

Другими словами, при переходе через критическую точку из области однородного состояния вещества в двухфазную область скорость звука уменьшается скачком.

Скачок скорости звука на кривой фазового равновесия может быть измерен на опыте, в частности, способ, описанный в работе [2], позволяет измерять скорость c^- , а в работе [3] величину скорости c^+ и c^- . Определив на опыте величину скачка скорости звука в критической точке, можно при помощи соотношения (6) вычислить величину скачка теплоемкости c_v в критической точке, а также значение производной $(d^3d/\partial v_*^3)_T$. Таким образом, измерение скорости звука может дать ценные сведения о свойствах вещества в критической точке.

Поступила 15 II 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Кричевский П. Р., Хазанова Н. Е. Критические явления. ЖФХ, 1955, т. 29, № 6.
2. Авдонин В. И., Новиков И. И. Скорость звука на кривой фазового равновесия пар-жидкость. Скорость звука в насыщенном водяном паре. ПМТФ, 1960, № 1.
3. Новиков И. И., Трелин Ю. С. Скорость звука на кривой фазового равновесия пар-жидкость. Скорость распространения звука в насыщенных парах двуокиси углерода. ПМТФ, 1960, № 2.

О ВОЗНИКНОВЕНИИ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ

М. А. Цикулин

(Москва)

Воздушная ударная волна, которая образуется при подводном взрыве над поверхностью воды, исследовалась ранее экспериментально [1]. Авторы работы [1] установили, что зависимость давления воздушной ударной волны от расстояния до эпицентра взрыва вблизи поверхности воды в практически важном диапазоне ($r/r_0 < 100$, где r — расстояние от эпицентра взрыва, r_0 — радиус заряда) отвечает цилиндрической симметрии явления, связанной с вертикальным подъемом водяного купола. Преломленная волна в воздухе, образующаяся в результате выхода ударной волны в воде на свободную поверхность, имеет очень малую амплитуду и не рассматривается. Возникновение ударной волны в воздухе связывается с движением выброшенной взрывом воды — водяного купола. При небольшом заглублении заряда (меньше 3—4 r_0) поверхность воды имеет начальную скорость, значительно превышающую скорость звука в воздухе, и может служить источником ударной волны.

На начальной стадии подъема купол представляет собой сплошной слой воды [2], поэтому ударная волна при подводном взрыве аналогична ударной волне, образующейся около тел,двигающихся в газе со сверхзвуковой скоростью. Такая аналогия в данном конкретном случае справедлива, по-видимому, как первое приближение.

Представляет интерес применить к явлению возникновения воздушной ударной волны при подводном взрыве результаты, которые получены при исследовании параметров ударной волны, образующейся около тупоносых тел, обтекаемых сверхзвуковым потоком газа [3]. Действие переднего тупого конца тела эквивалентно действию цилиндрического взрыва. Параметры ударной волны определяются характерным масштабом цилиндрического взрыва λ . Для случая движения в воздухе тела с головкой, близкой по форме к полусферической

$$\lambda = Md \quad (1)$$

где M — число Маха набегающего потока, d — диаметр тела.

Избыточное давление на фронте волны Δp определяется эмпирической формулой

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{0.24}{\xi^2} + \frac{0.48}{\xi^{3/4}} \quad \left(\xi = \frac{r}{\lambda} \right) \quad (2)$$

Здесь p_0 — давление невозмущенного газа.

При обтекании осесимметричных тел потоком газа с большой сверхзвуковой скоростью соблюдается закон плоских сечений, из которого следует, что в каждой плоскости, перпендикулярной оси тела, процесс происходит независимо и соответствует

действию эквивалентного поршня в данной плоскости. Параметры воздушной ударной волны, возникающей при подводном взрыве, измерены непосредственно у поверхности воды на различных расстояниях от эпицентра взрыва [1]. По закону плоских сечений эти параметры соответствуют действию водяного купола на ранней стадии его развития до момента полного развития султана.

Сравнение экспериментальных зависимостей давления в воздушной ударной волне от расстояния по [1] с формулой (2) показывает, что экспериментальные зависимости в пределах точности измерений совпадают с зависимостью (2). Это выражается в том, что значения λ при взрыве данного заряда на данной глубине во всем диапазоне расстояний $r/r_0 < 100$ сохраняются постоянными. Приводим значения $\lambda = \lambda_1$ с точностью $\pm 10\%$ в случае взрывов на различной глубине H/r_0 зарядов тротила 100 кг при $r_0 = 25$ см и значения $\lambda = \lambda_2$ в случае взрывов зарядов ТЭН 0.2 г при $r_0 = 0.3$ см:

| $H/r_0 =$ | 1 | 2 | 3 | |
|---------------|------|-----|-----|----|
| $\lambda_1 =$ | 12.0 | 7.5 | 4.0 | м |
| $\lambda_2 =$ | 12.5 | 7.5 | 4.7 | см |

Таким образом, зависимость от расстояния давления воздушной ударной волны при подводном взрыве [1] в пределах точности измерений совпадает с зависимостью от расстояния давления в волне цилиндрической симметрии (2).

Для определения величины λ непосредственно по параметрам водяного купола были обработаны экспериментальные материалы — результаты фотографирования начальной стадии подъема водяного купола аппаратом СКС (взрыв зарядов тротила 100 кг $r_0 = 25$ см) и на приборе СФР с тепловосъемной установкой (взрыв зарядов ТЭН 0.2 г $r_0 = 0.3$ см). Материалы были любезно предоставлены автору В. Н. Костюченко и Н. Н. Симоновым.



Фотография водяного купола и воздушной ударной волны при подводном взрыве заряда ТЭН 0.2 г на глубине $H/r_0 = 2$ в момент времени $t = 20$ мксек

Таблица

| Заряд | $\frac{H}{r_0}$ | t мксек | V м/сек | d , см | $\lambda = Md$, см |
|-----------------------------|-----------------|--------------|--------------|----------|------------------------|
| тротильный $r_0 = 25$ см | 2 | 780 | 2 400 | 90 | 640 |
| | | 1 320 | 1 400 | 150 | 620 |
| | 3 | 860 | 1 100 | 120 | 390 |
| | | 1 740 | 870 | 170 | 440 |
| | | 2 660 | 750 | 220 | 480 |
| | | 3 240 | 700 | 240 | 490 |
| 4 400 | 650 | 280 | 530 | | |
| ТЭН $r_0 = 0.3$ см | 1 | 6 | 2 200 | 1.95 | 12.5 |
| | | 10 | 1 900 | 2.4 | 13.5 |
| | 2 | 6 | 1 400 | 1.45 | 6.0 |
| | | 10 | 1 350 | 1.75 | 7.0 |
| | | 14 | 1 300 | 2.0 | 7.6 |
| | | 18 | 1 240 | 2.15 | 7.8 |
| | | 22 | 1 180 | 2.25 | 7.8 |
| | | 26 | 1 120 | 2.35 | 7.7 |
| | 30 | 1 080 | 2.6 | 8.3 | |
| | 3 | 6 | 790 | 1.6 | 3.7 |
| | | 10 | 790 | 1.65 | 3.8 |
| | | 14 | 700 | 1.65 | 3.5 |
| | | 18 | 700 | 1.75 | 3.6 |
| | | 22 | 760 | 1.8 | 4.0 |
| | 26 | 790 | 1.95 | 4.5 | |

Измерены скорость подъема верхней точки купола V в м/сек и диаметр купола d в см, взятый между точками перегиба кривой, описывающей форму купола (фигура). При подсчете числа M скорость звука в воздухе принималась равной 340 м/сек. Измерения проведены до момента образования шейки султана. Измеренные значения даны с точностью $\pm 10\%$.

Как видно из табл. и приведенных выше данных значения параметра λ , определенные независимо двумя способами — по значениям скорости подъема купола и его диаметра и по зависимости давления в ударной волне от расстояния — в пределах точности измерений совпадают между собой. Это подтверждает точку зрения, что воздушная ударная волна при подводном взрыве образуется в основном в результате движения со сверхзвуковой скоростью верхней части водяного купола. Параметры воздушной волны у поверхности воды соответствуют скорости движения и диаметру купола на начальной стадии развития. Давление в воздушной ударной волне при подводном взрыве может быть подсчитано по формулам (1) и (2). Зависимость давления в ударной волне от расстояния в координатах $\Delta p/p_0 = f(\xi = r/\lambda)$ для взрывов различных по величине зарядов на различной глубине выражается одной формулой (2). Подобие явления осуществляется по величине $\lambda = Md$, определенной по значениям скорости подъема купола и его диаметра на начальной стадии его развития.

Следует отметить, что при постоянной относительной глубине взрыва H/r_0 величина λ пропорциональна радиусу заряда r_0 , так что на одинаковых относительных расстояниях от эпицентра взрыва r/r_0 наблюдается одинаковое давление воздушной ударной волны. Это согласуется с законом подобия при подводном взрыве [2]: начальная скорость подъема водяного купола зависит только от относительной глубины взрыва H/r_0 , а геометрические размеры явления, в частности диаметр купола, при постоянном H/r_0 в момент времени t/r_0 пропорциональны радиусу заряда r_0 .

Автор выражает благодарность В. Н. Костюченко и Н. Н. Симонову за предоставленную возможность ознакомиться с экспериментальными материалами и ценные советы при обсуждении темы работы.

Поступила 1 XII 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Костюченко В. Н. и Симонов Н. Н. Экспериментальное исследование воздушной ударной волны при подводном взрыве в мелком водоеме. ПМТФ, 1960, № 1.
2. Заонегин В. Л., Козаченко Л. С., Костюченко В. Н. Экспериментальное исследование развития газового пузыря и султана при подводном взрыве. ПМТФ, 1960, № 2.
3. Цикликин М. А. К взрывной аналогии при сверхзвуковом обтекании тел. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, 1961, № 1.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВОДЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Н. М. Кузнецов

(Москва)

Вследствие сложного характера зависимости термодинамических функций воды от температуры и плотности до сих пор не получено даже эмпирическим путем единого аналитического уравнения, описывающего состояние воды при больших и малых плотностях, низких и высоких температурах.

Имеющиеся уравнения состояния применимы в сравнительно малых интервалах термодинамических параметров, причем большая часть из этих уравнений представляет собой математические интерполяции экспериментальных данных, выполненные с заданной, иногда весьма высокой, точностью. Однако имеются практические задачи, для решения которых в настоящее время нет необходимости применять весьма точное уравнение состояния, в то же время оно должно применяться в широком интервале термодинамических параметров, включая такие значения температур и плотностей, для которых пока нет достаточно достоверных экспериментальных данных.

1. Уравнение состояния воды. Если не требовать высокой точности, то можно получить единое уравнение состояния воды для достаточно большого диапазона температур и плотностей. Будем искать уравнение состояния воды в виде

$$p = p_0(\rho) + \frac{R\rho T f(\rho)}{\mu} \quad (1.1)$$