

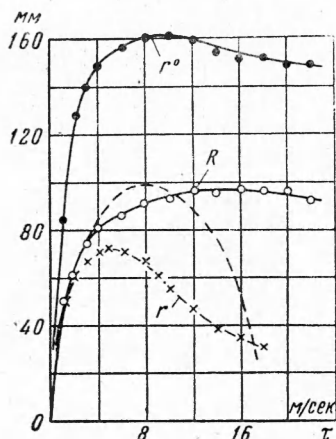
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ И СУЛТАНА ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ

В. Л. Заонегин, Л. С. Козаченко, В. Н. Костюченко

(Москва)

В работе приводятся некоторые результаты экспериментального исследования совместного развития султана и газового пузыря, образующихся при взрывах вблизи свободной поверхности воды, а также проверка возможности моделирования поверхностных явлений при взрывах крупных зарядов взрывами зарядов малого веса в условиях лаборатории.

Установка, на которой проводились опыты, состояла из бака с водой и кинокамеры СКС-1, при помощи которой через смотровые окна фотографировались султан и пузырь одновременно. Частота съемки составляла примерно 1000 кадров/сек. Заряды сферической формы прессовались из ТЭНа. В центр заряда помещалась небольшая навеска азиды свинца. Взрыв инициировался пережиганием тонкой манганиновой проволоки, проходящей через центр заряда. Вся синхронизация осуществлялась от специального пульта управления. Вес тэнового заряда равнялся 0.2 г, что в пересчете в тротил дает 0.256 г. Радиус такого тротилового заряда $R_0 = 3.36$ мм. Основными параметрами считались: R — радиус пузыря, r — радиус шейки султана, r^0 — радиус основания султана.



Фиг. 1. Зависимость радиуса r шейки и радиуса r^0 основания султана и радиуса R пузыря от времени. Глубокий бассейн, глубина погружения заряда $h = 1.3 R_0$. Пунктиром нанесена глубоководная пульсация пузыря

1. Для сравнения с имеющимися в литературе данными были проведены опыты со взрывом заряда в безграничной жидкости.

В этих опытах наблюдались хорошо известные пульсации газового пузыря. Максимальный радиус первой пульсации пузыря R_{\max} хорошо описывается эмпирической зависимостью [1,2]

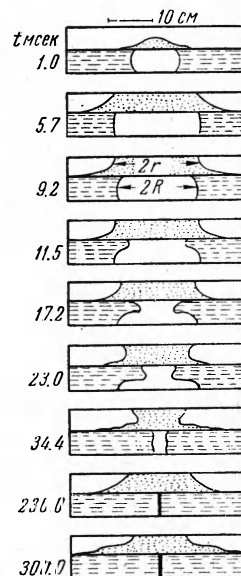
$$R_{\max} = 157 \sqrt[3]{\frac{G}{\rho_0}}$$

Здесь R_{\max} — радиус пузыря в см, G — вес заряда в кг, ρ_0 — гидростатическое давление в атм.

2. Во второй серии опытов изучалось влияние дна водоема на пульсацию газового пузыря. Из этих опытов следует, что при небольшом удалении заряда от дна (до $10R_0$) первую, основную пульсацию пузыря можно описать пульсацией от заряда удвоенного веса. Так, например, хорошо сохраняется полусферическая форма, а максимальный радиус пузыря при первой пульсации увеличи-

вается примерно в $\sqrt[3]{2} \approx 1,25$ раза. При последующих пульсациях наблюдается расползание пузыря по дну.

Фиг. 2. Схемы по кинокадрам совместного развития пузыря и султана в глубоком бассейне. Глубина погружения заряда $h = 11 R_0$. Цифрами около кадров указано время с момента взрыва в мсек

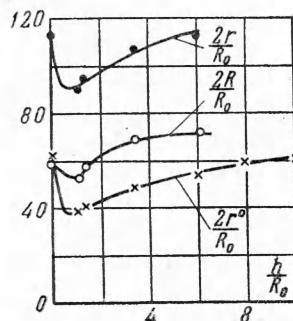


3. В третьей серии опытов заряд взрывался вблизи свободной поверхности воды на глубинах от $1R_0$ до $10R_0$. Дно водоема было достаточно глубоко ($\sim 200R_0$), так что влиянием его можно было пренебречь. Один из графиков этой серии опытов представлен на фиг. 1, глубина погружения заряда $h = 1.3 R_0$. Как видно из этой фигуры, величина радиуса шейки султана r и радиуса его основания r^0 имеют максимум, причем этот максимум достигается за время, близкое к полупериоду пульсации газового пузыря в безграничной жидкости, которая нанесена пунктирной линией.

Газовый пузырь достигает некоторого наибольшего размера примерно за это же время, но фазы сжатия нет. Это можно объяснить видимо тем, что давление внутри газового пузыря выравнивается через отверстие в поверхности воды до атмосферного.

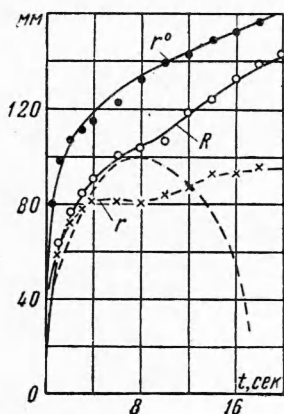
Наглядно видно совместное развитие султана и газового пузыря на приведенных (фиг. 2) кинокадрах. Глубина погружения заряда составляла $11R_0$. Можно отметить, что к моменту достижения султаном своих максимальных размеров (~ 10 мсек) пузырь заметно утонул. Скорость погружения пузыря тем больше, чем ближе находился заряд у поверхности воды, и составляет для $h = 1,08 R_0$ примерно 2 м/сек. Можно отметить, что уменьшение размеров султана в последующие моменты времени, видимо, связано с отходом пузыря от поверхности воды.

Фиг. 3. Зависимости максимальных размеров радиуса шейки r и радиуса основания r^0 султана, а также радиуса R пузыря, отнесенных к R_0 , от глубины погружения заряда h/R_0 в глубоком бассейне; на фигуре следует поменять местами r и r^0 .



На фиг. 3 представлены зависимости максимальных размеров пузыря и султана от глубины погружения заряда h/R_0 . Как видно из этой фигуры, наблюдается рост размеров султана после $h = 1R_0$. Нужно отметить, что радиус основания султана r^0 оказался довольно неудобным параметром, так как основание очень плавно смыкается с невозмущенной поверхностью воды, и поэтому определять его на опыте трудно. Более удобным параметром султана является радиус шейки султана r .

4. Основная серия опытов относится к взрывам в мелких водоемах. Были выбраны



три водоема с глубинами $H/R_0 = 4, 8, 12$. Один из графиков этой серии опытов представлен на фиг. 4. Глубина бассейна $H/R_0 = 8$, глубина погружения заряда $h/R_0 = 6R_0$. Как видно из этой фигуры, размеры газового пузыря и размеры султана непрерывно растут. Однако можно выделить основную стадию развития, которая по времени примерно совпадает с периодом глубоководной пульсации пузыря, нанесенной на графике пунктирной линией. Дальнейший рост размеров султана происходит с меньшими скоростями и на него все больше накладывается стадия обрушения.

Фиг. 4. Зависимость размеров радиуса шейки r и радиуса основания r^0 султана, а также радиуса R пузыря от времени. Глубина бассейна $H = 8 R_0$, глубина погружения заряда $h = 6 R_0$. Пунктиром нанесена глубоководная пульсация пузыря

Такой непрерывный рост размеров султана связан, видимо, с тем, что газовый пузырь в мелком бассейне не тонет. Если учесть, что и здесь происходит выравнивание давления в газовой полости до атмосферного, то становится понятным, что размеры ее в силу перераспределения импульса взрыва на узкий слой воды, будут непрерывно расти. Это хорошо видно из схем кинокадров, представленных на фиг. 5. Глубина бассейна $H/R_0 = 12$, глубина погружения заряда $h/R_0 = 6$. Цифрами около кадров указано время в мсек с момента взрыва.

Как видно из фиг. 5, султан начинает оседать, непрерывно увеличиваясь в размерах. Размеры пузыря непрерывно растут и выходят за границы кадра. На поздних кадрах видно образование поверхностных волн. В дальнейшем происходит не схлопывание пузыря, как принято иногда считать, а заполнение пузыря обрушающимся султаном.

На фиг. 6 показаны зависимости размеров султана, достигнутые за время основной стадии развития, от глубины бассейна H/R_0 и глубины погружения заряда h/R_0 . Как видно из графиков, наблюдается более слабая зависимость размеров султана от h/R_0 . В то же время наблюдается рост размеров султана при увеличении глубины бассейна, начиная с $H = 4 R_0$.

В каждом из серии опытов проводились взрывы полупогруженных зарядов и взрыв над поверхностью воды. В этих опытах также образуется султан и газовый пузырь. Зависимость радиуса султана и радиуса пузыря значительно отличаются от аналогичных зависимостей при подводных взрывах. Рост всех радиусов происходит со значительно меньшими скоростями, причем, как правило, нельзя выделить основной стадии развития.

5. Полученные данные дают возможность оценить количество выброшенной воды или водность султана в мелком бассейне. Можно считать, что после окончания основной стадии развития масса султана равняется объему газового пузыря, умноженному на плотность воды. Как следует из опытов, радиус пузыря к этому моменту составляет примерно $34 R_0$. Эта величина слабо зависит от глубины водоема и глубины погружения заряда. Тогда масса султана

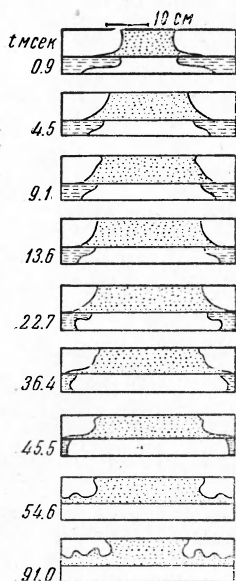
$$m \approx \rho \pi R^2 H$$

Здесь ρ — плотность воды, H — глубина бассейна.

Выразив все величины в радиусах заряда, получим окончательно

$$m \approx 540 G H / R_0 \quad (G — \text{вес заряда})$$

Проведенная оценка является приближенной и дает верхний предел определяемой величины. Кроме того, надо учесть, что основная масса выброшенной воды находится в основании султана.



Фиг. 5. Схема по кинокадрам совместного развития пузыря и султана. Глубина бассейна $H = 12 R_0$, глубина погружения заряда $h = 6 R_0$. Цифрами около кадров указано время с момента взрыва в мсек

6. Как уже говорилось выше, одной из основных задач нашей работы была проверка возможности моделирования поверхностных явлений при взрывах крупных зарядов взрывами зарядов малого веса в условиях лаборатории. Для сравнения были использованы наблюдения в натуре над взрывами, у которых отношение весов зарядов G_1 и G_2 , отношение радиусов зарядов R_{01} и R_{02} были равны

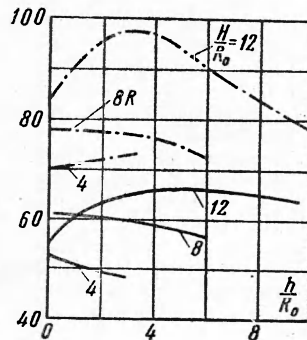
$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{100 \text{ кг}}{2.56 \cdot 10^{-4} \text{ кг}} \approx 400.000, \quad \frac{R_{01}}{R_{02}} = 74$$

Из этих наблюдений были получены зависимости радиуса шейки r / R_0 султана от времени при разных глубинах погружения заряда h / R_0 и глубинах водоема H / R_0 . Сравнение проводилось не только по максимальным размерам, но был исследован также и временной ход. В качестве масштаба времени был выбран период пульсации пузыря при глубоководном взрыве T сек, и так как численно $T \text{ сек} \sim R_0 \text{ м}$, в качестве безразмерного времени была принята величина t / R_0 [сек/м].

На фиг. 7 и 8 представлено сравнение развития радиуса шейки r султана, огнесенного к R_0 , во времени t / R_0 , также отнесенного к R_0 для зарядов различного веса. Нужно отметить, что хорошее согласие наблюдается за время основной стадии развития, о которой говорилось раньше. Дальнейший ход кривых различается, так как там начинается стадия разрушения султана, которая обусловлена в основном силой тяжести, и поэтому моделирование по R_0 нарушается.

7. В настоящее время известны довольно обширные результаты наблюдений в натуре, а также результаты экспериментов по подъему купола, образованного в начальной стадии при подводном взрыве.

Фиг. 6. Радиусы шейки (сплошные кривые) и радиусы основания султана (пунктирные кривые), отнесенные к R_0 , в зависимости от глубины погружения заряда h / R_0 для некоторых глубин водоема H / R_0



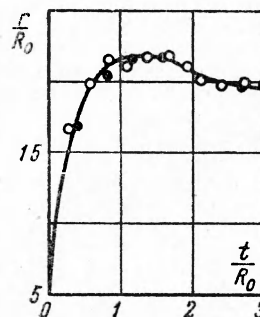
Однако, как правило, полученные экспериментальные кривые зависимостей высоты центральной точки купола от времени используются только для определения начальной скорости подъема V_0 . Имеющийся экспериментальный материал по V_0 показывает, что эта величина довольно хорошо моделируется и зависит только от отно-

сительной глубины погружения заряда h/R_0 . Рассмотрение дальнейших моментов времени может дать ряд дополнительных данных о механизме образования купола.

На фиг. 9 приведены зависимости высоты подъема центральной точки купола H , отнесенной к радиусу заряда R_0 , от времени, отнесенного также к R_0 , для различных глубин погружения заряда h/R_0 . Цифрами около кривых показаны глубины погружения заряда h/R_0 . Как видно из фигуры, все экспериментальные кривые могут быть описаны зависимостью одного вида

$$\frac{H}{R_0} = A \ln \left(1 + B \frac{t}{R_0} \right) \quad (7.1)$$

Фиг. 7. Зависимость радиуса шейки султана r/R_0 от времени t [сек], отнесенного к R_0 [м], для различных весов заряда. Глубина погружения заряда $h = 3R_0$, глубина бассейна $H = 4 R_0$; светлые точки для $G_1 = 0,256$ г, темные — для $G_2 = 100$ кг.

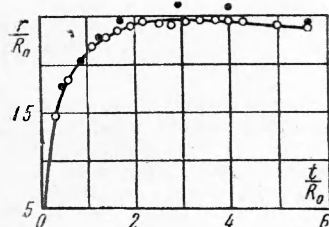


где t — в сек, R_0 — в м, величины A и B зависят от h/R_0 . Зависимость такого вида легко может быть получена из простых предположений. Можно себе представить, что в результате взрыва слой воды на поверхности получает некоторую начальную скорость, после чего поднимающийся купол будет тормозиться в основном за счет сопротивления воздуха. Уравнение движения единицы поверхности центра купола можно записать следующим образом:

$$-m \frac{dV}{dt} = c \rho_0 V^2 \quad (7.2)$$

где m — масса слоя воды на единицу поверхности купола, c — коэффициент сопротивления, примерно равный единице, ρ_0 — плотность воздуха.

Поделив (7.2) на $m = \rho \Delta$, где ρ — плотность воды, Δ — толщина слоя воды, и поделив затем знаменатели на R_0 , получим:



$$-\frac{dV}{d(t/R_0)} = \frac{\rho_0}{\rho} \frac{V^2}{\Delta/R_0}$$

Фиг. 8. Зависимость радиуса шейки султана r/R_0 от времени t [сек], отнесенного к R_0 [м]. Глубина погружения заряда $h = 8 R_0$, глубина бассейна $H = 12 R_0$; светлые точки для $G_1 = 0,256$ г, темные — для $G_2 = 100$ кг.

Интегрирование этого уравнения при начальных условиях $H = 0$ и $V = V_0$ дает

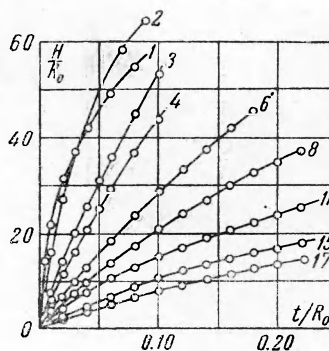
$$\frac{H}{R_0} = \frac{\Delta \cdot \rho}{R_0 \cdot \rho_0} \ln \left(1 + \frac{V_0}{(\Delta/R_0) (\rho/\rho_0)} \frac{t}{R_0} \right) \quad (7.3)$$

Сравнение уравнения (7.2) с эмпирическими зависимостями дает

$$A = \frac{\Delta \cdot \rho}{R_0 \cdot \rho_0}, \quad B = \frac{V_0}{(\Delta/R_0) (\rho/\rho_0)}$$

Сравнение вычисленных таким образом начальных скоростей подъема купола V_0 с определенными непосредственно из эксперимента дало хорошее согласие.

Фиг. 9. Зависимость высоты подъема центральной точки купола H , отнесенной к R_0 , от времени, отнесенного к R_0 . Цифрами возле кривых показана глубина погружения заряда h/R_0



Величина Δ/R_0 , оцененная таким образом, растет с увеличением h/R_0 и равна для $h = 1 \cdot R_0$ примерно 0.02. Образование такого тонкого слоя воды можно объяснить тем, что взаимодействие ударной волны и волны разрежения откалывает слой воды

и сообщает ему начальную скорость. Рассмотрение такого взаимодействия в акустическом приближении дало величину слоя, примерно на порядок меньшую, чем определенную по зависимости (7.1).

Расхождение может быть объяснено тем, что акустическое приближение, видимо, неверно. Кроме того, возможен ряд отколов, так что в результате общий слой может быть значительно больше, чем отдельные. Вообще нужно отметить, что взаимодействие ударной волны с поверхностью особенно для малых h/R_0 , слабо изучено, так же как и вопрос о кавитации воды. Нужно отметить, что в действительности на торможение купола оказывает влияние сила тяжести, а также возможная разность между давлением внутри купола и атмосферным давлением. Однако, можно ограничиться рассмотрением только тех случаев, когда скорость подъема купола достаточно велика. Оценка показывает, что принятая схема торможения купола верна для глубин погружения заряда $h \leq 6R_0$. При этом влияние силы тяжести начинает сказываться для зарядов значительного веса.

В заключение нужно отметить, что весь приведенный расчет носит оценочный характер.

Поступила
12 V 1959

ЛИТЕРАТУРА

1. Коул Р. Подводные взрывы. ИИЛ, 1959.
2. Отчет по исследованию процесса образования газового пузыря. Отдел технической информации, перевод № 250—251.

ПАРАМЕТРЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДОВ ИЗ ТЭН МАЛОГО ВЕСА

Б. Д. Христофоров

(Москва)

Для изучения масштабных эффектов при моделировании приводятся некоторые результаты исследования параметров подводного взрыва сферического заряда ТЭН малого веса (от 0.2 до 1.0 г).

В работе производились измерения давления p (атм) во фронте ударной волны, постоянной времени спада давления за фронтом волны θ (мксек), удельного импульса ударной волны I (кгсек/м²).

Кроме этого, исследовалось расширение газового пузыря при его первой пульсации.

1. Описание экспериментов. Опыты проводились в стальном баке с водой размером $1.5 \times 1.5 \times 1.0$ м³, имеющем смотровые окна из оптического стекла, через которые осуществлялось покадровое фотографирование пульсации газового пузыря на движущуюся пленку.

Измерение параметров ударных волн производилось с помощью турмалиновых датчиков с диаметром чувствительного элемента от 1 до 3 мм.

Тарировка датчиков осуществлялась взрывом. При этом сравнивались показания исследуемых индикаторов с протарированными ранее при взрыве тротила. Для записи сигнала от индикатора применялись осциллографические установки ПИД-9, разработанные в ИХФАН СССР. Верхняя граничная частота измерительного тракта прибора 300 кГц.

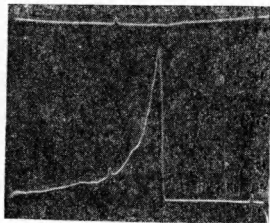
Заряд ВВ помещался посередине бассейна на расстоянии 300 мм от свободной поверхности воды при измерении параметров ударной волны и на расстоянии 170 мм при фотографировании пузыря.

Такое расположение заряда позволяло надежно определять параметры ударной волны в диапазоне $0.065 \leq$

$\leq G^{1/3}/L \leq 0.65$, где G — вес заряда в кг, L — расстояние от заряда до точки измерения в м.

2. Заряды. Заряды, которыми пользовались при проведении опытов, изготовлялись из ТЭН прессованием до плотности 1.6 г/см³.

Детонатором служила навеска азида свинца, помещенная в центре заряда весом около 5% от полного. В качестве промежуточного детонатора применялся порошкообраз-



Фиг. 1