

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ В МЕЛКОМ ВОДОЕМЕ

В. Н. Костюченко, Н. Н. Симонов

(Москва)

При подводном взрыве на небольшой глубине, например при подрыве льда на водоемах, существенное значение может иметь воздушная ударная волна.

Качественный анализ полученных еще в 1943 году на полутенеовой установке фотографии показал, что при выходе ударной волны в воде на свободную поверхность (граница раздела вода — воздух) образуется воздушная ударная волна, так называемая преломленная волна.

Как показали измерения, эта волна уже на небольших расстояниях от эпицентра взрыва (порядка $20-30 R_0$) имеет очень малую амплитуду и близка к акустической. В дальнейшем в работе преломленная волна не рассматривается.

В последующие, после взрыва, моменты времени водяная ударная волна и расширяющийся газовый пузырь, воздействуя на свободную поверхность, вызывают подъем слоя воды в виде купола. Поршневое действие поднимающегося вверх со значительной скоростью водяного купола вызывает появление в воздухе второй ударной волны, которая, как видно из фиг. 1, в начальной стадии примыкает к вершине купола и имеет форму, близкую к параболической. Такая волна не будет подчиняться закону распространения сферической ударной волны и не может быть описана трехчленной формулой М. А. Садовского [1]. При дальнейшем распространении параболическая форма волны будет постепенно приближаться к сферической.

Настоящая работа поставлена с целью экспериментального изучения основных параметров воздушной ударной волны при подводном взрыве в мелком бассейне.

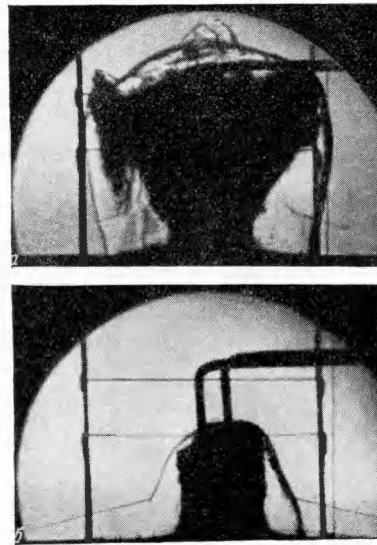
Экспериментальная часть. Работа делится на две части, одна из них была проведена на малых зарядах в лаборатории, а вторая — на водном полигоне с крупными зарядами.

Лабораторная часть работы охватывает область расстояний от 20 до $60 R_0$ (R_0 — радиус заряда) от центра заряда и проводилась на полутенеовой установке. В качестве бассейна использовался круглый стальной сосуд диаметром 300 мм и глубиной 92 мм, в который насыпался песок. Расстояние от верхнего края бассейна до песка оставалось постоянным во всех опытах и равнялось 12 мм ($4R_0$).

В бассейн наливалась вода вровень с верхним его краем. Заряд погружался в воду на заданную глубину. Таким образом дном во всех опытах служил водонасыщенный песок; толщина такой песчаной подушки до стального дна бассейна составляла 80 мм. Заряд брался сферический, прессованный из ТЭН. Вес заряда 0,17 г, плотность $1,5 \text{ г/см}^3$ и диаметр 6 мм. Иницирование осуществлялось при помощи пережигания током высокого напряжения (7—9 кВ) манганинового мостика, проходящего через центр заряда, где помещалось 10 мг флегматизированного азид свинца. Фотографировалась ударная волна в воздухе, распространяющаяся от заряда над поверхностью воды. Фотографирование производилось прибором СФР-2 (сверхскоростной фоторегистр-2, несколько видоизмененный конструктивно для использования совместно с полутенеовой установкой) в варианте лупы времени.

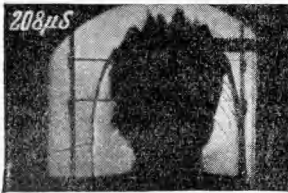
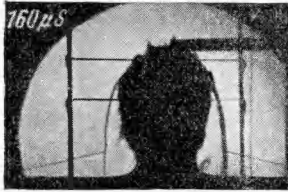
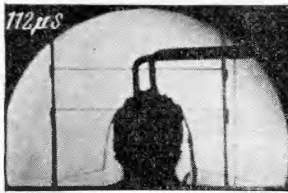
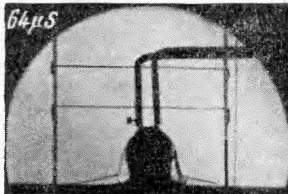
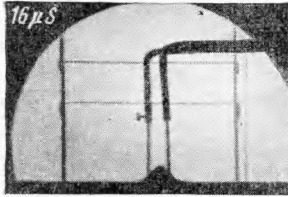
Частота съемки во всех опытах была постоянной и равной 125 000 кадров в секунду. Необходимая жесткая синхронизация всех стадий опыта — зажигание подсвечивающей искры, подрыв заряда и положение зеркала прибора СФР-2, обеспечивалось датчиком фоторегистра и управляемыми им специальными импульсными реле. Для каждой глубины погружения заряда ставилось 4 опыта. Всего исследовалось 4 глубины погружения заряда: $H = 0$ (половина заряда над поверхностью воды), $H = 1R_0$ (заряд весь погружен в воду и касается ее поверхности), $H = 2R_0$ и $H = 3R_0$. На фиг. 2 даны фотографии распространения ударной волны над поверхностью воды.

Полигонные опыты были проведены под руководством Л. С. Козаченко. Бассейн с песчаным дном имел размеры $85 \times 20 \text{ м}$. Глубина бассейна составляла $1 \text{ м} = 4R_0$. Заряд имел сферическую форму и приготавлился из литого тротила плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$. Вес заряда равнялся 100 кг. В качестве регистрирующей аппаратуры исполь-



Фиг. 1. Полутенеовые фотографии взрыва заряда ТЭН весом 0,17 г: а) на глубине, равной одному радиусу заряда; б) на глубине 3 радиуса заряда. Время 160 мкс от момента взрыва

зовалась специально разработанная двухканальная установка ПИД-9 (пьезоэлектрический измеритель давления-9). Эта установка дает возможность получать запись изменения давления в ударной волне во времени. В качестве датчиков использовались кварцевые ножевые датчики.



Результаты опытов и их обсуждение. Полученные на полутеневой установке снимки обмерялись на проекционном аппарате. В результате обработки данных обмера были построены кривые зависимости скорости распространения ударной волны над поверхностью воды от расстояния оси, проходящей через центр заряда. На фиг. 3 приведены кривые зависимости $D = \dot{D}(R)$, построенные по большому количеству точек.

Были проведены отдельные опыты по определению активного заряда с парафиновой оболочкой при взрыве в воздухе. В результате опытов было получено, что заряд в такой оболочке «работает» практически без химических потерь, активная энергия равна 0,220 кал, что составляет 0,164 г ТЭН или 0,218 г ТНТ.

Основными параметрами ударной волны в полигонных опытах принимались избыточное давление на фронте волны Δp и импульс положительной фазы давления I . На фиг. 4 графически представлены обобщенные результаты опытов на теплеровской установке и на полигоне в виде кривых зависимостей давления на фронте ударной волны от приведенного расстояния $h = R/R_0$.

Пунктирная кривая — наземный взрыв такого же заряда в воздухе. При рассмотрении экспериментальных кривых на фиг. 4 необходимо отметить следующее:

1. Экспериментальные кривые, отражающие зависимость $\Delta p = \Delta p(h)$ воздушной ударной волны, образующейся при подводном взрыве в мелком бассейне, совершенно не подобны кривой $\Delta p = \Delta p(h)$ воздушной ударной волны при наземном взрыве заряда в воздухе вплоть до исследованных расстояний от центра взрыва ($h = 140$) и поэтому не могут быть аппроксимированы общеизвестной формулой для наземного взрыва.

2. Характер затухания волны с расстоянием для всех четырех экспериментальных кривых (соответствующих 4 глубинам погружения заряда H) различен. Это обстоятельство лишает возможности выразить их одной экспериментальной формулой.

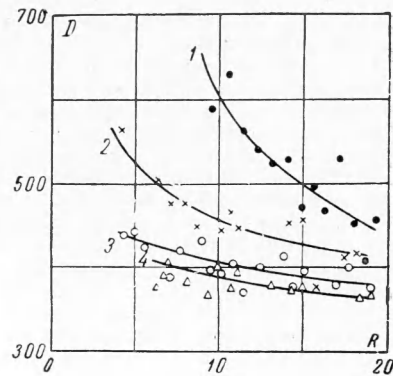
Фиг. 2. Полутеневая фотография взрыва заряда ТЭН весом 0,17 г на глубине, равной $2R_0$

Величина импульса на исследованных расстояниях значительно меньше, чем импульс от наземного взрыва заряда в воздухе. Как и в случае давления Δp , наблюдается более слабое затухание импульса с расстоянием по сравнению с наземным взрывом.

Сравнение осциллограмм ударных волн при различных глубинах погружения с осциллограммой ударной волны от взрыва заряда в воздухе в свободном пространстве приводится на фиг. 5.

Таким образом воздушная ударная волна при подводном взрыве в мелких водоемах обладает рядом существенных особенностей по сравнению со взрывом в воздухе.

Фиг. 3. Зависимость скорости воздушной ударной волны D м/сек от расстояния R см при разных глубинах погружения заряда. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям $H = 0, 1, 2, 3$



Эти особенности можно объяснить, представив следующую схему образования воздушной ударной волны. Отражение ударной волны в воде от свободной поверхности вы-



зывает подъем с большой скоростью слоя воды, причем начальная скорость подъема поверхности спадает с расстоянием от эпицентра [2]. Движение масс воды встречает сильное сопротивление окружающего воздуха. В результате образуется ударная волна, прилегающая к верхней части поднимающегося купола. Таким образом поднимающийся купол является источником воздушной ударной волны, подобно тому, как летящее с большой скоростью твердое тело образует расходящуюся коническую ударную волну, интенсивность

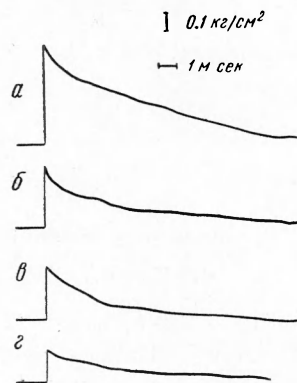
Фиг. 4. Зависимость избыточного давления Δp кг/см² в воздушной ударной волне от приведенного расстояния $h = R/R_0$ для разных глубин погружения заряда (данные полигонных опытов отмечены точками) кривые и точки 1, 2, 3, 4 соответствуют глубинам погружения заряда $H=0, 1, 2, 3$. Пунктирная кривая — наземный взрыв заряда в воздухе

которой Δp , как известно, падает с расстоянием от оси R по закону $\Delta p \sim R^{-0.75}$.

На фиг. 6 в логарифмическом масштабе нанесены экспериментальные кривые для различных глубин погружения заряда. Пунктирная кривая — наземный взрыв. Для сравнения на рис. 6 нанесена прямая с показателем степени, равным — 0,75.

Как видно из фиг. 6, наклоны кривых 2, 3 и 4 близки к наклону этой прямой. Кривая 1 соответствует взрыву полупогруженного заряда и занимает промежуточное положение между кривой наземного взрыва и прямой с показателем степени 0,75, т. е. в этом случае принятая схема образования ударной волны не описывает явления.

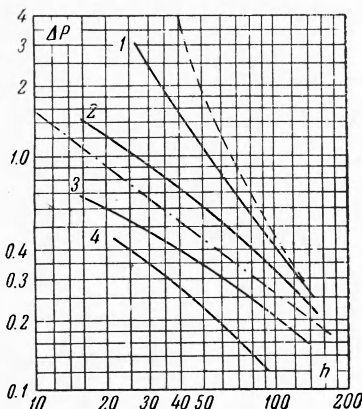
Нужно отметить, что принятая аналогия очень упрощает явление. В действительности скорость ку-



Фиг. 5. Осциллограммы ударных волн: а) взрыв заряда в воздухе в свободном пространстве, $h = 71$; то же в воде; б) $H = 1, h = 105$; в) $H = 2, h = 82$; г) $H = 3, h = 67$

пола не постоянна, а все время падает. Кроме того, купол расширяется, что приводит к дополнительному увеличению интенсивности ударной волны.

В силу того, что скорость купола все время падает, ударная волна начинает обгонять купол, начиная с некоторого момента времени. Момент отрыва волны можно оценить примерно как момент достижения куполом скорости звука в воздухе. Этот момент достигается, когда высота купола составляет около 40—50 R_0 . Поэтому можно ожидать, что на расстояниях $h \approx 40—50$ закон затухания Δp от расстояния будет бли-



Фиг. 6. Зависимость избыточного давления Δp кг/см² в воздушной ударной волне от приведенного расстояния $h = R/R_0$ для разных глубин погружения заряда; кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям $H = 0, 1, 2, 3$; пунктирная кривая — наземный взрыв заряда в воздухе

зок к цилиндрическому. На больших расстояниях находится переходная область от цилиндрического к сферическому закону затухания Δp с расстоянием. Из фиг. 6 видно, что при $h = 80—100$ наблюдается изменение наклона кривых в сторону приближения к сферической зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский, Физика взрыва, Изд-во АН СССР, № 1, 1952.
2. Коул Р. Подводные взрывы. И. Л., 1950.

Поступила
18 I 1960