

## ЛИТЕРАТУРА

1. A. W. Campbell, W. C. Davis, J. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 4, 4.
2. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов и др. Докл. АН СССР, 1966, 167, 3.
3. F. E. Walker, R. J. Wasley. Combust. and Flame. 1970, 15, 3.
4. В. Hayes. Electrical measurements in reaction zone of high explosives. Tenth Sympos. (Internat.) on Combustion, Combustion Inst., Pittsburgh, 1964.
5. В. В. Якушев, С. С. Набатов, О. Б. Якушева. ФГВ, 1974, 10, 4, 583.
6. Compendium of shock wave data. Univ. Calif., vol. II.
7. В. В. Якушев, С. С. Набатов, А. Н. Дремин. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
8. В. В. Левин, Е. А. Овсян, В. И. Овчинников. ЖФХ, 1971, 45, 9.
9. А. Н. Дремин, А. Н. Михайлов. ФГВ, 1973, 9, 3.
10. В. В. Скорчеллетти. Теоретическая электрохимия. Л. «Химия», 1970.
11. F. C. Lysne, D. R. Hagedsty. J. Chem. Phys., 1973, 59, 12.
12. E. L. Lee, R. H. Sanborn, H. D. Stromberg. Thermal decomposition of high explosives at static pressure 10—50 kilobars. Proceedings Fifth Sympos. (Internat.) on Detonation, Office of naval research — Department of the navy, Arlington, 1970.
13. Г. Фрелих. Теория диэлектриков. М., ИЛ, 1960.
14. О. А. Осипов, В. И. Минкин, А. Д. Гарновский. Справочник по дипольным моментам. М., «Высшая школа», 1971.

УДК 627.74.001.5

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОВЫХ ПОЛОСТЕЙ ОТ ВЗРЫВА СФЕРИЧЕСКИХ И УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ ПОД ВОДОЙ

*В. С. Перехвальский, А. Н. Салов, Г. В. Ставер*

Как известно [1—4], при подводных дноуглубительных работах и в строительстве направленные взрывы создаются благодаря разновременному взрыванию системы зарядов в определенной последовательности [1—4]. При этом проблема оптимального размещения зарядов и выбора интервала замедления имеет первостепенное значение как для разрушения пород, так и для направленного их перемещения.

В данной работе рассматриваются подводные направленные взрывы. Точный расчет времени замедления и соответствующего ему оптимального расстояния между зарядами затрудняется вследствие сложности картины движения при взрывах на ограниченной глубине, где сказывается влияние двух граничных поверхностей: жесткого дна и свободной поверхности. Делается попытка на основе модельных исследований изучить физическую картину взаимодействия газовых полостей от взрывов сосредоточенных и удлиненных зарядов в воде (при ограниченной глубине) и влияние различных факторов на эффект направленности.

#### Исследование взаимодействия сферических газовых полостей

Новосибирским институтом инженеров водного транспорта совместно с Институтом гидродинамики СО АН СССР были проведены обширные модельные исследования. Вместо ВВ использовалась медная проволочка длиной 7 мм и диаметром 0,1 мм, электровзрыв которой осуществляется с помощью мгновенного разряда батареи конденсаторов емкостью 0,5÷1,5 мкФ и напряжением 16 кВ.

Процесс взрыва фиксировался сверхскоростным фоторегистратором (СФР) со скоростью съемки от 10 до 300 тыс. кадров в секунду.

Модельные взрывы производились на жестком и на песчаном дне. Подробное описание установки приведено в [3].

**Взрыв сферического заряда при ограниченной глубине.** В данном случае ставится задача о взрыве полусферического заряда, расположенного на жестком дне, которая, как было показано, может быть заменена задачей о взрыве сферического заряда удвоенной мощности. С этой целью была проведена серия опытов с взрывающимися проволочками на жестком дне и по середине достаточно большого объема жидкости. Измерялись максимальный радиус газового пузыря и полупериод пульсации. Точность измерения составляла 1—2%.

Анализ результатов показал, что при подводном взрыве сосредоточенного заряда на жестком дне хорошо сохраняется полусферическая форма пузыря; его максимальный радиус при первой пульсации увеличивается в  $\sqrt[3]{2} \approx 1,25$  раза по сравнению со взрывом при отсутствии влияния дна.

Таким образом, взрыв сосредоточенного заряда на жестком дне приближенно может рассматриваться как взрыв удвоенного заряда в безграничной среде. Для расчета параметров газового пузыря при взрыве на жестком дне могут быть использованы расчетные формулы для параметров газового пузыря в безграничной среде [5], если в указанные формулы подставить удвоенную энергию заряда. Полученные выводы подтверждают сделанные ранее в работе [6].

По аналогии с подводными взрывами зарядов ВВ [5] при электровзрыве в ударной волне излучается та же часть энергии, а остальная переходит во внутреннюю энергию пузыря и совершает работу против сил гидростатического давления. При достижении газовым пузырем максимального размера

$$Y = \frac{4\pi}{3} R_m^3 p_0, \quad (1)$$

где  $Y = \beta E$  — энергия, затраченная на расширение газового пузыря до своего максимума ( $E$  — энергия взрыва,  $\beta$  — доля энергии, оставшаяся в пузыре после излучения ударной волны и потерь в электрической цепи);  $R_m$  — максимальный радиус газового пузыря в период его первой пульсации;  $p_0$  — гидростатическое давление на глубине взрыва.

Оценка по (1) дает при подводном электровзрыве на жестком дне  $Y = 1,01$  кГм, что составляет 15,5% от энергии электровзрыва ( $E = 6,5$  кГм).

Для исследования влияния свободной поверхности на развитие газового пузыря при электровзрыве на ограниченной глубине была произведена серия одиночных взрывов на жестком дне на глубине 5, 10, 20, 30, 40, 80 — 250 мм. По результатам опытов были построены зависимость радиуса газового пузыря от времени  $R = f(t, H)$  (рис. 1) и зависимость полупериода пульсации газового пузыря от глубины воды в месте взрыва  $\frac{T}{2} = f(H)$  (рис. 2).

При проведении экспериментов удалось установить, что пульсации газового пузыря наблюдаются даже при глубинах, в 2—8 раз меньших его максимального радиуса; поднимающийся купол воды не дает прорываться газам наружу и пузырь пульсирует, не прорываясь в атмосферу. Рис. 1 и 2 показывают, что наличие свободной поверхности не оказывает заметного влияния при глубине воды 80 мм и больше. При этом газовый пузырь имеет четко выраженную полусферу с максимальным радиусом  $R_m = 36,5$  мм и полупериодом пульсации 2,54 мс. Таким образом, можно сделать вывод, что взрывы на глубине, превышающей максимальный радиус газового пузыря вдвое и более, можно рассматривать как взрывы в безграничной жидкости.

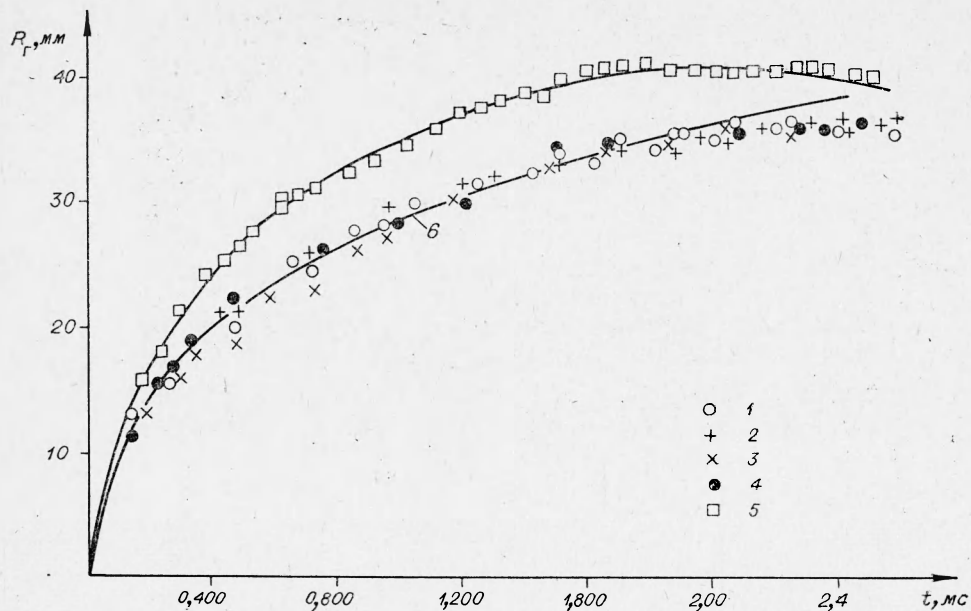


Рис. 1. Развитие газового пузыря во времени при подводном электровзрыве ( $E=6,5$  кГм).  
Глубина, мм: 1 — 80; 2 — 100; 3 — 120; 4 — 250; 5 — 5; 6 —  $R = \left(\frac{2\beta E}{\rho_0}\right)^{0,2} t^{0,4}$ .

Первая пульсация газового пузыря в интервале  $0 < t < \frac{T}{3}$  хорошо описывается формулой, предложенной Л. И. Седовым [7], для точечного взрыва в несжимаемой жидкости (см. рис. 1); при этом должна быть введена двойная энергия пузыря, учитывающая наличие жесткого дна:

$$R = \left(\frac{2\beta E}{\rho_0}\right)^{0,2} t^{0,4}, \quad (2)$$

где  $\beta E$  — энергия, оставшаяся в пузыре после излучения ударной волны и потерь в электрической цепи (из эксперимента  $\beta=0,155$ );  $\rho_0$  — плотность воды;  $t$  — время.

При  $H < R_m$  свободная поверхность оказывает влияние на развитие газового пузыря и тем существеннее, чем меньше глубина воды в месте взрыва. При этом нарушается сферичность газового пузыря и последний несколько вытягивается в сторону свободной поверхности; максимальный радиус увеличивается, а полупериод первой пульсации сокращается.

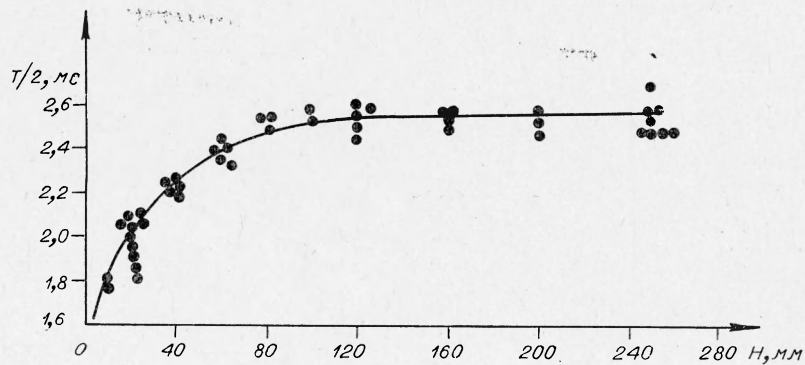


Рис. 2. Зависимость полупериода пульсации газового пузыря от глубины в месте взрыва.

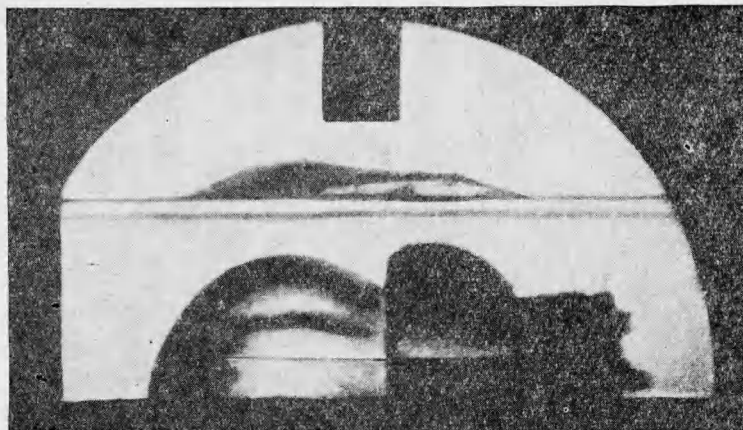


Рис. 3. Взаимодействие газовых полостей при двойном электровзрыве на жестком дне при  $H=50$  мм (энергия взрыва 6,5 кГм, интервал замедления 0,676 мс, расстояние между зарядами 30 мм).

Для выявления нарушения сферичности газового пузыря была построена кривая зависимости коэффициента сферичности от относительной глубины в месте взрыва. Коэффициент сферичности для глубин, больших максимального радиуса, определялся как отношение высоты пузыря к его радиусу в период максимального расширения; для глубин  $< R_m$  — как отношение высоты пузыря к его радиусу в момент достижения последним свободной поверхности. Анализ рис. 3 показывает, что сферичность пузыря начинает нарушаться при  $\frac{H}{R_m} < 2$ , т. е. с момента начала влияния свободной поверхности.

Исследование нарушения сферичности для глубин  $< R_m$  показало, что влияние свободной поверхности начинает сказываться лишь при достижении границей пузыря 65% глубины в месте взрыва. С этого момента начинается постепенное вытягивание газового пузыря в сторону свободной поверхности, при этом увеличение радиуса в этом направлении не превысило 6÷15%.

**Взаимодействие двух сферических зарядов** (двойной взрыв) осуществлялось за счет их одновременного взрывания под водой. Вместо зарядов ВВ в модельных исследованиях так же, как и ранее использовались электровзрывы тонких медных проволочек диаметром 0,1 и длиной 7 мм, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Полная энергия взрыва одной проволочки составляла 6,5 кГм. Для соответствия натурным условиям электровзрывы производились на глубинах, меньших или равных максимальному радиусу газового пузыря (20, 30, 40 мм). На каждой глубине была проведена серия двойных взрывов на жестком дне; варьировались интервалы замедления, расстояния между проволочками и соотношение энергий электровзрывов. Оптимальные взрывы дублировались на слое песка толщиной 9 мм для тех же глубин.

Результаты опытов показали, что эффект направленности возникает лишь в случае, если второй заряд взрывается в непосредственной близости к уже развившейся газовой полости от первого взрыва. Вследствие взаимодействия возникает водно-газовая струя большой скорости, пронизывающая газовый пузырь от первого взрыва и создающая эффект направленности. В начальный период эта струя имеет конусообразный вид, затем становится цилиндрической (см. рис. 3). В целом вся картина напоминает явление конуляции.

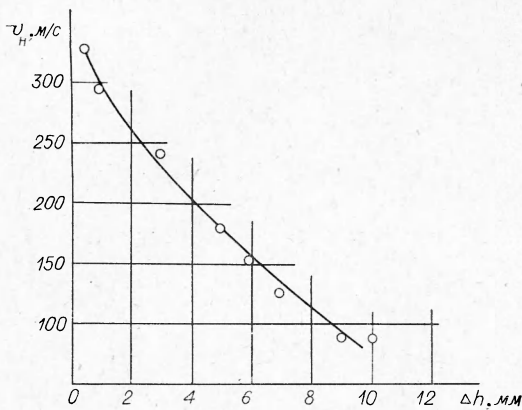


Рис. 4. Зависимость начальной скорости струи прорыва от расстояния между границей газового пузыря и вторым зарядом.

Интенсивность развития струи (скорость) зависит от первоначальной разности давлений в полостях и расстояния между границей первого пузыря и вторым зарядом  $\Delta h$  (рис. 4). В раздробленной породе (в опытах — песок) водногазовая струя перемещает ее в направлении своего движения. Результаты обработки фотографий для горизонтальной составляющей скорости струи приведены на рис. 5.

В другой группе опытов определялось оптимальное расстояние между зарядами и соответствующего ему интервала замедления.

Энергия взрывов была постоянной, поэтому оптимальное расстояние между проволочками было для всех глубин одинаковыми; для глубин 20, 30 и 40 мм оно составляло 30 мм.

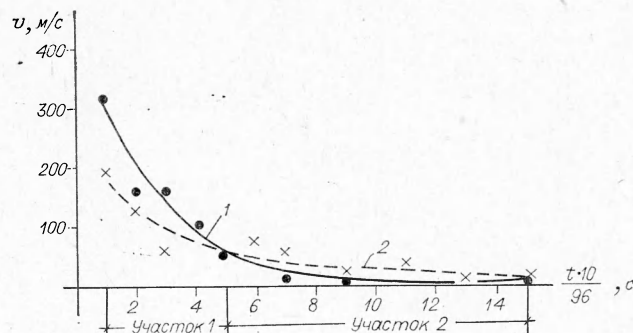
Интервал замедления, обеспечивающий направленность, колеблется в широких пределах. Само взаимодействие газовых полостей может быть слабым, сильным или вообще отсутствовать. Так, для указанных расстояний между зарядами  $l=30$  мм, эффект направленности наблюдался в диапазоне замедлений от 0,384 до 0,960 мс. При  $0,384 \leq \tau \leq 0,576$  мс наблюдалось слабое взаимодействие, а при  $0,576 \leq \tau \leq 0,960$  мс — сильное. Этот факт хорошо иллюстрирует рис. 5: в первом случае расстояние между вторым зарядом и границей газовой полости относительно велико и скорость струи значительно меньше, чем во втором. При  $\tau > 0,960$  мс пузырь первого заряда накрывает второй заряд и эффект направленности отсутствует; пузырь при этом развивается как при одиночном взрыве. При  $\tau < 0,384$  мс взаимодействие также отсутствует из-за относительно большого расстояния между границей газового пузыря первого заряда и вторым зарядом; оба пузыря развиваются самостоятельно. Таким образом, определенному расстоянию между зарядами соответствует оптимальный интервал замедления, и наоборот.

Опыты по определению влияния соотношения энергий обоих взрывов показали, что лучший эффект получается при соотношении энергий первого и второго зарядов 1 : 2.

Для определения возможности проведения ряда последовательных взрывов с направленным выбросом, были проведены последовательные взрывы трех зарядов. Результат оказался аналогичным двойному взрыву: все три газовых полости активно взаимодействовали, давая единый выброс в заданном направлении.

Рис. 5. Изменение горизонтальной составляющей скорости струи прорыва во времени.

1 — жесткое дно; 2 — песчаное дно.



## Экспериментальное исследование взаимодействия двух удлиненных зарядов

В настоящих опытах исследовался характер взаимодействия двух удлиненных (цилиндрических) зарядов при последовательном взрывании их под водой с помощью рентгеновской импульсной установки [8]. Схема состояла кроме рентгеновской импульсной установки из устройства для подрыва зарядов (кювета из оргстекла) (рис. 6) и металлической кассеты с пленкой. Между кассетой и устройством для подрыва размещался защитный экран. Использовались цилиндрические заряды двух типов. Первый готовился с заполнением полихлорвиниловой трубки гексогеном (внутренний диаметр трубки от 3 до 6 мм, толщина стенки 0,2 мм), второй — детонационный шнур. Скорость детонации зарядов обоих типов порядка 7 км/с. Энергия такого заряда около 80 кГм/с. Изменение времени задержки одного заряда относительно

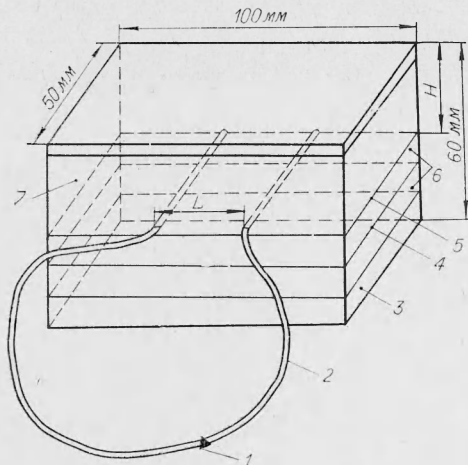


Рис. 6. Схема кювета с зарядом.

1 — детонатор (левый заряд взрывается первым); 2 — цилиндрический заряд, два свободных конца которого укладываются на поверхность грунта; 3 — стальная пластина; 4 — слой более плотного материала (смесь порошков свинца и  $Al_2O_3$ , вольфрама и  $Al_2O_3$ ); 5 — свинцовая фольга, толщина ее 0,02—0,06 мм; 6 — водонасыщенный порошок  $Al_2O_3$ , сжимаемость которого подобна сжимаемости песка; насыпная плотность 1,2 г/см<sup>3</sup>, размер зерен 20 мкм; 7 — вода.

Рис. 7. Развитие цилиндрической газовой полости во времени.

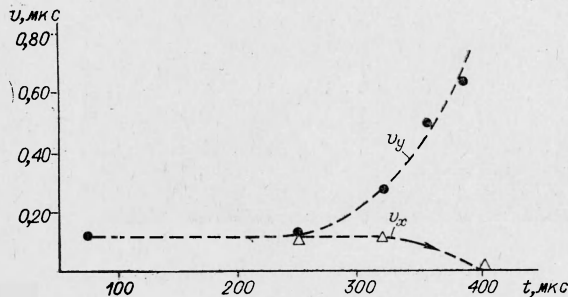
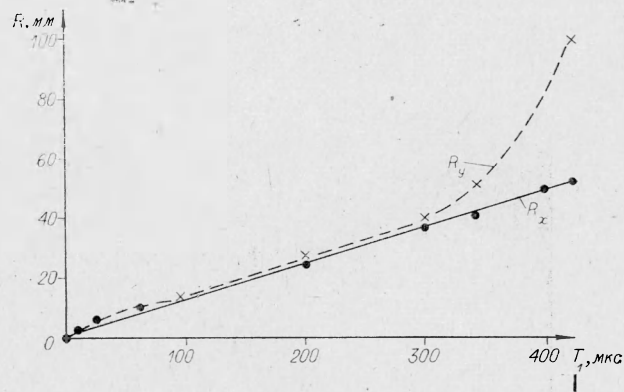


Рис. 8. Зависимость скорости расширения цилиндрической газовой полости от времени.

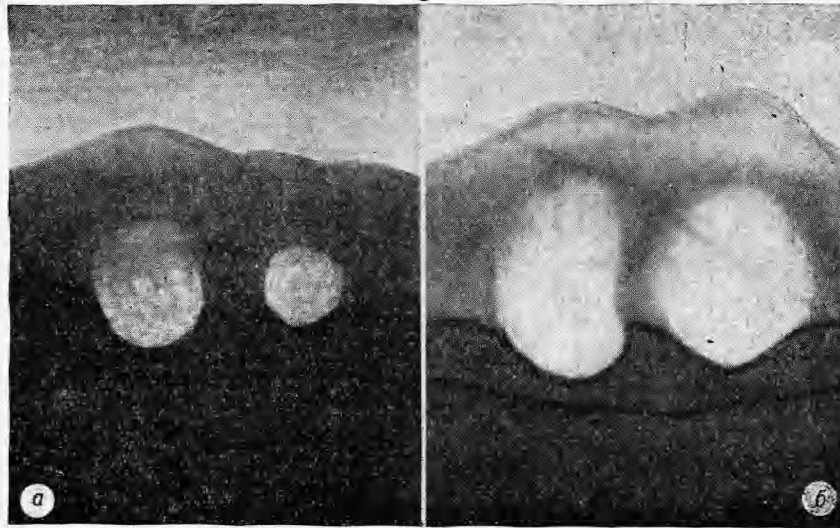


Рис. 9. Взаимодействие (слабое) цилиндрических газовых полостей ( $\Delta t = 31 \cdot 10^{-6}$  с).  
 а)  $T_1 = 56 \cdot 10^{-6}$  с; б)  $T_1 = 66 \cdot 10^{-6}$  с.

другого осуществлялось перемещением точки инициирования  $I$  (см. рис. 6). Во всех опытах выдерживалось соотношение  $\frac{l}{H} = 1$ .

Рентгеновский импульс подавался в фиксированный момент времени  $T_1$  после окончания детонации первого заряда. Время экспозиции составляло 0,1—0,15 мкс. Процесс фотографировался на разных стадиях развития. В каждой стадии фиксировались мгновенные положения газовых полостей, свободной поверхности и фольг относительно реперной плоскости, которой служило основание кюветы.

По результатам опытов построены зависимости изменения радиуса одиночной полости и скорости ее развития от времени (рис. 7, 8). Ха-

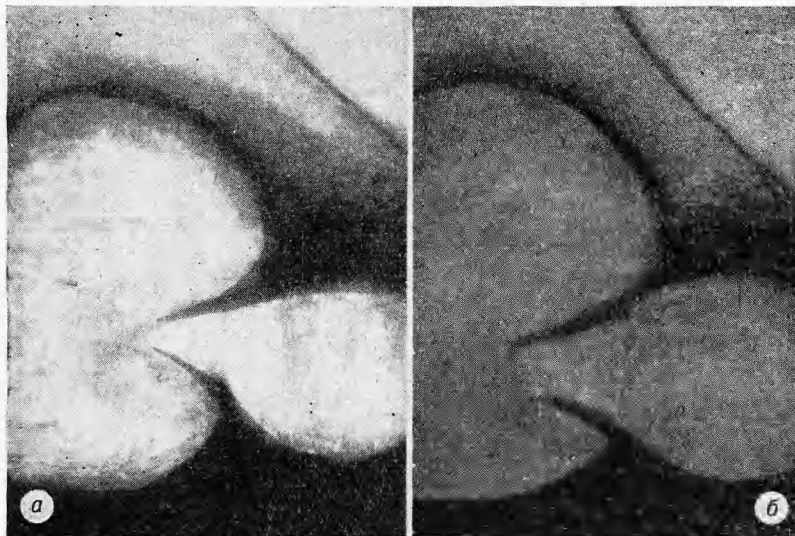


Рис. 10. Взаимодействие (сильное) цилиндрических полостей ( $\Delta t = 200$  мкс).  
 а)  $T_1 = 240$  мкс; б)  $T_1 = 260$  мкс.

рактер кривых определен, в известной степени, энергией заряда и глубиной жидкости. При последовательном взрыве двух зарядов (время задержки одного относительно другого в интервале 16÷31 мкс) граница между полостями сохраняется. Это связано, по-видимому, с равенством давлений в обеих полостях.

Следует заметить, что граница заметно искривляется в сторону заряда, который взрывается раньше, по мере возрастания времени задержки (рис. 9). На всех рентгенограммах видно, что газовые полости претерпевают излом на границе грунт—вода. Наблюдается также смещение частиц грунта, расположенных ниже взорванных зарядов (на фото горизонтальные темные полосы под зарядами искривляются). Это движение вызвано прохождением ударной волны через помеченные слои.

На рис. 10 отчетливо видно взаимодействие двух газовых полостей. В жидкости и грунте, находящимся между зарядами, формируется поле скоростей, которое обеспечивает перемещение грунтов в сторону ранее взорванного заряда, т. е. появляется эффект направленного движения.

Серия опытов была проведена с временами замедлений от 310 до 440 мкс. В этом диапазоне задержек расширяющаяся полость от первого заряда перекрывает второй заряд раньше, чем он взорвется и поэтому взаимодействие отсутствует.

*Поступила в редакцию  
6/IX 1974*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Покровский, И. С. Федоров. Возведение гидротехнических земляных сооружений направленным взрывом. М., Стройиздат, 1971.
2. В. С. Перехвальский, А. Н. Салов. Результаты натурных исследований по направленной переброске скальных грунтов взрывом. Произв. техн. сборник, вып. 86. МРФ, 1970.
3. В. И. Аксененко, А. Н. Салов. Тр. НИИВТа, вып. 70, 1971.
4. В. С. Перехвальский. Тр. НИИВТа, вып. 70, 1971.
5. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
6. В. А. Заонегин, А. С. Козаченко, В. Н. Костюченко. ПМТФ, 1960, 2.
7. Л. И. Седов. Методы подобия и размерности в механике. М., ТИИЛ, 1954.
8. А. М. Ставер. Symposium Explosive Cladding, Marianske Lazne, 1970.