

давлениях от 58 до 225 кбар температуры были рассчитаны при весьма сильном приближении $C_p = \text{const}$. Для нахождения функции $f(V)$ в (5) использовались результаты экстраполяции экспериментальных данных к пределу $p \rightarrow 0$. Для функций f, g был принят различный вид функциональной зависимости для различных диапазонов изменения удельного объема, что привело к изломам рассчитанных в [16] ударных адиабат и изэнтроп.

В заключение автор приносит благодарность профессору Л. В. Альтшулеру за помощь в работе и критические замечания.

Поступила в редакцию
29/II 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 197.
2. В. Е. Фортов, Ю. Г. Красников. ЖЭТФ, 1970, 59, 1645.
3. Б. Н. Ломакин, В. Е. Фортов, Ю. Г. Красников. Третья Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы. М., Изд. МГУ, 1971.
4. В. Е. Фортов. Третий Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Тез. докл. Черноголовка, 1971.
5. J. Wackerle. I. Appl. Phys., 1962, 33, 922.
6. Л. В. Альтшулер, Р. Ф. Трунин, Г. В. Симаков. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1965, 10.
7. Р. Ф. Трунин, Г. В. Симаков, М. А. Подурец. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1971, 2, 33.
8. S. P. Brush. Progr. High. Temper. Phys. and Chem, 1, Pergamon Press, 1967.
9. B. I. Alder. Proc of Symp on High Pressure, Plenum Press, 1964.
10. Л. В. Альтшулер, И. И. Шарипджанов. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1971, 3, 11.
11. Р. Ф. Трунин, Г. В. Симаков и др. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1971, 1, 13.
12. S. M. Cuggu, G. R. Henry. Am I. Phys., 1968, 36, 838.
13. А. М. Подурец, Р. Ф. Трунин. Докл. АН СССР, 1971, 195, 811.
14. R. Mc. Queen, Z. Frits, C. Marsh. I. Geophys. Res., 1963, 68, 2319.
15. P. S. Ienson, B. A. Stein, R. S. Davis. J. Appl. Phys., 1962, 33, 557.
16. M. Cowperthwaite, I. N. Blackburn. Symp on the Accurate Char. of the High Pressure Environment Cambridge October, 1968.
17. I. M. Walsh, R. H. Christian. Phys. Rev., 1955, 97, 1544.
18. M. H. Rice, I. M. Walsh. J. Chem. Phys., 1957, 26, 824.

УДК 532.593

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВАХ

Л. С. Козаченко, Б. Д. Христофоров
(Москва)

Приведены результаты экспериментальных исследований начальной скорости подъема купола (султана), изменения его высоты со временем и параметров поверхностных волн при подводных взрывах сферических зарядов литого тротила весом 100 кг на различных глубинах в водоемах глубиной до 12 радиусов заряда $R_0 \approx 0,25$ м.

Методика. Опыты проводились в бассейне длиной 87 м, шириной в ровной части по дну 20 м с песчаным дном. При проведении опытов уровень воды над дном изменялся от 0,25 до 3 м. Развитие султана фотографировалось с четырех вышек высотой 9,5; 12,5; 12,5 и 23,3 м, расположенных на расстояниях 355; 100; 100 и 112 м от центра взрыва соответственно. Фотографирование проводилось кинокамерами СКС,

АКС, КС-506 и АФА с размерами кадров на пленке $7,5 \times 10,4$; 16×22 ; 16×22 и 300×300 мм и скоростью съемки 2000, 32, 32, 0,5 кадров/сек. Расположение вышек обеспечивало возможность фотографирования поверхностных явлений с различных направлений.

Для измерения параметров поверхностных волн использовались разработанные в НИИ Гидропроект им. акад. Жука волнографы типа НВ-3, позволяющие регистрировать волны высотой до 150 см с погрешностью около 1%. Принцип действия волнографов основан на измерении изменения электрического сопротивления воды между двумя проволочными электродами, натянутыми параллельно на вертикальной раме. Использовалась мостовая схема регистрации с последующим усилением и записью сигналов от датчиков на шлейфных осциллографах МПО-2 и ОШ-9.

После каждого взрыва производилась откачка воды из бассейна и выравнивание его дна.

Результаты измерений. Ниже все линейные размеры, отмеченные сверху чертой, отнесены к радиусу заряда $R_0 = 0,053 C^{1/3}$ м, где C — вес заряда, кг.

Как следует из полученных фотографий, после взрыва заряда ударная волна выходит на поверхность воды и вызывает ее подъем с начальной скоростью v_0 , зависящей от заглубления заряда. Последующее расширение газового пузыря приводит к вытеснению воды и образованию купола, через центральную часть которого устремляются продукты детонации, образуя водяной столб приблизительно цилиндрической формы с переменной, уменьшающейся по высоте, толщиной стенок. На некоторой высоте происходит уменьшение толщины стенок водяного цилиндра, приводящее к прорыву газов в атмосферу и образованию грибовидной формы купола. С увеличением глубины заряда прорыв газов происходит позднее. При этом грибовидная форма купола переходит в конусообразную. При подводном взрыве в условиях проведения опытов форма купола определяется движением воды, вызванным ударной волной и последующим расширением газового пузыря, а также действием продуктов взрыва, прорывающихся в атмосферу.

В более поздние моменты времени происходит обрушение водяного столба и образование поверхностных гравитационных волн. Отмеченные особенности развития купола можно проследить на приведенных фотографиях. На рис. 1 показаны результаты скоростной съемки купола аппаратом СКС-1 при взрыве заряда на глубине $\bar{h} = 1$ в водоеме глубиной $\bar{H}_* = 4$. При малом погружении заряда ($\bar{h} \leq 2$) прорыв светящихся

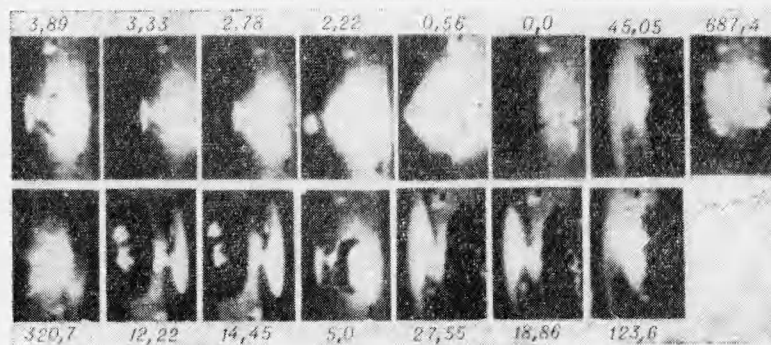


Рис. 1.



Рис. 2.

ся продуктов взрыва приводил к засвечиванию пленки, что затрудняло определение начальной скорости подъема купола. На рис. 2 приведены фотографии развития купола, полученные камерой АКС при взрыве заряда на глубине $\bar{h} = 4$ в водоеме с $\bar{H}_* = 12$. В этом случае прорыв газов происходит на более поздних стадиях.

Зависимость начальной скорости подъема купола от заглубления заряда (рис. 3, 1) можно описать эмпирической формулой

$$v_0 = 4500 \bar{h}^{-1,3} \text{ м/сек.} \quad (1)$$

В диапазоне $1 \leq \bar{R} \leq 7,4$ значения v_0 превышают скорость звука в воздухе.

Зависимости максимальной высоты купола \bar{H}_m от глубины заряда \bar{h} при взрывах в водоемах глубиной $\bar{H}_* = 12$ и 4 приведены также на рис. 3 (кривые 2 и 3 соответственно). В водоеме $\bar{H}_* = 12$ максимальная высота купола возрастает с углублением заряда до $\bar{h} = 8$, а затем уменьшается. Высота подъема купола определяется, в основном, его начальной скоростью и сопротивлением воздуха, а влияние силы тяжести сказывается лишь в заключительной стадии. Поэтому можно ожидать, что зависимость \bar{H}_m от \bar{h} и \bar{H}_* будет подчиняться закону геометрического подобия.

Экспериментальные зависимости высоты купола \bar{H} в поздней стадии его развития от времени при взрывах в водоеме $\bar{H}_* = 12$ даны на рис. 4 (цифрами указано заглубление заряда). Экспериментальные данные в диапазоне $2 \leq t \leq 20$ сек/м с отклонением, не превышающим 10%, можно описать эмпирической формулой

$$\bar{H} = K [85 + 49t - 1,3t^2]. \quad (2)$$

Значения коэффициентов K равны 0,76; 1; 1,13; 1,21; 0,95 при взрывах на глубинах \bar{h} , равных 0,25; 1; 4; 8; 11 соответственно.

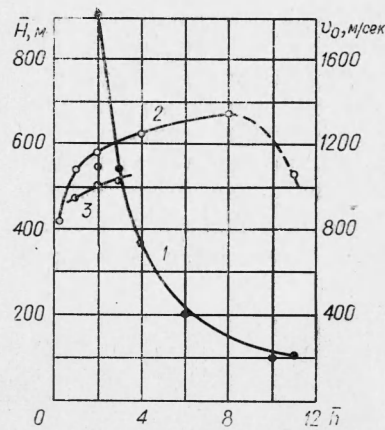


Рис. 3.

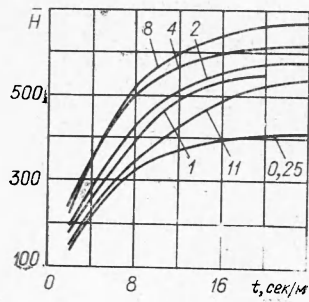


Рис. 4.

При $\bar{H}_* \geq 12$ экспериментальные данные можно описать зависимостью

$$\bar{D} = 48\bar{h}^{-0,17} + 3\bar{h}. \quad (3)$$

При взрывах зарядов весом от 100 до $2,5 \cdot 10^{-4}$ кг зависимость (3) подчиняется закону геометрического подобия, что позволяет по измеренному максимальному диаметру шейки султана определить энергию взрыва. Так, анализ данных [2] о взрыве показывает, что при начальной скорости подъема купола $v_0 = 760$ м/сек и максимальном диаметре шейки султана $\bar{D} = 610$ м, согласно зависимостям (1) и (3),

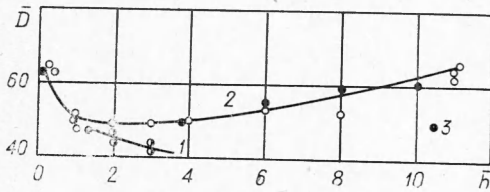


Рис. 5.

взрыв произведен на глубине $\bar{h} = 3,9$ при $\bar{D} = 50$, что соответствует взрыву заряда с тротильным эквивалентом $\bar{G} = 12 \cdot 10^6$ кг ($R_0 \approx 12,2$ м). Для сравнения на рис. 6, а, б [2] приведены фотографии развития купола в близких условиях — глубины зарядов $\bar{h} = 3$ и 3,9; глубины водоемов $\bar{H}_* = 4$ и 5 при взрыве зарядов 100 и $12 \cdot 10^6$ кг соответственно.

Некоторые осциллограммы поверхностных волн, зарегистрированных волнографами, приведены на рис. 7, а, б. На рис. 7, а показаны записи волнографов, установленных на расстояниях 7,5; 15,2; 30,85; 45,85 м от центра взрыва в водоеме глубиной $\bar{H}_* = 4$ при $\bar{h} = 3$. Осциллограмма на рис. 7, б относится к взрыву в водоеме с $\bar{H}_* = 2$ и $\bar{h} = 1$ при установ-

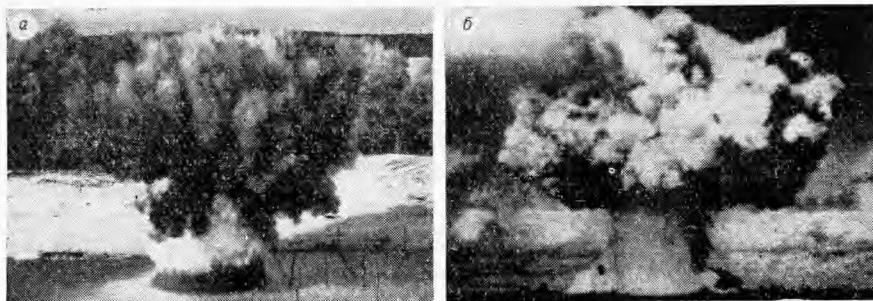


Рис. 6.

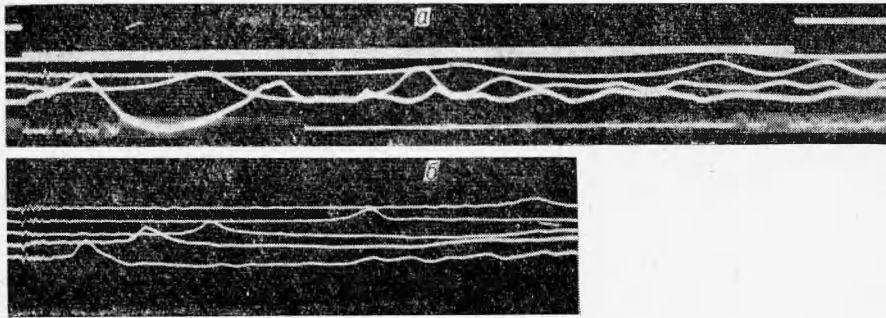


Рис. 7.

ке волнографов на расстояниях 8; 11,6; 15,3; 22,9 и 30,8 м. При обработке осциллограмм за период волн принимались временные интервалы между моментами прихода к датчику максимумов или минимумов волн. Скорость распространения волн определялась по времени прихода характерной точки волны (например, ее максимума) к каждому волнографу. Зависимости высоты волн от расстояния при взрыве в водоеме $\bar{H}_* = 4$ приведены на рис. 8. На рис. 8, а показана зависимость амплитуды \bar{A}_{1-} , отнесенной к радиусу заряда в минимуме первой волны от расстояния $R = R/R_0$. Как видно из графика, \bar{A}_{1-} не зависит от заглубления заряда.

На рис. 8, б показана зависимость суммарной высоты \bar{A}_1 (от максимума до минимума) первой волны от относительного расстояния ($\bar{H}_* = 4$) при взрывах на различной глубине. Суммарная высота A_1 при взрыве с $\bar{h} = 1$ примерно на 25% выше высоты первой волны при взрыве с $\bar{h} = 2$ и 3. На рис. 8, в приведены зависимости суммарных высот \bar{A}_1 ; \bar{A}_2 ; \bar{A}_3 первой, второй и третьей волн в функции расстояния ($H = 4$). При $\bar{R} \leq 55$ максимальной по суммарной амплитуде является первая волна, а минимальной — третья, если $55 \leq \bar{R} \leq 130$ — максимальна вторая волна, $\bar{R} \approx 130$ — амплитуды всех волн примерно одинаковы, и если $\bar{R} \geq 130$, то максимальной является третья волна.

При взрыве в водоеме $\bar{H}_* = 2$ ($\bar{h} = 1$), где наблюдается одна волна, зависимость $\bar{A}_1(\bar{R})$ приведена на рис. 8, б пунктиром. При взрыве в водоеме $\bar{H}_* = 12$ наблюдается большое количество следующих друг за другом волн. В диапазоне $\bar{R} \leq 40$ максимальной является первая волна, а при $40 \leq \bar{R} \leq 160$ происходит перегруппировка волн. С увеличением расстояния в этом диапазоне сначала максимальной становится вторая, а затем и третья волна. Зависимость суммарной высоты первой волны от относительного расстояния можно описать степенными эмпирически-

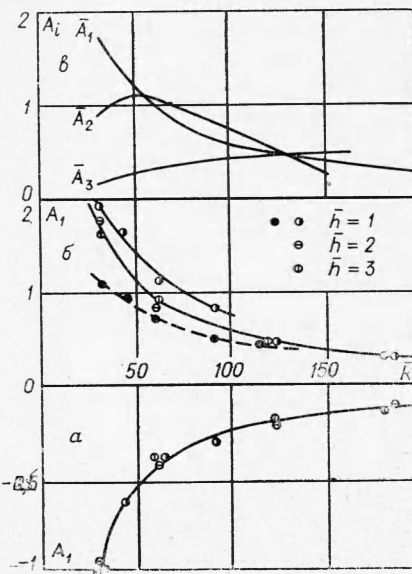


Рис. 8.

ми формулами:

$$\bar{A}_1 = 15,5 \bar{R}^{-0,75}; \quad \bar{H}_* = 2, \quad (4)$$

$$\bar{A}_1 = 68 \bar{R}^{-1}; \quad \bar{H}_* = 4; \quad \bar{h} = 1, \quad (5)$$

$$\bar{A}_1 = 57 \bar{R}^{-1}; \quad \bar{H}_* = 4; \quad \bar{h} = 2; \quad 3. \quad (6)$$

В водоеме $\bar{H}_* = 12$ зависимость от расстояния суммарной высоты для максимальной волны в комплексе такова:

$$\bar{A}_1 = 93 \bar{R}^{-1} \text{ при } 1 \leq h \leq 11. \quad (7)$$

Наблюдались значительные отклонения от этой зависимости при $\bar{h} = 2$ и 8 (до 30÷50%), причину которых установить не удалось.

Справедливость закона геометрического подобия для описания поверхностных волн при взрыве в мелком водоеме подтверждается данными взрыва в Бикини [2], где зависимость $\bar{A}_1(\bar{R})$ описывается формулой

$$\bar{A}_1 = 60 \bar{R}^{-1}. \quad (8)$$

При обработке данных [2] R_0 принято равным 12,2 м. В этом случае взрыв производился при $\bar{H}_* = 5,0$; $\bar{h} = 3,92$. Сравнение (8) с формулой (5), полученной при взрыве заряда весом 100 кг, показывает на их согласии в пределах $25 \leq \bar{R} \leq 150$ с точностью около 5%.

На больших расстояниях расхождение увеличивается, и при $\bar{R} = 300$ измеренная высота волны примерно на 12% выше рассчитанной по зависимости (8), что, видимо, связано с уменьшением глубины водоема.

Зависимость скорости распространения v_1 первого максимума от расстояния приведена в таблице. Там же для сравнения дана ее теоретическая величина $v_0 = [g(H+A)]^{1/2}$, где A — амплитуда первого максимума.

Взрыв в водоеме $\bar{H}_* = 12$ дает равные скорости v_1 и v_0 в пределах разброса экспериментальных данных во всем диапазоне расстояния. При взрыве в более мелких водоемах вблизи от центра взрыва скорости поверхностных волн несколько выше расчетных.

Длины волн определялись как произведение их периода на сумму скоростей распространения их максимума и минимума. Зависимости длин волн от расстояния с погрешностью около 10% можно описать эмпирическими формулами:

$$\text{при } \bar{H}_* = 12 \quad \bar{\lambda}_1 = 18 \bar{R}^{0,3}; \quad \bar{\lambda}_2 = 1,2 \bar{R}^{0,6}; \quad \lambda_3 = \bar{R}^{0,6};$$

$$\text{при } \bar{H}_* = 4 \quad \bar{\lambda}_1 = 10,5 \bar{R}^{0,33}; \quad \bar{\lambda}_{2,3} = 4,3 \bar{R}^{0,5}.$$

Поступила в редакцию
29/II 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Заонегин, Л. С. Козаченко, В. Н. Костюченко. ПМТФ, 1960, 2.
2. Действие атомного оружия. М., ИЛ, 1954.