H. Under — water explosion measurements from small charge of short ranges. Phil. Trans. R. Soc. 1951, Vol. 244, No. 879.