

УДК 532.593:532.529

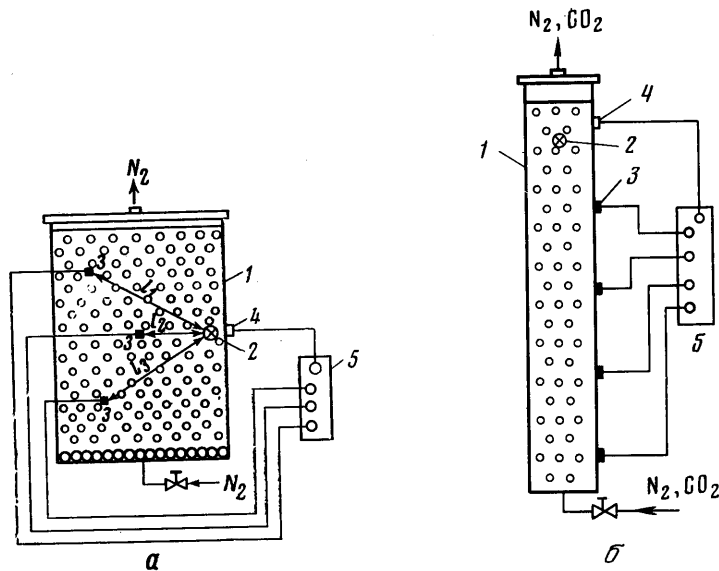
## ЗАТУХАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЕ ЖИДКОСТЬ — ПУЗЫРЬКИ ГАЗА

Б. Е. ГЕЛЬФАНД, А. В. ГУБАНОВ, С. А. ГУБИН, В. М. КУДИНОВ,  
Б. И. ПАЛАМАРЧУК, А. Л. ПОДГРЕБЕНКОВ, О. Е. ПОПОВ, Е. И. ТИМОФЕЕВ

(Москва, Киев)

Параметры ударных волн, генерируемых при взрыве ВВ в двухфазной пористой среде типа твердое тело — пузырьки газа, отличны от параметров волн давления в однофазной среде [1]. Так, например, в пористой среде при прочих одинаковых условиях интенсивность ударных волн меньше. Однако систематическое исследование параметров сферических ударных волн в пористых средах еще далеко от своего полного завершения.

Точно также обстоит дело и с исследованиями взрывных процессов в газожидкостных средах, представляющих собой взвесь пузырьков газа в жидкости. Подобные



Фиг. 1

системы достаточно часто встречаются на практике. При проведении подводных взрывных работ и для ряда других приложений совершенно необходимо знать последствия взрыва в системе пузырьки газа — жидкость. Пока теоретический расчет интересующих параметров взрывной волны в двухфазной среде сопряжен с рядом трудностей. На современном этапе основным источником информации о параметрах сильных ударных волн в двухфазной среде остаются опыты.

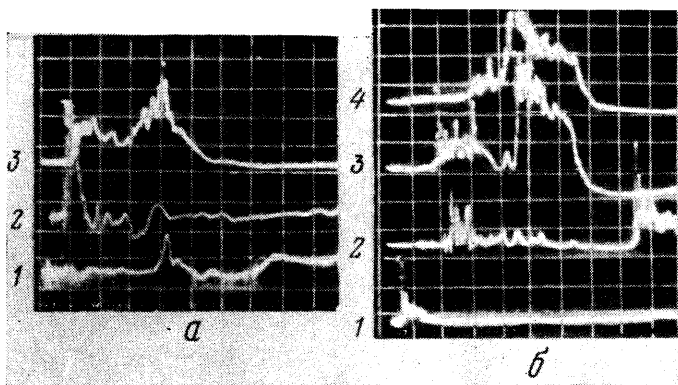
Из ряда исследований демпфирования волн давления с помощью пузырьковых экранов [2, 3] известно, что при некоторых условиях последние могут быть достаточно эффективным средством их гашения. Выдвигаются и гипотезы о причинах гашения волн в экране. В частности, предполагается, что поглощение энергии ударных волн в основном вызвано разогревом газа в пузырьках. Потеря энергии при этом пропорциональна амплитуде ударной волны [2].

Предложенное объяснение демпфирующего действия экрана не является достаточно убедительным, так как объемная доля газа в экране мала и потери на ударный разогрев газа будут меньше, чем при взрыве заряда ВВ в воздухе. Лучше связывать воздействие экрана на параметры ударных волн с явлениями преломления на границах раздела (газ — жидкость) — (жидкость). При размещении заряда непосредственно в объеме двухфазной среды создаются особые условия для разлета продуктов взрыва, отличные от тех, которые имеют место в газе или жидкости. В газе разлет продуктов взрыва происходит в среде с большой сжимаемостью и малой плотностью. При взрыве в жидкости сжимаемость среды минимальна, а ее плотность велика. Добавление пузырьков газа в жидкость при умеренной объемной доле газа

(до 20÷30%) практически не меняет плотности среды, но значительно увеличивает ее сжимаемость. Поэтому формирование ударных волн при взрыве в двухфазной среде может отличаться и от случая взрыва в газе и от случая взрыва в жидкости. Следует также ожидать, что гашение ударных волн при непосредственном размещении заряда в двухфазной среде окажется эффективнее, чем в случае пузырькового экрана, на который волна падает через прослойку воды.

Цель описанных ниже исследований состояла в экспериментальном изучении затухания ударных волн во взвеси пузырьков газа и жидкости.

**1. Экспериментальные установки.** Измерение параметра ударных волн в системе жидкость — пузырьки газа проводилось в трехмерном и одномерном случаях на установках, схемы которых представлены на фиг. 1. Параметры сферических ударных волн измеряли во взрывном цилиндрическом сосуде 1 диаметром 280 мм и высотой 400 мм (фиг. 1, а). В центральном сечении сосуда на расстоянии 200 мм от стенки подвешивали заряд ВВ 2 гексогена. Вес заряда 1–6 г. Сосуд частично за-



Фиг. 2

ливался водой. По высоте подъема столба жидкости в сосуде при продуве объема жидкости азотом определяли объемную концентрацию газа в жидкости  $\beta$ . Концентрация составляла  $\beta=2.3\div 26\%$ . Опыты проведены при давлении  $p_0=1$  бар и температуре 293° К.

Параметры волн в двухфазной среде измеряли с помощью трех ножевых пьезоэлектрических датчиков давления 3, откалиброванных на ударной трубе. Расстояние от датчиков до заряда составляло:  $l_1=219$  мм,  $l_2=134$  мм,  $l_3=180$  мм. Собственная частота датчиков не ниже 40 кГц. Сигналы датчиков записывались осциллографом С1-33 5. Синхронизация системы регистрации обеспечивалась вибрационным датчиком 4.

Для исследований в одномерном случае использована модифицированная ударная труба (фиг. 1, б). Труба не имела камеры высокого давления. В камеру низкого давления 1 длиной 1.3 м и диаметром 50 мм заливалась вода. Снизу труба продувалась потоком газа. Сверху в объем двухфазной среды опускали на глубину 150 мм заряд ВВ 2 весом 1 г. После подрыва заряда параметры волны фиксировались датчиками давления 3 в четырех точках на расстоянии 960 мм с шагом 240 мм. Опыты проведены при объемной концентрации пузырьков газа  $\beta=2.8$  и 10.7% при начальном давлении  $p_0=1$  бар и температуре 293° К. Датчик 4 служил для запуска осциллографа. С целью выяснения влияния теплофизических свойств газа в пузырьках опыты выполнены при продувке объема трубы азотом и углекислым газом.

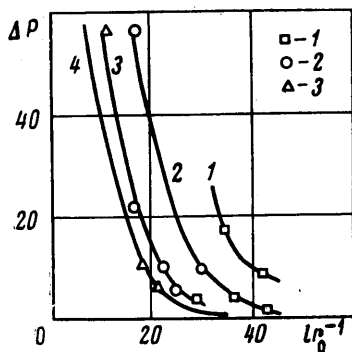
**2. Результаты экспериментов.** На фотографии фиг. 2, а показана регистрация записей давления при подрыве заряда ВВ весом 6 г в двухфазной среде с объемной концентрацией газа  $\beta=26\%$ . Масштаб времени (по горизонтали) на всех лучах осциллографа 600 мксек на деление. На лучах 1, 2, 3 записаны показания датчиков, стоящих на расстояниях  $l_1, l_2, l_3$  от заряда. На расстояниях  $l_1, l_2, l_3$  перепад давления на фронте волны  $\Delta p=9.3, 49, 12.8$  бар соответственно. По данным работ [4, 5] при подрыве такого же заряда в воде следует ожидать на указанных расстояниях  $\Delta p=480, 900, 620$  бар. Датчик, стоящий на расстоянии  $l_3$ , кроме падающей волны через промежуток времени  $\sim 1.8$  мсек фиксирует приход отражений от дна волны давления.

На фиг. 3 построены зависимости максимального перепада давления на фронте падающей волны  $\Delta p$  от безразмерного расстояния  $lr_0^{-1}$ . Здесь  $r_0$  — радиус эквивалент-

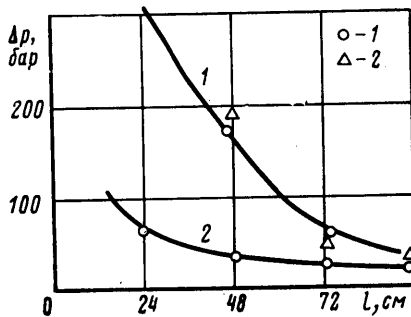
ного по весу сферического заряда ВВ. Кривые 1, 2, 3 получены при  $\beta=2.3, 16.6$  и  $26\%$ . Точки 1, 2, 3 соответствуют опытам с зарядом 1, 3, 6 г. Точность измерения давления  $\sim 40\%$ . С ростом величины  $\beta$  интенсивность волн давления при  $l=\text{const}$  убывает. Сравнение с измерениями параметров волн в воде [4, 5] показывает, что при  $\beta=2.3\%$  интенсивность волн убывает в 20–30 раз, а при  $\beta=26\%$  — в 50–60 раз.

Для иллюстрации эффективности гашения ударных волн в воздушной ударной волне от расстояния для заряда весом 1 г [6] (кривая 4). На расстоянии свыше (30–40)  $r_0$  интенсивность ударных волн в двухфазной среде при объемной концентрации газа 16.6–26% достаточно близка к интенсивности воздушных ударных волн.

На фотографии фиг. 2, б показана трансформация ударной волны в двухфазной среде в одномерном случае. На лучах 1–4 записаны показания датчиков, удален-



Фиг. 3



Фиг. 4

ных от разряда на расстояние  $l=240, 480, 720, 960$  мм соответственно. Масштаб развертки по времени на лучах 3, 4 600 мксек, а на 1, 2 — 900 мксек на деление.

Обращает на себя внимание удлинение положительной фазы сжатия у треугольного импульса давления по мере проникновения волны в глубь двухфазной среды. В нижней части трубы волна имеет период постоянного среднего давления и наблюдается отражение с повышением среднего давления почти в 3–4 раза. На фиг. 4 построен график изменения перепада давления на переднем фронте проходящей волны по длине трубы в двухфазной среде (кривая 1 —  $\beta=2.8\%$ , кривая 2 —  $\beta=10.7\%$ ). Так же как и в сферическом случае, отмечается убывание перепада давления на фронте ударных волн в двухфазной среде, возрастающее с увеличением концентрации пузырьков. Точки 1, 2 получены в системе с пузырьками азота и двуокиси углерода. Различие в теплофизических свойствах газа не сказывается на процессе затухания волн в двухфазной среде.

**3. Обсуждение результатов.** На основе анализа полученных зависимостей перепада давления от расстояния может быть найдена связь между величиной перепада давления на ударном фронте, весом заряда и расстоянием известной концентрации пузырьков газа в жидкости. Единой универсальной зависимости для всех значений  $\beta=2.3$ –26% не установлено. Экспериментальные данные можно обобщить следующими соотношениями для случая сферических ударных волн:  $\Delta p = k M^n r_0^{-m} l^{-q}$ . Если  $\Delta p$  в  $n/m^2$ , то для сферического случая при  $\beta=2.3\%$   $k=1.75 \cdot 10^{11}$ ,  $n=1.72$ ,  $m=0.72$ ,  $q=5.16$ ; при  $\beta=16.6\%$   $k=3.2 \cdot 10^8$ ,  $n=1.4$ ,  $m=0.4$ ,  $q=4.17$ , при  $\beta=26\%$   $k=10^8$ ,  $n=1.13$ ,  $m=0.13$ ,  $q=3.4$ . Для плоского случая при  $\beta=2.8\%$   $k=1.37 \cdot 10^{10}$ ,  $n=1.07$ ,  $m=0.07$ ,  $q=1.07$ .

Представленные соотношения справедливы при  $l=(20-40)r_0$  и  $M=1 \div 6$  г. В этих соотношениях  $l$  в м,  $M$  в кг.

Напомним, что в воде интенсивность сферической ударной волны убывает:  $\Delta p = 550 (M^{1.33} l^{-1})^{1.13}$  [4, 5]. Здесь  $M$  в кг,  $l$  в м,  $\Delta p$  в бар.

Зависимость для плоской ударной волны в трубе справедлива на расстоянии 0.240–1 м от центра взрыва. Легко убедиться на примере представленных соотношений, что уменьшение перепада давления на фронте ударных волн в двухфазной среде происходит быстрее, чем в жидкости.

Полученные результаты означают, что при взрыве заряда ВВ в двухфазной среде формирование ударной волны имеет ряд особенностей. Прежде всего различие следует искать в поведении газового пузыря продуктов взрыва в двухфазной среде. Если в сплошной жидкости изучены все особенности колебаний газовой полости после взрыва, то для случая двухфазной среды таких исследований, по-видимому, не проводилось. Подробный анализ разделения полной энергии, переходящей в ударно-

волновую энергию и энергию пузыря, может прояснить особенности формирования ударных волн в двухфазной среде газ — жидкость.

Влияние начального давления на процесс затухания ударных волн в двухфазной среде требует дополнительной проверки. Для окончательной оценки демпфирования ударных волн в двухфазной среде следует выполнить измерения импульса давления в ударной волне и удельного потока энергии.

Авторы благодарят С. В. Хомика за помощь в проведении опытов, а Р. И. Нигмагулина за конструктивное обсуждение результатов работы.

Поступила 17 V 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М., «Недра», 1974.
2. Jensen F. B. Response of an air bubble in water to a shock wave. Danish Center Appl. Mech. Rept No. 49, 1973.
3. Рейнгард Д. С., Персон Д. Взрывная обработка металлов. М., «Мир», 1966.
4. Коул Р. Подводные взрывы. М., Изд-во иностр. лит., 1950.
5. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов из ТЭН малого веса. ПМТФ, 1960, № 2, стр. 124—127.
6. Адушкин В. В. О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе. ПМТФ, 1963, № 5, стр. 107—114.
7. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р., Кузнецов В. В., Малых М. В. Экспериментальное исследование ударных волн в жидкости с пузырьками газа. Сб. «Волновые процессы в двухфазных средах» под ред. С. С. Кутателадзе. Новосибирск, 1975, стр. 54—97.

УДК 532.72

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ В ДИФфуЗИОННОМ СЛЕДЕ ЧАСТИЦЫ, ОБТЕКАЕМОЙ СТОКСОВЫМ ПОТОКОМ

А. Д. ПОЛЯНИН

(Москва)

Задача о стационарной конвективной диффузии к твердой сферической частице, находящейся в стоксовом потоке, в приближении диффузионного пограничного слоя рассмотрена в [1]. Область задней критической точки, в которой пограничное решение непригодно, исследована в [2, 3].

При исследовании диффузионного взаимодействия нескольких частиц в потоке жидкости (например, двух сфер с общей осью, направленной по потоку) необходимо знать распределение концентрации в области малых углов за телом, задающее условие натекания для следующей частицы.

В данной работе получено решение задачи о распределении концентрации в диффузионном следе сферической частицы. Показано, что концентрация на оси растет пропорционально корню квадратному из расстояния до ее поверхности.

В предположении полного поглощения диффундирующего вещества на поверхности частицы и постоянной концентрации вдали от нее запишем в сферической системе координат безразмерное уравнение конвективной диффузии и граничные условия

$$v_r \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial c}{\partial \theta} = \varepsilon^3 \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial c}{\partial \theta} \right) \right\}$$

(1)

$$c|_{r=1} = 0, \quad c|_{r \rightarrow \infty} = 1 \quad (\varepsilon^{-3} = P = aU/D)$$

$$v_r = \left( 1 - \frac{3}{2r} + \frac{1}{2r^3} \right) \cos \theta, \quad v_\theta = - \left( 1 - \frac{3}{4r} - \frac{1}{4r^3} \right) \sin \theta$$

Здесь  $c = c^*/c_0$ ,  $r = r^*/a$ ,  $c^*$  — концентрация вещества в потоке,  $c_0$  — концентрация на бесконечности,  $a$  — радиус сферы,  $U$  — скорость потока на бесконечности,  $D$  — коэффициент диффузии,  $P$  — число Пекле.

Асимптотический анализ задачи (1) показывает, что при  $\varepsilon \rightarrow 0$  вблизи поверхности частицы в потоке можно выделить шесть областей с различным механизмом массопереноса [2, 3], которые схематически показаны на фиг. 1. Это внешняя область