

ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИОННОЙ СИЛЫ НА ПУЗЫРЬКИ В АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Т.С. КОРЧАГИНА¹⁾, И.Н. ДИДЕНКУЛОВ^{1,2)}, Н.В. ПРОНЧАТОВ-РУБЦОВ¹⁾

¹⁾ ННГУ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО

²⁾ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ РАН

Введение

В работе рассматривается действие радиационной силы на газовые пузырьки. Проанализированы особенности воздействия радиационной силы в слабых и сильных акустических полях.



Слабые поля

В предыдущих работах аналитическими методами было проанализировано движение газовых пузырьков в слабых акустических полях в резонаторах и волноводах с потоком жидкости [1,2,3].

Было показано, что действие радиационной силы приводит к неоднородному периодическому распределению концентрации пузырьков вдоль оси акустического резонатора. В поперечном направлении действие радиационной силы в резонаторах и волноводах приводит к втягиванию маленьких пузырьков (по сравнению с резонансным размером) в область сильного поля (на оси), а больших - к выталкиванию на периферию.

[1] И.Н. Диденкулов, Т.С. Корчагина, Н.В. Прончатов-Рубцов, А.А. Сагачева Распространение звука в суспензиях: вращательные движения частиц и управление потоками // Известия РАН. серия физическая, 2020, том 84, № 6, с. 772–776

[2] Т.С. Корчагина, И.Н. Диденкулов, Н.В. Прончатов-Рубцов Особенности движения газовых пузырьков под действием течения и радиационной силы в акустическом резонаторе // Труды XXII конф. по радиофизике, Н.Новгород, ННГУ, 2018 С.430-433.

[3] Т.С. Корчагина, И.Н. Диденкулов, Н.В. Прончатов-Рубцов Поведение пузырьков в акустическом волноводе с потоком жидкости // Труды XXIII конф. по радиофизике, Н.Новгород, ННГУ, 2019 С 454-457.

Сильные поля

Как изменится движение пузырьков в сильных полях? Для решения этой задачи было рассмотрено уравнение Рэлея-Плессета:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{1}{\rho}\left(-P_g + P_0 + P(t) + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\eta\dot{R}}{R}\right) = 0, \text{ где} \quad (1)$$

R – радиус пузырька, ρ – плотность окружающей жидкости (в нашем случае воды), P_g – давление газов смеси в пузырьке, P_0 – статическое давление, $P(t)$ – внешнее давление (связано с акустической силой), σ – поверхностное натяжение границы пузырька и жидкости, η – кинематическая вязкость жидкости.

Привели уравнение (1) к безразмерному виду с помощью замен: $\tau = \frac{t}{T} = \frac{t\omega}{2\pi}$ – время нормированное на период поля, $r = \frac{R}{R_0}$ – радиус нормированный на начальный.

После несложных преобразований получили уравнение (2) для безразмерных переменных r и τ :

$$rr'' + \frac{3}{2}r'^2 + \frac{(2\pi)^2}{3\gamma} \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \left(-P_g + P_0 + P(\tau) + \frac{2\sigma}{rR_0} + \frac{\omega 4\eta r'}{2\pi r}\right) = 0, \text{ где} \quad (2)$$

ω_0 – резонансная частота пузырька, ω – частота колебаний поля, ' - дифференцирование по τ .

Рассмотрели случай гармонических колебаний акустического давления:

$$P(\tau) = P_a \cos(2\pi\tau - kx) \quad (3)$$

Для давление газов в пузырьке использовалось приближение адиабатического процесса:

$$P_g = P_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma} = \frac{P_0}{r^{3\gamma}}, \text{ где} \quad (4)$$

P_a – амплитуда акустической силы, γ – показатель адиабаты.

Уравнение (2) – нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка решалось численно в матлабе.

Расчеты колебаний пузырьков (рис. 1) использовались для вычисления мгновенной и усредненной по периоду поля радиационной силы (рис. 2) по формуле:

$$F_{\text{рад}} = -\frac{1}{2} \langle V \nabla P^* \rangle, \text{ где} \quad (5)$$

$V=4/3\pi R^3$ – объем пузырька, ∇P^* – градиент поля (комплексно сопряженный).

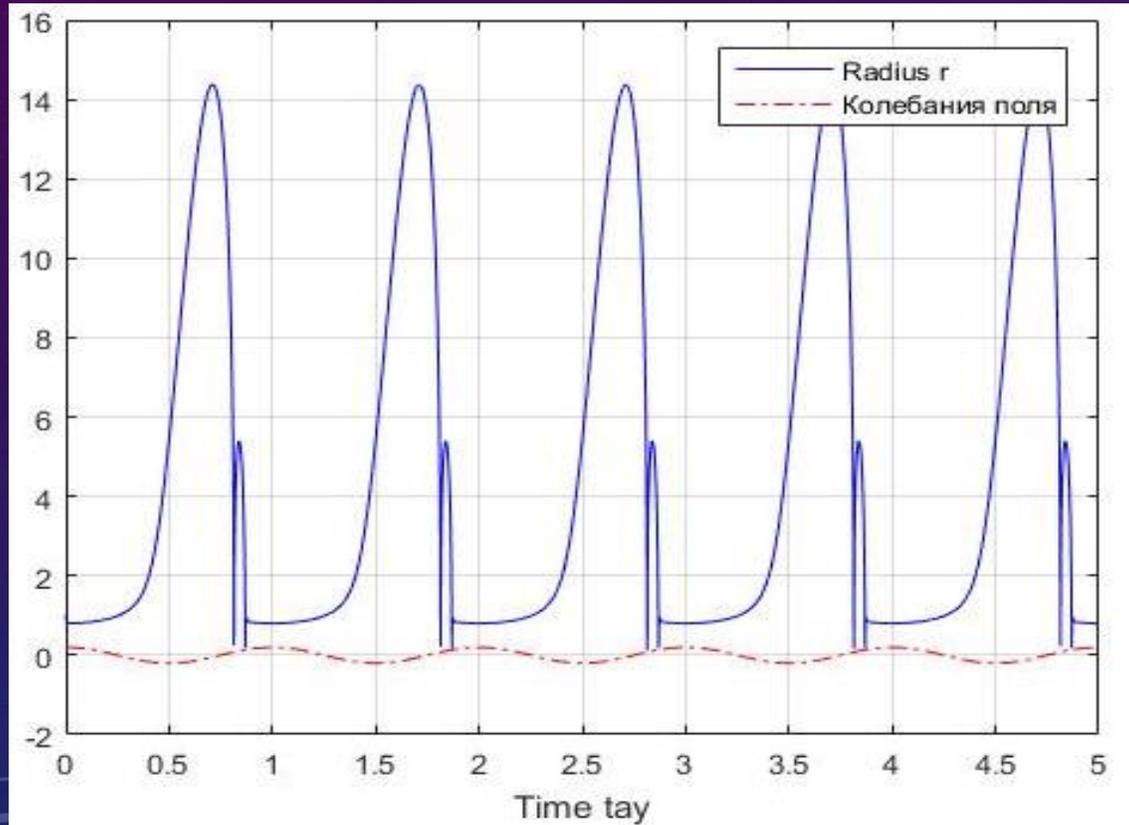


Рис. 1. График $r(\tau)$ для следующих параметров:

$R_0=100$ мкм, $\omega_0=2,05 \cdot 10^5$ рад/с (≈ 30 кГц), $P_0=10^5$ Па, $\frac{\omega}{\omega_0}=45$, $\frac{P_a}{P_0}=1,5$.

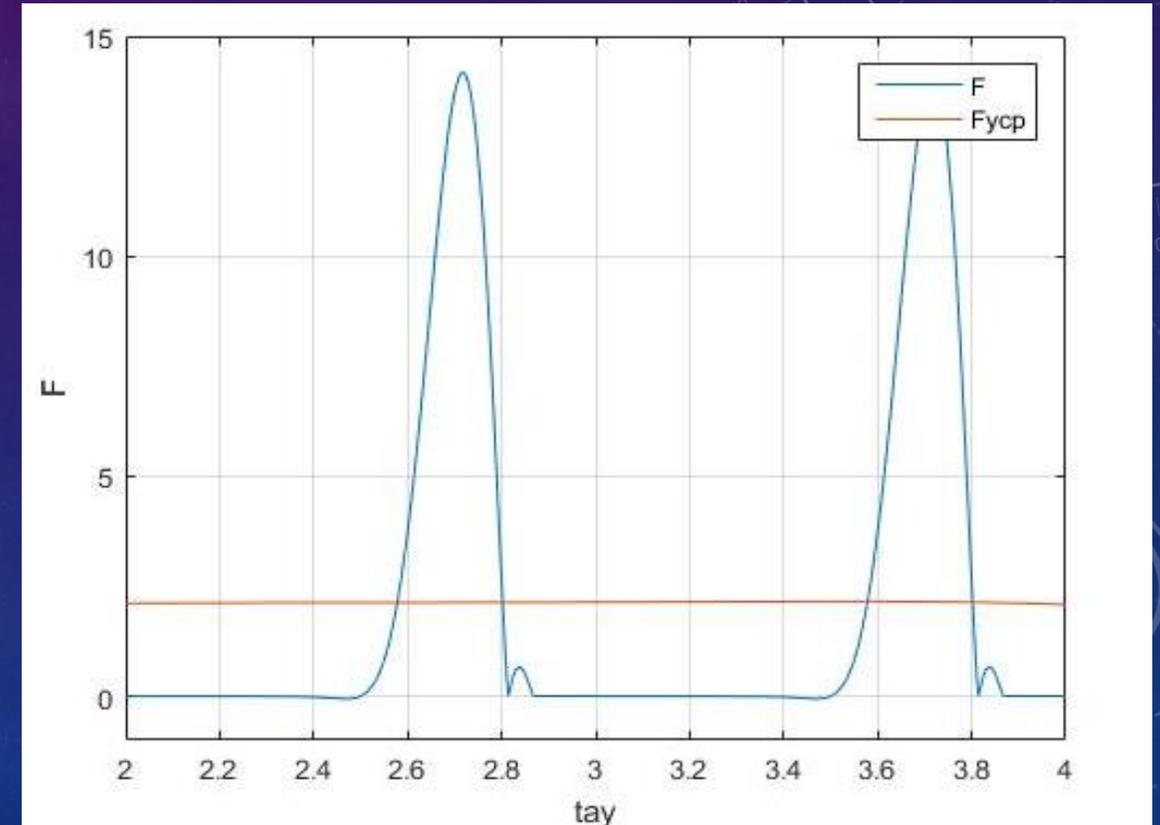


Рис. 2. График зависимости радиационной силы от времени.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены колебания пузырька в слабых и сильных полях.

Построены и проанализированы графики для радиационной силы в случае сильно-нелинейных колебаний пузырька, при этом радиационная сила для сильных колебаний возрастает.