

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

№ 1

1965

*М. И. Воротникова,
В. К. Кедринский, Р. И. Солоухин*
(Новосибирск)

УДАРНАЯ ТРУБКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТИ

Основным источником получения ударных волн и волн конечной амплитуды в жидкости служит сейчас детонация зарядов ВВ. Но этот способ малодоступен для лабораторных исследований, кривая давление — время для волны имеет обычно быстрый спад, а амплитуда давления резко падает с удалением от места взрыва. Попытки использования ВВ в лабораторных условиях для получения ударных волн в конических камерах [1], по существу, не снимают указанных выше ограничений. Применение же для жидкостей [2] диафрагменной ударной трубы, широко распространенной при исследованиях в газах, также не совсем удачно из-за ограничений в амплитуде давления получаемых волн (см. ниже) и трудностей получения волн с постоянным давлением за фронтом и с регулируемой длительностью импульса давления.

В данной статье описывается метод получения ударных волн, основанный на столкновении движущегося столба с закрытым концом трубки или с покоящейся массой жидкости. Проведенные опыты показали, что этот метод позволяет получить ударные волны с мало меняющимся давлением за фронтом $\sim 10^2$ — 10^4 атм и с регулируемой длительностью волны $\sim 10^{-4}$ — 10^{-3} сек.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА В ВОДЕ

Будем использовать данные об уравнении состояния воды, приведенные в [3, 4]. Для давлений не более 25000 атм уравнение состояния записывается в форме

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{\bar{p}}{\bar{p}_1} \right)^{1/n} = \left(\frac{a}{a_1} \right)^{\frac{2}{n-1}}, \quad (1)$$

где $\bar{p} = p + B$ ($B = 3010$ атм), $n = 7,15$; a — скорость звука. Условия на фронте ударной волны в воде будут иметь следующий вид (u — скорость частиц):

$$\rho_1 D = \rho (D - u), \quad (2)$$

$$\rho_1 D u = \bar{p} - \bar{p}_1, \quad (3)$$

а для простых волн

$$\Delta u = \frac{2a_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_4} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \right]. \quad (4)$$

Пользуясь этими соотношениями, найдем последовательно параметры ударных волн, полученных в различных условиях.

А. Распад произвольного разрыва в диафрагменной трубе типа вода — вода. Обозначения: 1 — начальное состояние, 1—2 — переход в ударной волне, 2—3 — на контактной поверхности, 3—4 — в волне разрежения. Из (1) — (4) имеем

$$\lg p_4 = \lg p_2 - \frac{2n}{n-1} \lg \left\{ 1 - \frac{n-1}{2} \frac{a_1}{a_4} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/n} \right] \frac{(p_2 - p_1)}{n(p_1 + B)}} \right\}, \quad (5)$$

с асимптотическими значениями при $p_4 \rightarrow \infty$, определяемыми равенством

$$\frac{p_2}{B} \left[1 - \left(\frac{B}{p_2 + B} \right)^{1/n} \right] = \frac{4n}{(n-1)^2}. \quad (6)$$

Б. Распад произвольного разрыва в системе газ — вода. Считая показатель адиабаты газа γ неизменным, получаем соотношение (см. [2])

$$\lg p_4 = \lg p_2 - \frac{2\gamma}{\gamma-1} \lg \left\{ 1 - \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{a_1}{a_4} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/n} \right] \frac{(p_2 - p_1)}{n(p_1 + B)}} \right\} \quad (7)$$

с асимптотическим условием ($p_4 \rightarrow \infty$)

$$\frac{p_2}{B} \left[1 - \left(\frac{B}{p_2 + B} \right)^{1/n} \right] = n \left[\frac{2a_1}{(\gamma-1)a_1} \right]^2. \quad (8)$$

	$p_2, \text{ атм}$	$D, \frac{\text{м}}{\text{сек}}$	$u, \frac{\text{м}}{\text{сек}}$	$\frac{p_2}{p_1}$	$\frac{a_2}{a_1}$	$M = \frac{D}{a_1}$
А	11 550	2400	480	1,25	1,76	1,6
Б	80 000	4670	1710	1,58	4,1	3,11

В таблице приведены асимптотические параметры для волн в случаях А и Б. Графические зависимости p_2 от p_4 , соответствующие (5) и (7), показаны на рис. 1.

В. Удар о стенку. Скачок давления во фронте волны, получаемой при ударе столба воды в трубке со скоростью u о неподвижную жесткую стенку, определяется из законов сохранения (2—3):

$$\rho_1 u^2 = (p_2 - p_1) \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/n} \right]. \quad (9)$$

На рис. 2 найденная по этой формуле точная зависимость давления в волне от скорости для воды сравнивается с приближенной акустической формулой

$$\Delta p = \rho_1 u a_1. \quad (10)$$

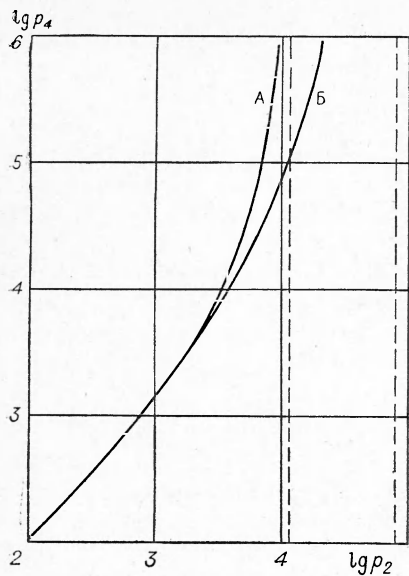


Рис. 1. Расчетная зависимость давления ударной волны в воде от начального перепада давления на диафрагме:
А — вода — вода; Б — воздух — вода.

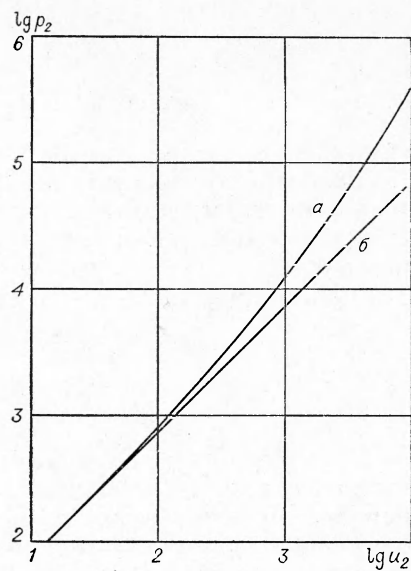


Рис. 2. Давление в волне в зависимости от скорости столба жидкости при ударе о закрытый конец трубки:
а — по соотношениям на разрыве; б — акустическое приближение.

Г. Удар жидкость — жидкость. В этом случае состояние 1 отнесем к неподвижной среде, а состояние 4 — к движущейся. Если считать, что после столкновения ударные волны будут распространяться в обе стороны, то совместное решение соотношений на двух разрывах приводит к следующей системе:

$$p_2 - p_1 = \rho_1 \frac{u^2}{1 - \rho_1/\rho_2}, \quad p_3 - p_4 = \rho_4 \frac{(u_4 - u)^2}{1 - \rho_4/\rho_2}. \quad (11)$$

В простейшем случае вода — вода и $p_1 = p_4$ и $u = \frac{u_4}{2}$. На графике

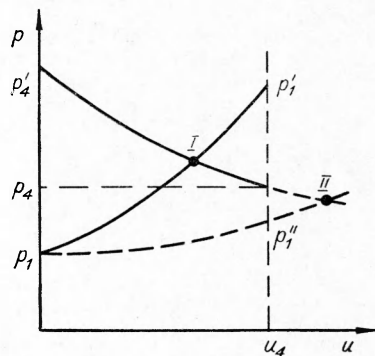
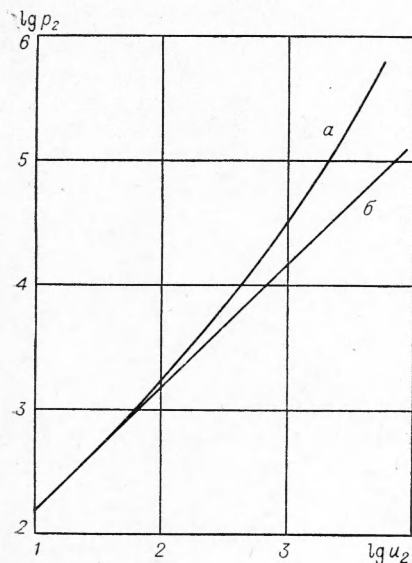


Рис. 4. Диаграмма процесса столкновения двух масс жидкости в плоскости $(p-u)$.

Рис. 3. Давление в волне при ударе вода — вода:
а — по соотношениям на разрыве;
б — акустическое приближение.

рис. 3 зависимость Δp от u_4 сравнивается с акустической формулой

$$\Delta p = \frac{u_4}{\frac{1}{\rho_1 a_1} + \frac{1}{\rho_4 a_4}}. \quad (12)$$

Нужно заметить, что в общем случае столкновения двух масс жидкости с различными начальными давлениями и разными акустическими свойствами могут встретиться случаи, когда одна из расходящихся волн будет простой (рис. 4). В случае II, например, по жидкости 4 будет распространяться волна разрежения. Очевидно, критерием реализации случая I будет следующее условие (см. (11)):

$$p_1' = p_1 + \frac{\rho_1 u_4^2}{1 - (\bar{p}_1/\bar{p}_1')^{1/n}} < p_4. \quad (13)$$

Проведенные оценки показывают, что в случае В и Г простыми средствами (p газа = 10—100 атм) можно получить ударные волны с давлением $\Delta p > 10^4$ атм, не пользуясь устройствами высокого давления, необходимыми в установках типа А и Б. Кроме того, меняя длину столба жидкости, можно задавать необходимую длительность сжатого состояния жидкости $\Delta t \approx 2L/a_1$ до прихода волны, отраженной от конца столба с обратным скачком давления.

СХЕМА УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки показана на рис. 5. Канал трубки длиной 1—2 м с внутренним диаметром 3 см устанавливается вертикально, его верхняя часть закрыта торцевой стенкой (режим В) или диафрагмой, отделяющей заполненное жидкостью продолжение канала (режим Г). Нижняя часть канала заполнена жидкостью, закрыта герметичным легким поршнем и отделена от баллона с газом высокого давления (10—100 атм) второй диафрагмой. Воздух из этой секции откачивается. В опытах с визуальными наблюдениями секция вблизи торца изготовляется из плексигласа и заключается в стальную обойму с узкими продольными щелями для подсветки и получения разверток процесса. В боковой стенке канала имеются вводы для пьезодатчиков

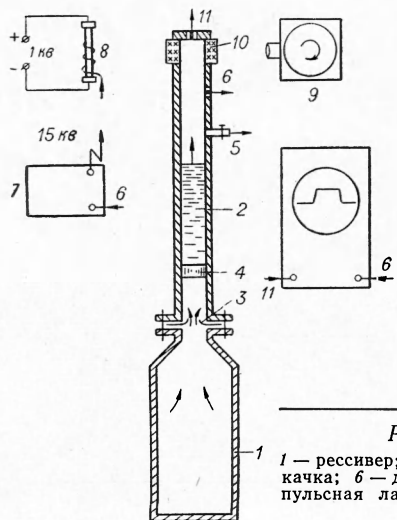


Рис. 5. Принципиальная схема установки:

1 — ресивер; 2 — канал трубки; 3 — диафрагма; 4 — поршень; 5 — откачка; 6 — датчик запуска; 7 — импульсный трансформатор; 8 — импульсная лампа; 9 — фоторегистр; 10 — прозрачная секция; 11 — датчик давления.

давления и для контактных электрических датчиков синхронизации процесса с разверткой осциллографа и с запуском осветительной импульсной лампы. Предусмотрено также измерение давления и другие измерения в торцевой стенке трубки.

На кинокадрах рис. 6 показано несколько типичных случаев полета столба жидкости в аналогичной установке с квадратным сечением канала и с прозрачными стенками. Случай *а* иллюстрирует необходимость введения поршня в установку: без поршня происходит прорыв в уско-ряемый объем жидкости пузыря газа высокого давления. Случай *б* — нормальное протекание процесса, а в случае *в* незначительная неровность внутренней поверхности стенки канала (она видна на кадрах) приводит к образованию каверны и к сильному возмущению поверхности столба жидкости. В качестве иллюстрации работы установки на рис. 7, *а* приведена типичная развертка движения границы столба жидкости (зачерненная вода) и запись давления в торце трубки турмалиновым пьезодатчиком. Для сравнения там же приведена осциллограмма давления в торце, полученная на той же установке для волны, созданной обычным разрывом диафрагмы (воздух — вода). Из этих записей видно, что описанная аппаратура решает задачу получения ударной волны с медленно меняющимся давлением за фронтом и с регулируемой длительностью положительной фазы давления.

РЕГИСТРИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА

Основные требования, предъявляемые к методике измерения давления в данной установке, сводятся к отысканию принципа работы и конструкции датчика давления, способного выдерживать нагрузки более 10^4 атм, иметь низкий уровень собственных колебаний, обладать малыми размерами и обеспечивать точное воспроизведение во времени быстрых ($\sim 10^{-6}$ сек) изменений давления в течение относительно большого интервала записи ($\sim 10^{-3}$ сек). Ниже приводится краткое описание некоторых действующих конструкций датчиков и образцы записей давления этими датчиками.

Пьезоэлектрические датчики. В пьезоэлектрических датчиках в качестве чувствительного элемента использовался турмалин или титанат бария. Кристалл турмалина размером $2 \cdot 2 \cdot 0,3$ мм³, подпаянный к концу кабеля, слегка выступающего из торцевой пластины, заливался эпоксидной смолой. Пластина титаната бария $\varnothing$ 6 мм, толщиной 1 мм прижималась к дну латунного торца, имеющего в центре цилиндрическую выемку.

На рис. 8, *б* показана осциллограмма давления, записанная турмалиновым датчиком в случае, когда столб воды ударяется о покоящуюся воду. Заметно более плавное нарастание давления в этом случае по сравнению с волной в падающем потоке (рис. 8, *а*). Рис. 8, *в* — запись датчиком из титаната бария.

Кроме торцевых применялись также и объемные датчики, вынесенные в покоящийся столб воды на 25 мм от торца. Такой датчик был выполнен на основе турмалинового кристалла ($1 \cdot 1 \cdot 0,2$ мм³), залитого смолой на конце медицинской иглы, внутри которой проходил изолированный электрод (рис. 9). Соответствующая осциллограмма давления показана на рис. 8, *г*.

Изменение проводимости жидкости. По прочностным свойствам турмалин и титанат бария не могут быть многократно использованы для записи волн давления амплитуды 10^3 — 10^4 атм. Поэтому для регистрации давления в этом диапазоне необходимы поиски либо датчиков из других, более прочных материалов, либо новых принципов записи. Вообще говоря, можно, например, использовать зависимость от давления электрического сопротивления однородной проводящей среды. В соот-

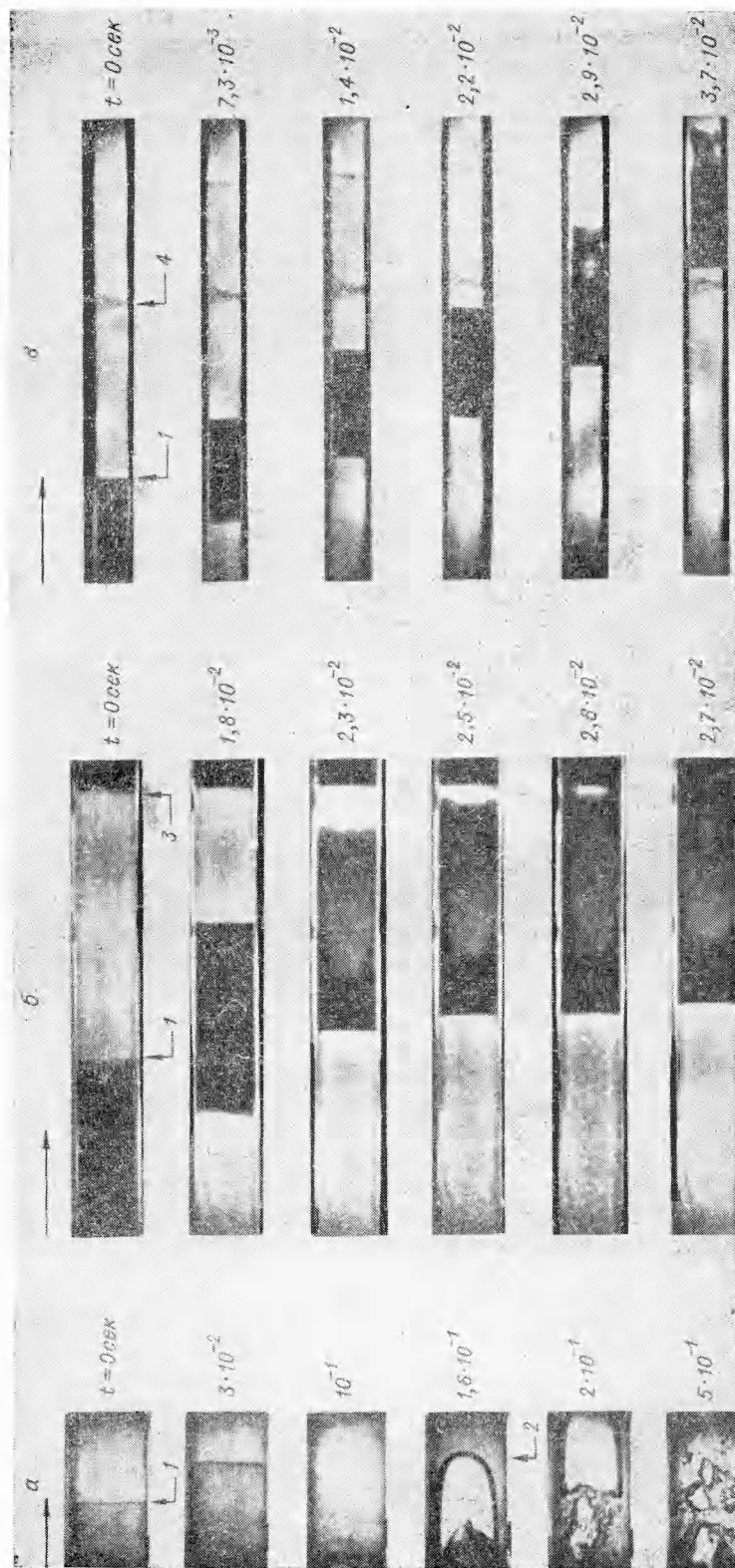


Рис. 6. Движение столба жидкости в трубе квадратного сечения:

а — без поршня; б — типичный случай; в — влияние возмущения в канале.
1 — поверхность воды; 2 — газовый пузырь; 3 — торец; 4 — возмущение поверхности канала.

ветствии с известной «задачей о заземлении» сопротивление среды между двумя оболочками произвольной формы равно $\frac{\rho}{4\pi C}$, где ρ — удельное сопротивление среды, а C — емкость этой системы электродов. Измеряя ρ в течение процесса, можно найти закон изменения давле-

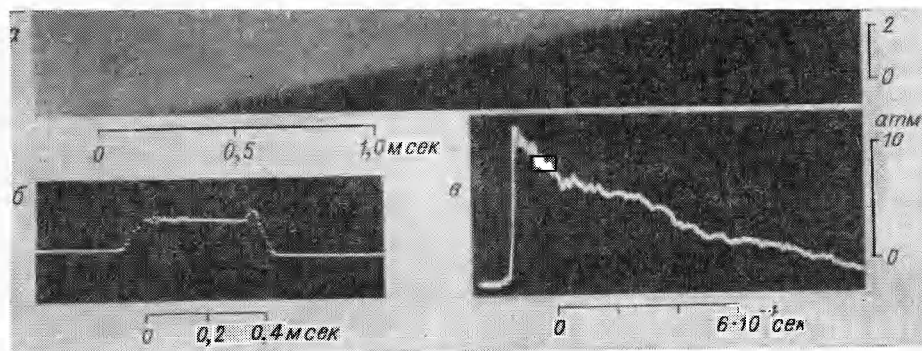


Рис. 7.

а — теньевая развертка движения передней границы столба (жидкость непрозрачна); осциллограммы давления процесса; *б* — в ударной трубке описываемой конструкции (турмалин, $p \sim 600$ атм); *в* — диафрагменной ударной трубке (титанат бария, $p \sim 14$ атм).

ния. Для воды и некоторых электролитов зависимость проводимости от давления изучалась, например, в работе [5].

В наших экспериментах одной проводящей оболочкой была внутренняя поверхность канала трубки, в качестве другой использовался танталовый шарик $\varnothing 2$ мм, расположенный на стальном тонком стержне, покрытом тонким изолирующим слоем эпоксидной смолы. Осциллограмма

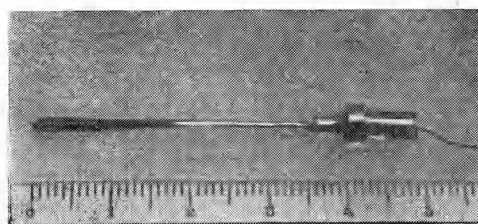
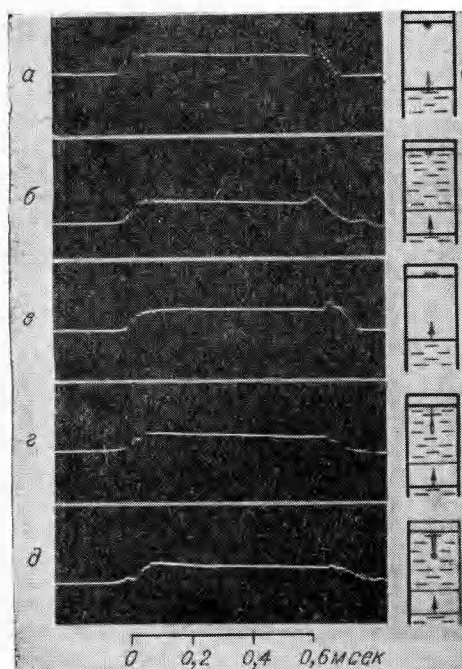


Рис. 9. Конструкция турмалинового датчика давления «игольчатого» типа.

Рис. 8. Осциллограммы процесса, записанные различными датчиками ($p \sim 350$ атм): *а* — торцевой турмалиновый датчик; *б* — то же, удар вода — вода; *в* — торцевой пьезодатчик; *г* — объемный турмалиновый датчик «игольчатого» типа (см. рис. 9); *д* — изменение электропроводности воды.

изменения сопротивления шарик — трубка показана на рис. 8, д. Из сравнения с осциллограммами давления, записанными пьезодатчиками, видно, что изменение сопротивления воды в волне давления довольно хорошо воспроизводит форму волны по давлению. Недостатком такого способа регистрации являются трудности записи фронта волны, а неоспоримым преимуществом — высокие прочностные свойства используемой системы.

Осциллограммы, приведенные на рис. 8, записаны с помощью двухлучевого осциллографа при выключенной собственной развертке лучей. Развертка процесса во времени осуществлялась вращением пленки (фоторегистр), на которую фокусировались лучи. Осциллограф был связан с электронным реле времени, включающим подсветку лучей на определенный промежуток времени. Заметим, что при линейной скорости вращения пленки ~ 100 м/сек такая система дает возможность равномерной записи процессов длительностью от 10^{-3} до 1 сек с лучшим разрешением деталей процесса во времени, чем на неподвижной пленке фотоаппарата при собственной развертке осциллографа.

Полупроводниковые датчики. Были проведены предварительные опыты для выяснения возможности записи давления по изменению сопротивления некоторых полупроводников. В этих опытах «работающими» оказались конструкции датчиков с чувствительными элементами из германия (объемная проводимость или $p-n$ -переход в германии) и из некоторых органических полупроводников (см. [6]). В качестве примера на рис. 10 показана осциллограмма давления волны в ударной трубке описанной выше конструкции ($p \sim 600$ атм, $\Delta t \sim 600$ мсек), записанная германиевым датчиком с объемной проводимостью. Конструктивное оформление этого датчика аналогично рис. 8, в.

Отметим здесь также возможность записи давлений более 10^4 атм с использованием чувствительности к давлению термпар [7]. Однако при давлениях порядка 10^2 атм эффект давления составляет менее 1%, поэтому наши попытки в диапазоне малых давлений к успеху не привели.

Любой из перечисленных датчиков давления может быть тарирован как специальным образом, например по взрыву тротилового заряда известного веса, так и непосредственно в самой трубке по измеренному значению скорости столба воды, тормозящегося у торца. Скорость столба воды может быть определена фотосъемкой (см. рис. 7) или по времени замыкания летящей водой двух изолированных

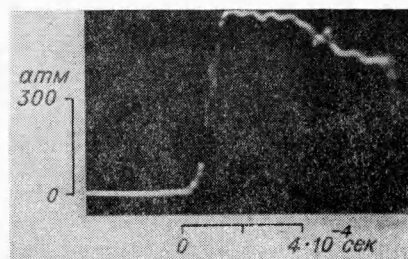


Рис. 10. Осциллограмма давления, записанная германиевым датчиком ($p \sim 600$ атм).

электродов, расположенных по вертикали на известном расстоянии.

В связи с большой длительностью регистрируемых процессов (~ 1 мсек) особые требования предъявлялись к величине постоянной времени регистрирующей системы. Так, для турмалинового датчика с миллиметровым кристаллом, параллельно с которым включалась емкость 800 нФ, при входном сопротивлении катодного повторителя 100 мгом $RC \sim 0,08$ сек. В этом случае амплитуда прямоугольного импульса длительностью 10^{-3} сек в конце будет уменьшена примерно на 1%.

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Диапазон давлений 10^3 — 10^4 атм интересен для жидкостей тем, что внутреннее давление, создаваемое силами межмолекулярного взаимодействия, величина того же порядка. Поэтому предполагается, что описанная выше методика сможет найти полезное применение примерно в следующих областях физико-химического эксперимента:

а) определение термохимических постоянных и уравнений состояния жидких сред в условиях высокого давления и термодинамического равновесия;

б) изучение неравновесных процессов в жидкостях, вызванных внешним изменением давления (также и температуры) среды;

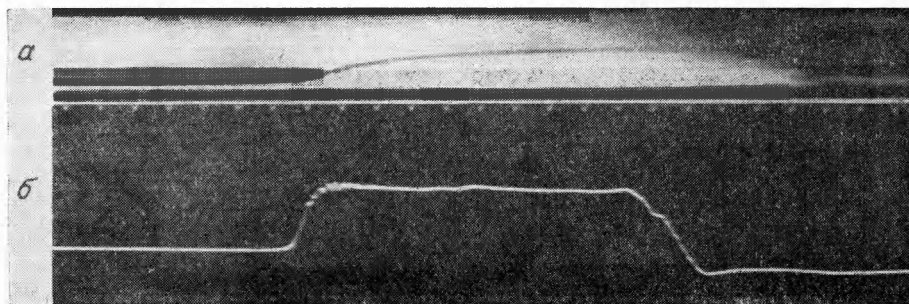


Рис. 11. Теневая развертка пульсаций газового пузырька в объеме жидкости (а), совмещенная во времени с осциллограммой давления процесса (б).

в) исследование влияния изменения давления на поверхностные явления в системах жидкость — жидкость или жидкость — твердое тело;

г) различные тарировки пьезоэлектрических, оптических и т. п. приборов, предназначенных для изучения состояния жидкостей при различных давлениях;

д) изучение поведения механически неравновесных систем (пузырьков и деформируемых тел в жидкости, взвесей и т. п.) в условиях сложных внезапно приложенных нагрузок.

В качестве примера последнего из перечисленных случаев рассмотрим картину поведения газового пузырька, помещенного в жидкость. На рис. 11 в едином масштабе времени показаны осциллограмма давления (удар вода — вода) и теневая развертка движения в жидкости стенки газового пузырька ($R_0 \sim 0,4$ см). На развертке хорошо видны пульсации пузырька, можно определить время его сжатия до минимального радиуса и величину этого радиуса. Следует отметить, что в этом процессе достигаются весьма высокие температуры и давления газа внутри пузырька. Например, в данном случае при давлении в волне ~ 100 атм расчетное адиабатическое увеличение температуры составляет для газа с $\gamma = 1,4$ около $10\,000^\circ\text{K}$, а давление газа в момент максимального сжатия — около 400 тыс. атм. Учет сжимаемости жидкости приведет к снижению температуры до 3000°K , а давления — до 10 000 атм. Эти данные существенно отличаются от «равновесных» для медленного сжатия тем же давлением, когда температура ниже примерно в 10 раз.

Поступила в редакцию
15/XII 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. W. S. Filler. Phys. of Fluids, 1964, 7, 5.
 2. I. I. Glass, L. E. Heuckroth. Phys. of Fluids, 1963, 6, 4.
 3. M. H. Rice, I. M. Walsh. J. Chem. Phys. 1957, 26, 4.
 4. Р. Коул. Подводные взрывы. ИЛ, 1950.
 5. L. H. Adanes, R. E. Hall. J. Phys. Chem, 1931, 35, 2145.
 6. G. A. Samara, H. G. Drickamer. J. Chem. Phys, 1962, 37, 3.
 7. Современная техника сверхвысоких давлений. Перевод с англ. под редакцией Е. Г. Понятовского. М., Из-во «Мир». 1964.
-