

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛИТОНОВ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА

В. В. Кузнецов, В. Е. Накоряков, Б. Г. Локусаев

В жидкости с пузырьками газа экспериментально исследовано взаимодействие двух солитонов, движущихся навстречу друг другу или один за другим. Показано, что при столкновении солитоны взаимодействуют как линейные волны, а в случае обгона одного солитона другим наблюдаются различные виды их нелинейного взаимодействия.

В [1, 2] на основе численных и физических экспериментов было показано, что начальное возмущение давления в жидкости, содержащей пузырьки газа, эволюционирует в соответствии с уравнением Бюргера – Кортевега – де Вриза (БКВ)

$$P_\tau + PP_\xi - \text{Re}^{-1}P_{\xi\xi} + \sigma^{-2}P_{\xi\xi\xi} = 0. \quad (1)$$

При некоторых параметрах возмущения (амплитуды, ширины) и среде (радиусе пузырьков – R_0 , объемном газосодержании – ϕ_0 , теплофизических свойствах газа в пузырьках) таких, что $\sigma/\text{Re} \ll 1$ и $\sigma \sim \sigma_0$, в среде формируется уединенная волна – солитон, форма которого описывается зависимостью

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

где ΔP – амплитуда возмущения давления, δ – полуширина солитона, x – продольная координата.

Такое развитие процесса находится в полном соответствии с решением уравнения КДВ, в которое переходит (1) при $\text{Re}^{-1} = 0$.

В последние годы солитоны активно изучаются в ряде областей физики применительно к средам, в которых проявляются эффекты нелинейности и дисперсии [3 – 5]. Этот интерес объясняется рядом замечательных свойств солитонов, которые проявляются, например, при их взаимодействии. С другой стороны такие процессы позволяют выявить нелинейные, дисперсионные и диссипативные свойства среды.

С целью изучения характера взаимодействия солитонов в жидкости с пузырьками газа (CO_2) при $\sigma/\text{Re} \ll 1$ были проведены эксперименты на установке типа "ударная труба" [2].

Два солитона формировались в среде путем последовательного синхронизированного по времени разрыва диафрагм двух камер высокого давления, расположенных одна за другой в верхней части трубы. Подбирая параметры солитонов и среды, можно было наблюдать попутное взаимодействие этих солитонов на расстояниях 1 – 2 м от входа импульсов в среду, а также встречное взаимодействие между вторым по ходу солитоном и первым, отразившимся от нижнего торца камеры низкого давления.

По длине рабочего участка на расстоянии L от входа сигнала в среду размещались пьезодатчики.

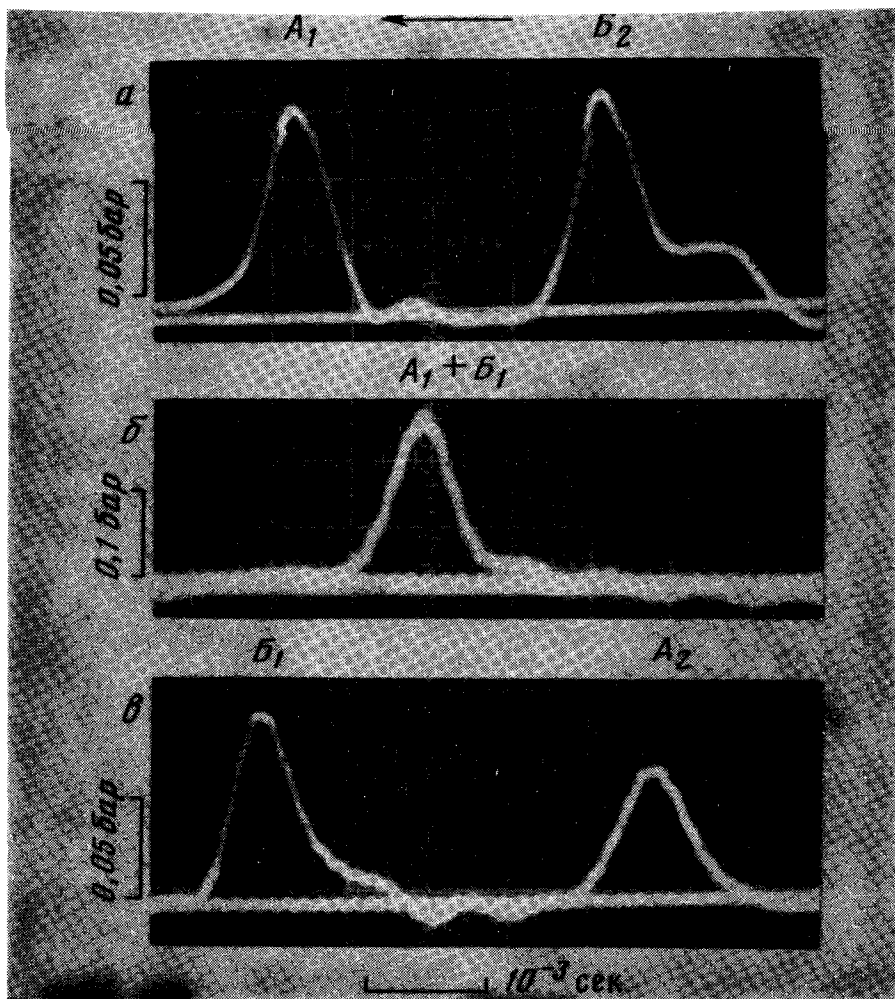


Рис. 1. Встречное взаимодействие двух солитонов: $a - L = 0,7 \text{ м}$, $б - L = 0,91 \text{ м}$, $\phi_0 = 1,4 \cdot 10^{-2}$, $R_0 = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,
 $в - L = 1,11 \text{ м}$

Процесс встречного взаимодействия иллюстрируется на рис. 1, где показаны как стадии полного слияния начальных импульсов A_1 и B_1 (рис. 1, *a*) в один импульс (рис. 1, *б*), так и их последующий разбег (рис. 1, *в*). В результате взаимодействия двух солитонов, соответственно с амплитудами ΔP_1 (A на рис. 1, *a*) и ΔP_2 (B на рис. 1, *a*) образуется некоторое возмущение с амплитудой ΔP (рис. 1, *б*), по форме не совпадающее с формой солитона (2). Как видно из рис. 2, в момент наложения солитонов их амплитуды адитивно складываются согласно поведению линейных волн, и результаты опытов описываются зависимостью $\Delta P_c = \Delta P_1 + \Delta P_2$ (линия 3 на рис. 2). Единственным результатом их нелинейного взаимодействия, как известно [4, 5], является сдвиг фаз возмущений. Однако, для волн малой амплитуды величина этого сдвига не превышала точно-

ти наших измерений, что не позволило нам получить количественные результаты по сдвигу фаз. Описанный выше характер взаимодействия соответствует численным решениям Буесинеска [6] и экспериментам работы [5].

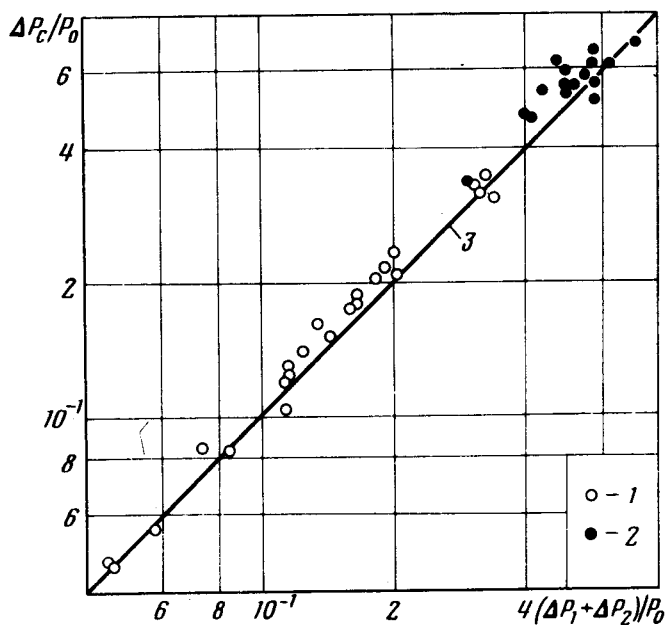


Рис. 2. Амплитуда давления в момент слияния двух солитонов: $L = 0,7$ м, 1 - $R_0 = 1,15 \cdot 10^{-3}$ м, $\phi_0 = 1,4 \cdot 10^{-2}$ м, 2 - $R_0 = 1,4 \cdot 10^{-3}$, $\phi_0 = 0,9 \cdot 10^{-2}$.

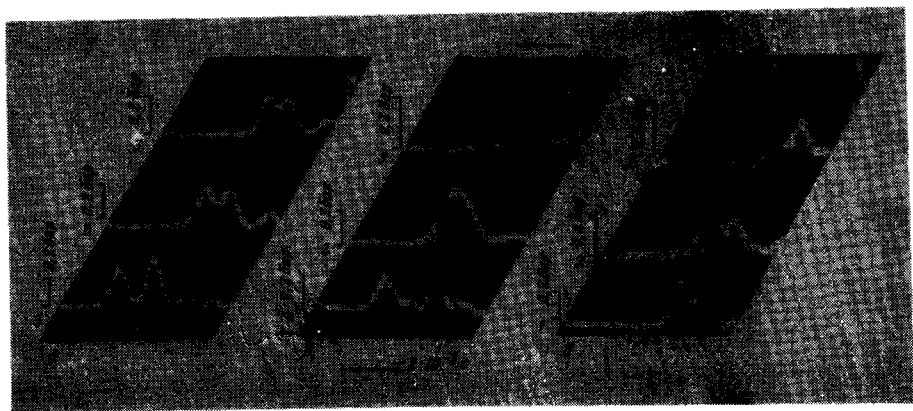


Рис. 3 Взаимодействие солитонов при обгоне одного солитона другим: для $L = 0,14$ м, $R_0 = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м, $\phi_0 = 1,4 \cdot 10^{-2}$: а - $\Delta P_2/\Delta P_1 = 1,3$; 1 - $L = 0,14$ м, 2 - 1,05 м, 3 - 1,3 м; б - $\Delta P_2/\Delta P_1 = 2,5$; 1 - $L = 0,14$ м, 2 - 1,55, 3 - 1,8 м; в - $\Delta P_2/\Delta P_1 = 1,85$; 1 - $L = 0,14$ м, 2 - 1,55, 3 - 1,8 м

Для попутного взаимодействия, когда солитон с бóльшей амплитудой догоняет солитон с меньшей амплитудой, характерно их нелинейное взаимодействие. Для возмущений с близкими амплитудами полного их слияния, как в случае лобового столкновения, не происходит. Возмущения сближаются до момента выравнивания их амплитуд (рис. 3, а); в дальнейшем амплитуда переднего солитона (первоначально меньшего) увеличивается, и возмущения разбегаются.

С увеличением отношения амплитуд минимальное расстояние, на которое сближаются солитоны, уменьшается, и при значении $\Delta P_2 / \Delta P_1 \approx 2,5$ наступает момент, когда они практически сливаются (рис. 3, б). Это значение несколько отличается от величины 2,62, предсказанной теоретически в [7], вследствие того, что экспериментально трудно определить точно момент полного слияния солитонов. При дальнейшем увеличении отношения амплитуд солитоны взаимодействуют как линейные волны: большой солитон догоняет меньший, они сливаются, а затем распадаются на два солитона, имеющих с учетом затухания первоначальные амплитуды. Отметим, что в опытах при всех амплитудах в результате взаимодействия либо происходил распад на два солитона, либо он намечался и не успевал произойти из-за ограниченности длины рабочего участка (рис. 3, в).

Рассмотренные в работе виды взаимодействий солитонов ранее также исследовались экспериментально в электромагнитных системах [4] и в ионной плазме [6].

Авторы выражают благодарность Г.И.Баренблату за полезное обсуждение проведенной работы.

Институт теплофизики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
1 августа 1978 г.

Литература

- [1] В.В.Кузнецов, В.Е.Накоряков, Б.Г.Покусаев, И.Р.Шрейбер. Письма в ЖЭТФ, 23, 194, 1976.
- [2] V.V.Kuznetsov, V.E.Nakoryakov, B.G.Pokusaev, I.R.Shreiber. JEM 5, 1978.
- [3] Р.З.Сагдеев. Сб. Физики плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, М., изд. АН СССР, IV, 384, 1958.
- [4] Л.А.Островский, В.В.Папко, Е.Н.Пелиновский. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 15, 580, 1972.
- [5] H.Ikezi, R.J.Taylor, P.R.Baker. Phys. Rev. Lett., 25, 11, 1970.
- [6] И.А.Боголюбский. Письма в ЖЭТФ, 24, 184, 1976.
- [7] П.Д.Лэкс. Сб. переводов "Математика", 13, 128, 1969,