

ЖИДКОСТЬ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА КАК ПРИМЕР СРЕДЫ КОРТЕВЕГА – ДЕ ВРИЗА – БЮРГЕРСА

В.В.Кузнецов, В.Е.Шагоряков, Б.Г.Покусеев
И.Р.Шрейбер

Экспериментально показано, что начальный импульс в жидкости с пузырьками газа эволюционирует в соответствие с уравнением Кортевега – де Вриза – Бюргерса. За счет подбора безразмерных комплексов, характеризующих процесс, удалось наблюдать распространение сигнала в форме монотонных и осцилляторных ударных волн, солитонов и волновых пакетов.

Уравнение для возмущения скорости смеси жидкости с пузырьками, полученное в приближении БКВ в [1, 2]

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sigma^2} \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} = 0 \quad (1)$$

$u = V/a$ – безразмерная скорость возмущения. В случае объемных газосодержаний $\phi > 10^{-3}$ связь между V и истинным возмущением скорости v в смеси имеет вид:

$$V = \left[1 + \frac{\gamma + 1}{2\phi_0} \right] v, \quad \text{где } \gamma - \text{показатель}$$

адиабаты газа; a – амплитуда начального возмущения, $\tau = at/l_0$ – безразмерное время, l_0 – ширина начального возмущения; $\xi = (x - c_0 t)/l_0$ –

координата; c_0 — скорость звука; $Re = \alpha l_0 / \nu$, ν — коэффициент эффективной вязкости смеси, обусловленный вязкими, акустическими и тепловыми потерями при пульсациях одиночных включений; $\sigma = (\alpha/\beta)^{0,5} l_0$ — безразмерный комплекс, характеризующий соотношение между шириной возмущения, величиной дисперсии и уровнем возмущения (нелинейностью), $\beta = R_0^2 c_0 / 6\phi_0 (1 - \phi_0)$, где R_0 — радиус равновесного пузырька. Уравнение для безразмерного возмущения давления имеет аналогичный вид.

Известно [3], что при $Re^{-1} \ll 0$, существует такое $\sigma = \sigma_c$, что уравнение (1) меняет характер решения. При $\sigma > \sigma_c$ решением уравнения (1) являются уединенные волны, а при $\sigma \ll \sigma_c$ — волновые пакеты. Наличие диссипации в газожидкостной среде несколько меняет ситуацию — при $Re^{-1} \neq 0$ уравнение (1) в качестве решения содержит ударные волны с осциллирующей или монотонной структурой, в зависимости от соотношения σ/Re . В случае $\sigma/Re \ll 1$ при $\sigma \ll \sigma_c$ можно ожидать, что начальное возмущение трансформируется в волновой пакет.

Для выяснения характера распространения возмущений в газожидкостной смеси в области малых $\sigma \ll \sigma_c$ и промежуточной $\sigma \sim \sigma_c$ были проведены эксперименты на установке, описанной в [4], представляющей собой типичную ударную трубу для газожидкостной смеси. Существенное уменьшение σ по сравнению с ранее проведенными работами достигалось уменьшением протяженности начального возмущения за счет сокращения объема камеры высокого давления. По длине рабочего участка на расстоянии L от входа сигнала в среду размещались пьезодатчики. Эксперименты проводились с пузырьками CO_2 и He, что позволило изменить число Re на порядок величины за счет ν . В качестве рабочей жидкости использовался водоглицериновый раствор с плотностью $1,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Отметим, что изменения параметра σ можно добиться также вариацией начальной амплитуды возмущения. Ограничениями на параметры экспериментов являлись условия приближения БКВ — небольшая амплитуда и большие длины возмущений, включающие в себя достаточное количество пузырьков.

Величина σ_c может быть определена с помощью метода, предложенного в [3]. Для начального возмущения в виде треугольника рис. 1, a , $\sigma_c = 14$.

На рис. 1 приведены характерные осциллограммы возмущений давления для CO_2 , а в табл. 1 основные характеристики возмущения и среды.

Т а б л и ц а 1

Рис.	L, M	σ	σ/Re	Характеристика сигнала
1, а	0	12,1	—	начальный импульс
1, б	0,6	—	0,05	ударная волна
1, в	1,4	52,8	0,015	многосолитонное возмущение
1, г	1,4	30	0,021	двухсолитонное возмущение
1, д	0,6	12,1	0,034	одиночный солитон
1, е	0,6	3,4	0,071	волновой пакет

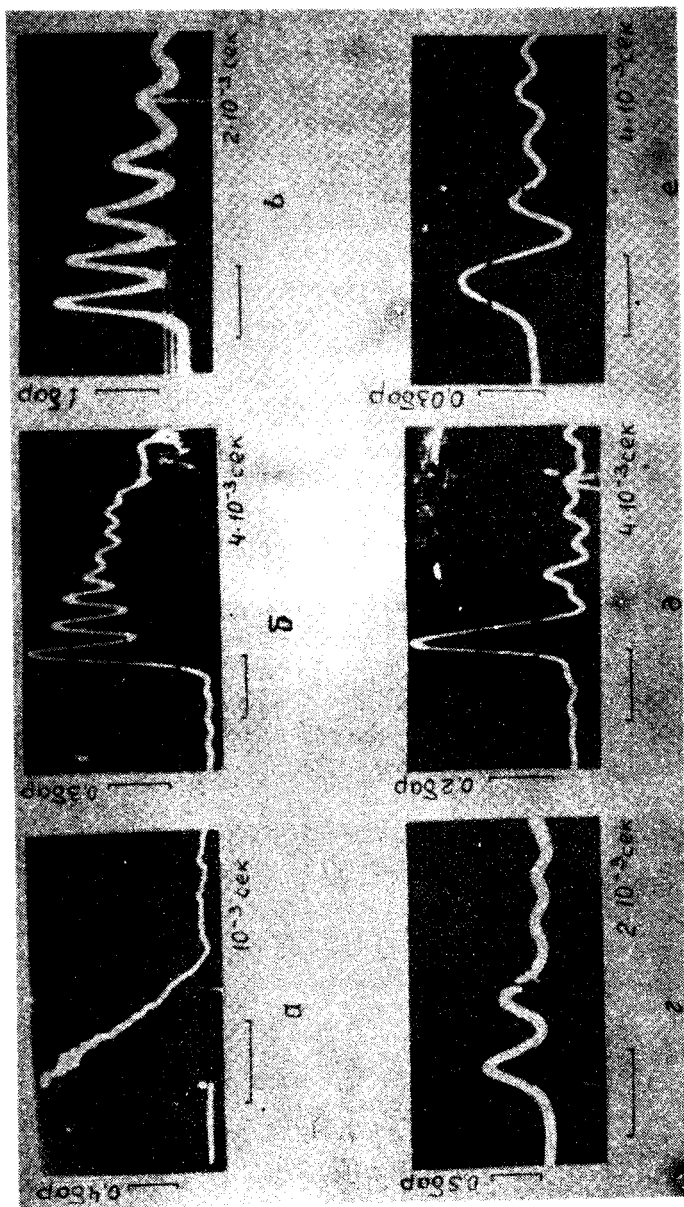


Рис. 1. Эволюция возмущения давления в жидкости с пузырьками CO_2

Отношение параметра подобия к числу Рейнольдса существенно меньше единицы, и развитие процесса хорошо соответствует основным выводам теории уравнения Кортевега – де Вриза. При $\sigma < \sigma_c$ возмущение распространяется в виде волнового пакета (рис. 1, *e*), при $\sigma > \sigma_c$ начальный импульс распадается на солитоны. Количество солитонов находится в полном соответствии с величиной параметра дисперсии.

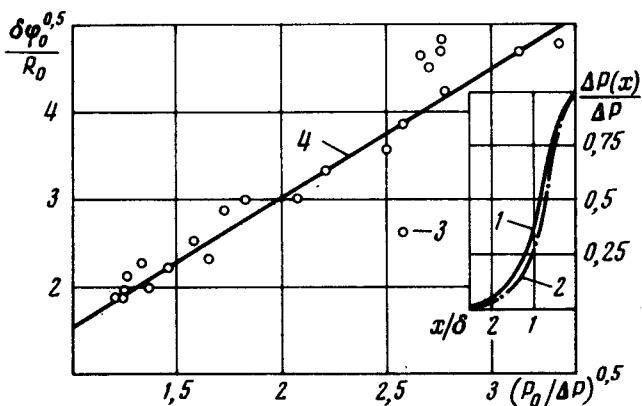


Рис. 2. Зависимость полуширины солитона от его амплитуды

Форма солитона описывается зависимостью:

$$\Delta P(x) / \Delta P = \operatorname{sech}^2(x / \delta) \quad (2)$$

полуширина солитона δ определяется формулой

$$\delta = \left(\frac{4\gamma}{\gamma + 1} \right)^{0,5} \frac{R_0}{\varphi_0^{0,5}} \left(\frac{P_0}{\Delta P} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где ΔP – амплитуда возмущения давления, P_0 – начальное давление в среде.

Проверка зависимостей (2), (3) проведена на рис. 2. Здесь приведены данные по сопоставлению формы солитона из опыта 1, *d* с расчетом по формуле (2), а данные по зависимости ширины солитона от его амплитуды сравнены с расчетом по (3). На рис. 3 приведены осциллограммы, характеризующие эволюцию треугольного импульса в случае, когда параметр σ / Re достаточно велик. Данные к осциллограммам приведены в табл. 2. Образовавшийся солитон рис. 3, *a, б* стремится расплыться – приобрести форму "бюргерского треугольника".

Т а б л и ц а 2

Рис.	L, M	σ	σ / Re
3, <i>a</i>	0,6	13,1	0,21
3, <i>б</i>	1,4	13,1	0,21
3, <i>в</i>	0,6	2,2	0,46
3, <i>г</i>	1,15	2,2	0,46

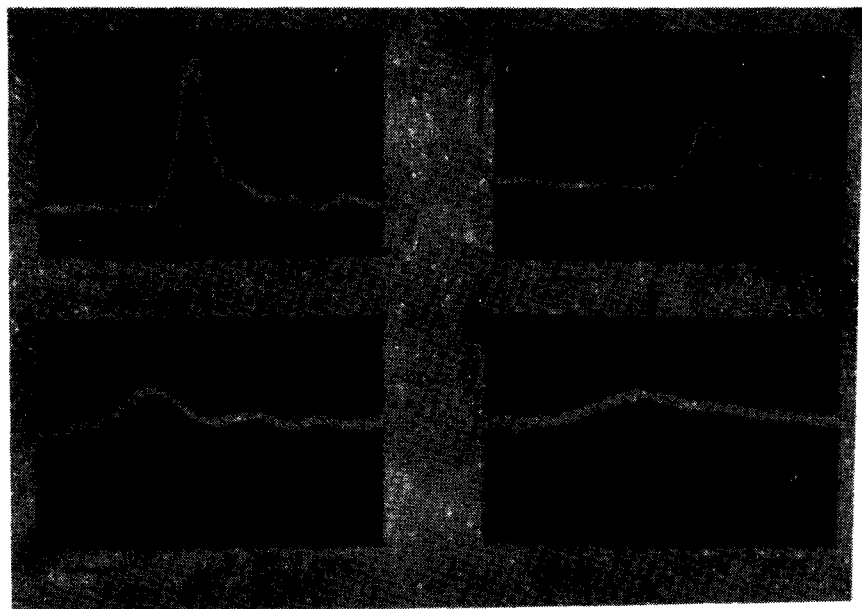


Рис. 3. Эволюция одиночного солитона a , b и волнового пакета v , z , в жидкости с пузырьками He

При малых значениях параметра σ (рис. 3, v , z) образование волнового пакета лишь намечается и начальный импульс расплывается, по-видимому, в соответствии с решением линейного уравнения Бюргера.

Результаты работы могут быть использованы при анализе процессов динамики прохождения волн через двухфазные среды и моделировании процессов в плазме с помощью процессов в газожидкостных средах.

Институт теплофизики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
12 января 1976 г.

Литература

- [1] В.Е.Накоряков, В.В.Соболев, И.Р.Шрейбер. Изв. АН СССР, МЖГ, №5, 71, 1972.
- [2] L. van Wijngaarden. Annual review of fluid mechanics, v. 4, Annual Review Inc., Palo Alto, 369, 1972.
- [3] Ю.А.Березин, В.И.Карпман. ЖЭТФ, 51, 1557, 1966.
- [4] Волновые процессы в двухфазных системах. Сб. под ред. чл.-корр. АН СССР Кутателадзе С.С., Новосибирск, 1975.