

САМОФОКУСИРОВКА МОЩНОГО ЗВУКА ПРИ РОЖДЕНИИ ПУЗЫРЬКОВ

Г. А. Аскарьян

Рождение пузырьков в жидкости под действием мощных звуковых и ультразвуковых волн может значительно увеличить нелинейные процессы рефракции, такие как: самофокусировка, саморасфокусировка, поворот луча и т. п. В наиболее интересных жидкостях (вода) появление пузырьков связано с выделением растворенного газа из-за уменьшения давления в звуковой волне, встряски или небольшого нагрева – факторов, уменьшающих растворимость газа в воде. Появление пузырьков резко увеличивает сжимаемость K воды и уменьшает скорость звука $c_s = 1/\sqrt{K\rho}$

если частота звука ω меньше резонансной частоты пузырька $\omega_r = (1/a)\sqrt{3\gamma p/\rho}$, где a – радиус пузырька, p – давление газа, ρ – плотность жидкости. Действительно, для газа в адиабатическом случае $\partial v/\partial p = v/p$; откуда сразу получим сжимаемость воды при наличии пузырьков $K' = K + (4\pi/3)(Na^3/p)$, где $N(a)$ – концентрация¹⁾ пузырьков радиуса a , и плотность $\rho' = \rho [1 - (4\pi/3)Na^3]$. Поскольку $pK = 10^{-4} \ll 1$, изменением плотности можно пренебречь, поэтому

$$c_s^2 = c_{s_0}^2 / [1 + (4\pi/3y)(Na^3/pK)].$$

В случае малого изменения скорости $c_s \approx c_{s_0} [1 - (2\pi Na^3/3y pK)]$ или $\Delta c_s/c_s \approx -2\pi Na^3/3y pK$; видно, что в этом случае выполняются условия самофокусировки звука, так как концентрация пузырьков обычно больше там, где больше амплитуда звуковой волны $N = N(A_s)$, причем зависимость может быть довольно резкой, когда амплитуда давления порядка атмосферы (например, для обычной воды).

Условия самофокусировки определяются из соотношения компенсации угла расходимости $\theta = \sqrt{\delta c_s/c_s} = \sqrt{Na^3/pK}$; (порог соответствует дифракционной расходимости $\theta_D \sim \lambda_s/D$, где D – диаметр луча). При этом можно обеспечить малое рассеяние звука на пузырьках $\Sigma_s L \sim N 4\pi a^2 (\omega/\omega_r)^4 L \ll 1$ на пути L реализации самофокусировки ($L \sim D/\sqrt{\delta c_s/c_s}$ при запороговых условиях).

Отметим, что если частота звука становится соизмеримой с резонансной частотой пузырька, то измененная скорость

$$1/c_s^2 = 1/c_{s_0}^2 + 4\pi a N/\omega^2 [(\omega_r/\omega)^2 - 1 - ik_a]$$

¹⁾ Для простоты предположим, что расстояние между пузырьками гораздо меньше длины звуковой волны λ_s .

т. е. при $\omega > \omega$, скорость звука увеличивается при наличии пузырьков и должна быть расфокусировка. При $\omega \rightarrow \omega$, нелинейность резко увеличивается, но нарастает и рассеяние звука ($\sigma_{sr} \sim \lambda_s^2 / \pi$). Поскольку рассмотренные выше эффекты зависят от процессов рождения пузырьков, они могут зависеть от очистки и дегазации жидкости от содержания газа, от давления, от пересыщения, от близости жидкости к точке кипения и других параметров, которые могут быть использованы для усиления, ослабления процессов или управления ими. Для длительных процессов может проявиться выведение пузырьков из луча из-за всплыивания или из-за градиента давления луча.

Возможны также различные комбинированные нелинейные эффекты воздействия одного звукового луча на другой или воздействие света на звук и звука на свет через образование пузырьков. (Эти эффекты рассмотрены нами совместно с Т.Г.Рахманиной и будут опубликованы позже).

Рассмотренные нелинейные свойства, связанные с образованием кавитаций могут во много раз превосходить нагревную нелинейность [1], связанную с поглощением звука и обеспечить самофокусировку ультразвуковых и звуковых волн.

Отметим, что при больших амплитудах может проявиться нелинейность колебаний пузырьков и зависимость скорости от амплитуды звука будет определяться не только зависимостью концентрации пузырьков от амплитуды звука,

Рассмотренная пузырьковая нелинейность существенно отличается от нелинейности из-за нагрева при поглощении, которая проявляется лишь для гиперзвука и ультразвука очень высокой частоты.

Для обычного ультразвука и звука поглощение мало, а дифракционная расходимость велика, поэтому нужна большая нелинейность для преодоления расходимости. Именно пузырьковая нелинейность может обеспечить самофокусировку такого излучения ввиду больших значений нелинейности.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 марта 1971 г.

Литература

- [1] Г.А.Аскарьян. Письма в ЖЭТФ, 4, 144, 1966.
-