

При взрыве заряда маятник отклонялся от начального положения. На осциллограмме начальная скорость смещения маятника фиксировалась магнитоэлектрическим датчиком 4, полная величина смещения — механическим прибором 5. Величина импульса, действующего при взрыве заряда на маятник, определялась по его начальной скорости и полному смещению.

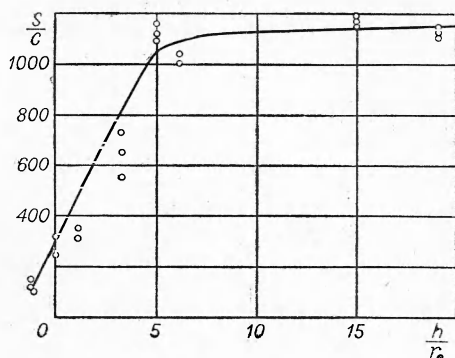


Рис. 2.

по данным опытов можно принять следующими: при взрыве заряда на глубине $h=5 r_0$ $k=1,0$; при взрыве заряда с заглублением на его высоту $k=0,5$; при взрыве заряда на поверхности грунта у преграды $k=0,2$.

Анализ результатов опытов позволяет сделать следующие выводы:

1. Величина полного импульса, действующего на преграду при контактном взрыве тротилового заряда в песке естественной влажности, прямо пропорциональна весу заряда и равна

$$I = 1100 kC,$$

где I — величина полного импульса, кг/сек; C — вес заряда, кг; k — коэффициент забивки.

2. С увеличением глубины заложения заряда от $h=0$ до $h=5 r_0$ величина импульса резко возрастает (рис. 2), при дальнейшем увеличении слоя грунта (забивки) над зарядом импульс остается практически постоянным. Величины коэффициента забивки

Поступила в редакцию
2/XI 1964

Р. И. Солоухин
(Новосибирск)

ШЛИРЕН-МЕТОД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКАЧКА ПЛОТНОСТИ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ

Принцип работы шлирен-установок основан на их чувствительности к пространственным градиентам показателя преломления прозрачных сред, поэтому количественные измерения этим методом обычно ограничиваются регистрацией градиентов плотности или интегральными пересчетами от градиентов к истинным значениям плотности. Для измерения скачка плотности в ударных волнах обычно применяется интерферометрическая техника, которая сложна в эксплуатации и требует высококачественного оптического оборудования (зеркала, пластинки, стекла с обработкой менее 0,1 полосы в поле наблюдения). Ниже описывается простой способ измерения скачка плотности во фронте плоских ударных волн в трубках, основанный на преломлении светового пучка шлирен-установки при его косом падении на поверхность ударного разрыва.

Принципиальная схема измерений показана на рис. 1. Ударный фронт 3 является преломляющей поверхностью для параллельного светового пучка теневого прибора 1 (угол α — острый). Стрелкой показано направление распространения ударной волны. Невозмущенный световой поток от постоянного источника света 4, собираемый в фокальной плоскости одного из зеркал 1, частично перекрывается экраном 6 с острым краем, параллельным осветительной щели 5. Положение экрана выбирается таким образом, чтобы получаемый перекрытием «серый» фон освещения выделенного поля наблюдения был по интенсивности

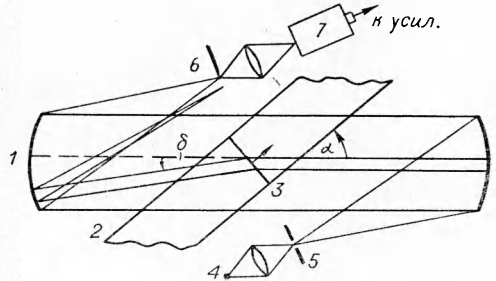


Рис. 1. Принципиальная схема измерений.

линейным в отношении возможного отклонения пучка от оси прибора на малый угол δ в ту или другую сторону. Изменение интенсивности проходящего света записывается фотоумножителем 7. Поле наблюдения ограничивается узкой (до 0,3 мм) щелью, параллельной ударному фронту, щели 5 и экрану 6. Чтобы исключить влияние дифракции, ограничение производится не в плоскости объекта наблюдения, а на изображении объекта (канала трубки 2), построенном на фотокатоде умножителя 7.

Для оценки чувствительности установки и погрешности измерений рассмотрим два простейших случая:

1. **Ударная волна с постоянной плотностью за фронтом.** Не учитывая изменения направления луча на «задней» стенке трубки (сжатый волной газ — стекло), находим угол отклонения δ на ударном фронте:

$$\delta \approx \frac{\Delta n}{n} \operatorname{tg} \alpha \approx \Delta n \operatorname{tg} \alpha.$$

Для воздуха с начальным давлением $p_0 = 0,1$ атм и скачком плотности $\rho_1/\rho_0 \approx 6$ при $\alpha = \frac{\pi}{4}$, $\delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$, что соответствует смещению изображения в фокусе установки ($f = 200$ см) $\Delta x = 0,4$ мм. При регулировке «серого» фона для ширины осветительной щели 5 $\Delta y = 0,4$ мм, предел регистрации умножителем изменения интенсивности светового потока соответствует смещению экрана 6 на $\Delta x^* \sim 0,01$ – $0,03$ мм. Если принять это в качестве критерия чувствительности установки по световому потоку, то можно оценить чувствительность по плотности, поскольку для газов $\Delta n = K \Delta \rho$, например для воздуха, $K = 0,23$ см³/г.

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta n^*}{\rho K} = \frac{10^{-5}}{0,23 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} \approx 5 \cdot 10^{-2} = 5\%.$$

2. **Ударная волна с градиентом плотности за фронтом.** В этом случае, дополнительно к эффекту скачка, путь луча будет искривляться в области оптической неоднородности по закону $\frac{1}{R} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dl}$, где R — радиус искривления пути луча, а l — направление нормали к лучу. Дополнительный угол отклонения

$$\delta' \approx \frac{\Delta S}{R} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dl} \Delta S,$$

где ΔS — элемент дуги искривленного пути. По порядку величины δ' соответствует $\frac{\Delta n}{n}$ — изменению показателя преломления в области неоднородности (в газе $n \sim 1$).

На рис. 2 показана типичная осциллограмма изменения светового потока в описанной выше установке при распространении ударной волны в углекислом газе (давление перед фронтом 0,1 атм, скачок плотности $\frac{\rho}{\rho_0} \sim 5,5$, размер сечения ударной трубки 5×5 см, $\alpha = 30^\circ$). Ширина импульса определяется временем прохождения плоскости фронта мимо щели наблюдения. Нижний луч — запись давления ударной волны пьезодатчиком. На рис. 3 приведен график отношения отклонения светового потока h , определенного по осциллограмме, к скачку плотности $\Delta \rho$, вычисленному по ударной адиабате — для разных скоростей ударных волн (M — число

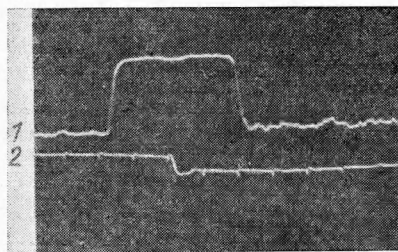
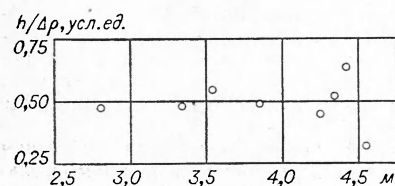


Рис. 2. Осциллограмма записи плотности (1) и давления (2) в ударной волне в углекислом газе. Метки времени 10 мксек.



Маха волны). Из рассмотрения этого графика можно убедиться в том, что линейность зависимости h и $\Delta \rho$ сохраняется в достаточно широком интервале изменения плотности ($\frac{\rho}{\rho_0} = 4,8 \div 6,8$).

Рис. 3. Данные измерения скачка плотности ударных волн в CO_2 .

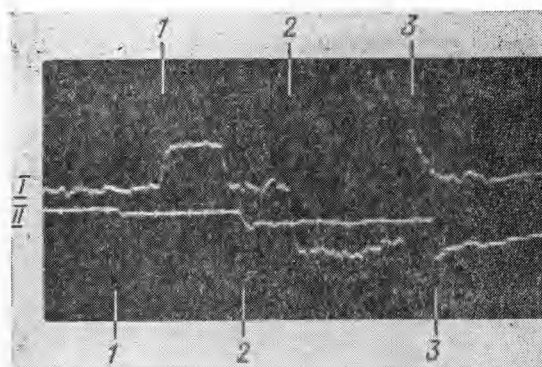


Рис. 4 иллюстрирует применение метода для записи более сложного процесса отражения ударной волны от закрытого конца трубки и возникновения детонации в сжатом газе. На осциллограмме видны: падающая ударная

Рис. 4. Осциллограмма процесса возникновения детонации за отраженной ударной волной в смесях $0,8 \text{ Ag} + 0,2 (\text{H}_2 + \text{O}_2)$:
I — плотность; II — давление. Метки времени 10 мксек.

волна 1, отраженная волна 2 с отклонением луча, противоположным волне 1, и скачок плотности во фронте волны детонации 3. Второй луч на этой осциллограмме — запись давления процесса. Сравнительные данные для измерений, приведенные в таблице,

Состав газа	Число Маха ударной волны	Отношение скачков плотности в падающей и отраженной ударных волнах	
		расчет	опыт
Ag	2,48	0,58	0,625
$0,8 \text{ Ag} + 0,2 (\text{H}_2 + \text{O}_2)$	2,43	0,58	0,64
$0,8 \text{ Ag} + 0,2 (\text{H}_2 + \text{O}_2)$	2,48	0,61	0,58
$0,8 \text{ Ag} + 0,2 (\text{H}_2 + \text{O}_2)$	2,48	0,61	0,62
$0,8 \text{ Ag} + 0,2 (\text{H}_2 + \text{O}_2)$	2,55	0,60	0,60

указывают на хорошее соответствие между измеренными и рассчитанными значениями скачка плотности в падающей и отраженной ударных волнах.

Выражаю признательность Г. А. Заварзину за помощь в проведении опытов.

Поступила в редакцию
30/XII 1964

А. М. Болдарев, Ю. А. Попов
(Новосибирск)

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В работе описывается полученная с помощью скоростной киносъемки картина движения жидкости вблизи свободной поверхности при нормальном отражении от нее ударной волны подводного взрыва и дается качественное объяснение наблюдаемых процессов. Экспериментально подтверждается возможность слоения жидкости. Показано также образование зоны кавитации и разрушение отдельных слоев отколовшейся жидкости.

Поверхностные явления при подводном взрыве тесно связаны с отражением ударной волны и движением газового пузыря. Визуальные наблюдения показывают, что вначале на свободной поверхности образуется быстро расширяющийся круг раздробленной жидкости, затем происходит заметный подъем брызг и далее появляется водяной фонтан. Более детальное рассмотрение происходящих процессов возможно с помощью скоростной киносъемки. Такая съемка в натуральных условиях затруднительна, так как должна захватывать как надводную, так и подводную области, примыкающие к свободной поверхности воды.

Для изучения движения жидкости со свободной поверхностью под действием ударной волны в лабораторных условиях использовалась взрывная камера прямоугольного сечения размером $80 \times 10 \times 3 \text{ см}^3$. Киносъемка велась через смотровые окна, вмон-