5 [2025]
ISBN 978-5-901722-00-8
ТРАНСПОРТ. ГОРИЗОНТЫ РАЗВИТИЯ

УДК 534.222

ДИНАМИКА КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА В ГАЗОНАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Мельников Николай Павлович[1], доцент, кандидат физико-математических наук
e-mail: kaf_phys@vsuwt.ru
Нюркин Александр Олегович[1], студент
e-mail: sasha_nurkin@rambler.ru

[1] Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В работе рассматривается динамика одиночного кавитационного пузырька, пульсирующего сжимаемой вязкой жидкости, в которой растворен газ, под действием синусоидального однородного акустического поля. Показано, что рост равновесного радиуса пузырька за счет выпрямленной диффузии приводит к его резонансному возбуждению при некоторых значениях равновесного радиуса, а также к изменению характера его пульсации в процессе роста.

Ключевые слова: динамика кавитационного пузырька.

DYNAMICS OF A CAVITATION BUBBLE IN A GAS-SATURATED LIQUID

Nikolay P. Melnikov[1], Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences
e-mail: kaf_phys@vsuwt.ru
Alexander O. Nyurkin[1], Student
e-mail: sasha_nurkin@rambler.ru

[1] Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper considers the dynamics of a single cavitation bubble pulsating with a compressible viscous liquid in which a gas is dissolved under the action of a sinusoidal homogeneous acoustic field. It is shown that the growth of the equilibrium radius of the bubble due to rectified diffusion leads to its resonant excitation at certain values of the equilibrium radius, as well as to a change in the nature of its pulsation during growth.

Keywords: dynamics of the cavitation bubble.

Интенсивное развитие ультразвуковой технологии, гидролокации, рыбопоисковой техники, подводной связи, медико-биологических применений интенсивного ультразвука, повышение требований к быстроходности морских и речных судов и т.д. определяет повышенный интерес к кавитационным явлениям. В частности, кавитация является определяющей в таких технологических процессах с применением мощного ультразвука, как дегазация, кристаллизация, эрозия, диспергирование нерастворимых жидких и твердых

взвесей, способствует инициированию и ускорению ряда химических и биологических реакций, ограничивает предельную мощность акустических преобразователей и скорость вращения гребных винтов и движение обтекаемых жидкостью тел, уменьшает или увеличивает концентрацию дисперсной газовой фазы в жидкостях. Результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований кавитации убедительно показали, что возникновение, характер протекания и интенсивность кавитационных процессов в конечном итоге определяется динамикой одиночного кавитационнго пузырька.

Акустической кавитацией называют сложный комплекс явлений, возникающих при нелинейных пульсациях пузырьков, возникающих в жидкости под действием переменного акустического поля.

Одним из таких явлений является рост газового пузырька, пульсирующего в газонасыщенной жидкости под действием акустического поля. Это явление называют «выпрямленной» или направленной диффузией. Впервые Hsieh D.Y. и Plesset M.S. изложили теорию «выпрямленной» диффузии в [1]. Эта проблема была теоретически разработана многими исследователями и подтверждена экспериментально в работе [2].

Рассмотрим движение одиночного кавитационного пузырька, пульсирующего под действием однородного синусоидального акустического поля в сжимаемой вязкой газонасыщенной жидкости. Система уравнений, описывающая динамику такого пузырька приведена в работе [3]. Расчеты, излученного пузырьком, давления рассчитывались согласно работе [4]. Система уравнений приводилась к безразмерному виду путем замены $R = R/R(0)$, $R_o = R_o/R(0)$, где $R(0)$ – радиус пузырька в момент времени $t = 0$. Безразмерное время $T = t \cdot f$, то есть время измерялось в периодах акустического поля T.

Все расчеты проведены при параметрах акустического поля, приведенных в работе [2]. А именно, амплитуда акустического поля принята равной $P_m = 0.305 \cdot 10^5$ Па, частота $f = 22100$ Гц. Расчеты выполнены для воды при температуре 25°С, с поверхностным натяжением равным 0.072 Н/м, плотностью равной 10^3 кг/м^3, сдвиговой вязкостью постоянной во времени и в пространстве и равной 10^{-3} Па·с. Начальный радиус пузырька принят равным $R_o = 3.5 \cdot 10^{-5}$ м. Объемная концентрация растворенного воздуха равна $2.27 \cdot 10^{-5}$ г/см^3.

Результаты расчетов приведены ниже на Рисунках 1-6. На Рисунке 1 приведены зависимости от безразмерного времени T: безразмерного максимального радиуса пузырька R_+ (кривая 1), равновесного радиуса R_o (кривая 2), минимального радиуса R_-, (кривая 3). Выше каждого резонанса указан его порядок n/m. Зависимость радиуса R_+ от времени показывает, что пузырек по мере роста равновесного радиуса R_o последовательно возбуждается на резонансах порядка n/m = 4/1, 3/1, 2/1, 3/2 и 1/1. Здесь n – число колебаний пузырька на периоде решения, а m – количество периодов акустического поля T. Равновесный радиус пузырька R_o за все время действия внешнего акустического поля T = 70 000 000 увеличивается приблизительно в 4 раз. Рост равновесного радиуса полностью соответствует экспериментальным данным, приведенным в работе [2].

При возбуждении пузырька на резонансах порядка n/m =3/1, 2/1 и 1/1 наблюдается очень острый пик резонанса. На рис. 2 рассмотрена подробная динамика пузырька на этих пиках. На рисунке 2 приведены зависимости от времени *T* радиальных пульсаций пузырька *R(T)* и излученного пузырьком, давления $P_u(T)$. На этом резонансе порядка 4/1 нет острого пика для изменения радиуса пузырька, и, соответственно, пик резонанса не имеет никаких особенностей. На рисунке 3 приведены зависимости от времени *T* радиальные пульсации пузырька *R(T)* и излученное пузырьком, давление $P_u(T)$. На этом резонансе порядка 3/1 имеется ярко выраженный пик пульсаций. При выходе на резонанс характер пульсаций резко меняется. Пузырек теряет устойчивость и его пульсации становятся модулированными по амплитуде. Соответственно эти изменения касаются и его

акустического излучения. С течением времени эта амплитудная модуляция прекращается и, пульсации пузырька вновь становятся немодулированными, квазипериодическими. Точно такая же картина наблюдается для резонансов порядка 2/1 (рис. 4) и 1/1 (рис. 5). Такая особенность пульсаций пузырька на резонансах отмечена впервые. На рис.1 приведена зависимость радиуса пузырька R_+ от времени T. По сути, эта зависимость является резонансной кривой, то есть зависимостью максимального радиуса R_+ от равновесного радиуса R_o. Изменения равновесного радиуса R_o *крайне* малы, они определяются шагом интегрирования при расчете уравнения пульсаций пузырька. Поэтому возможна такая точность определения максимума резонанса. Появление амплитудной модуляции в излученном пузырьком акустическом сигнале с неизбежностью приводит к появлению в спектре излучения модуляционных компонент. В спектре акустического излучения пьедесталы и шумовая компонента появляются при модуляционных эффектах, при возбуждении пузырьков на ультрагармонических

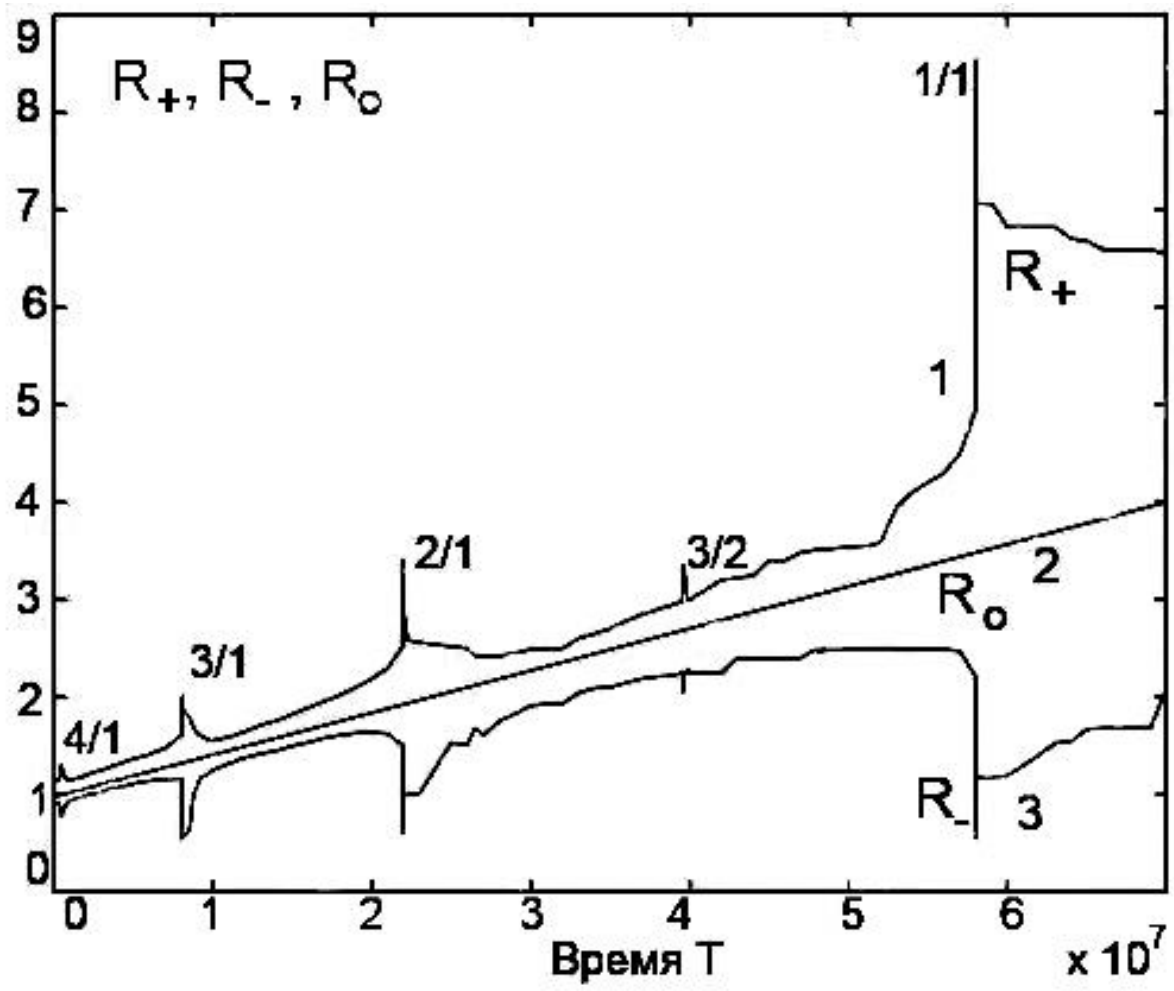

Рисунок 1 – Зависимость максимального радиуса пузырька R_+ от времени T (кривая 1). Зависимость равновесного радиуса пузырька R_o от времени T (кривая 2). Зависимость минимального радиуса пузырька R_- от времени T (кривая 3)

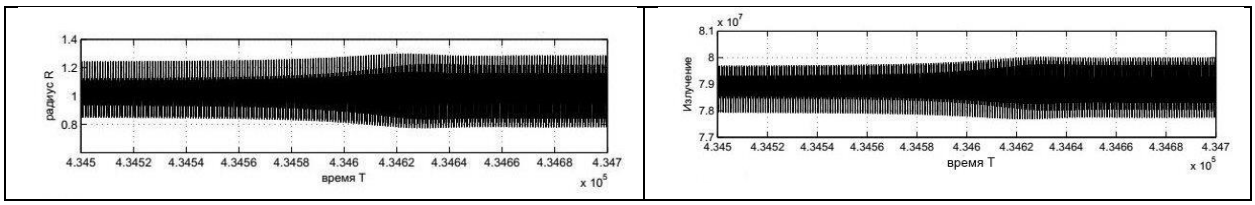

Рисунок 2 – Зависимости от времени T текущего радиуса пузырька R(слева), излученного пузырьком, давления P_u (справа). Порядок пульсаций 4/1

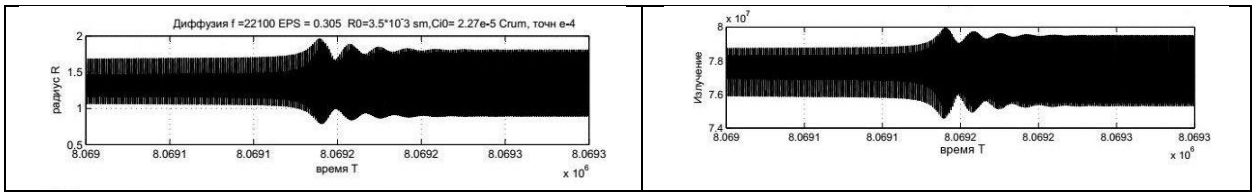

Рисунок 3 – Зависимости от времени T текущего радиуса пузырька R(слева), излученного пузырьком, давления P) (справа). Порядок пульсаций 3/1

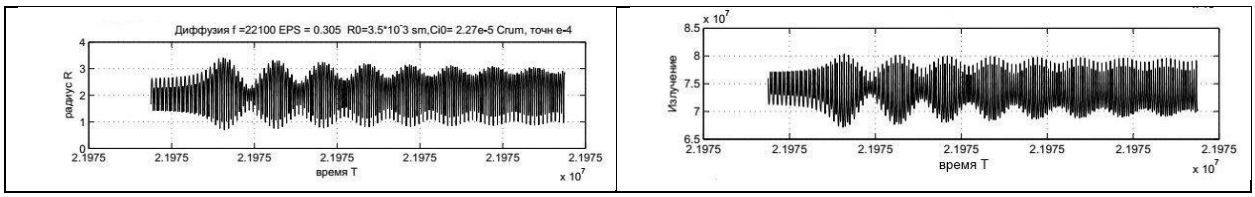

Рисунок 4 – Зависимости от времени T текущего радиуса пузырька R(слева), излученного пузырьком, давления P_u (справа). Порядок пульсаций 2/1

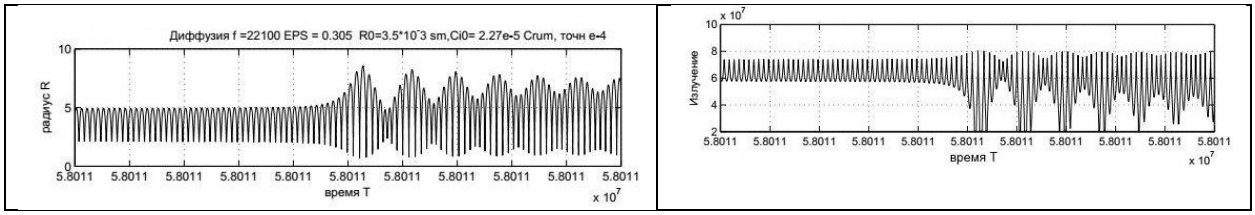

Рисунок 5 – Зависимости от времени T текущего радиуса пузырька R(T), излученного пузырьком, давления P_u (справа). Порядок пульсаций 1/1

резонансах высоких порядков, наличием случайных флуктуаций фазы и амплитуды импульсов давления, искажениями возбуждающего поля. Таким образом, изменение равновесного радиуса пузырька за счет направленной диффузии является еще одним источником модуляционных компонент в спектре излучения кавитационной области в реальных жидкостях. Процесс выпрямленной диффузии приводит к непрерывному изменению равновесного радиуса R_o. В начальный момент времени $T = 0$ порядок пульсаций пузырька равен 4/1, то есть за один период возбуждающего поля пузырек совершает четыре пульсации. По мере роста пузырька характер его пульсаций меняется, то есть меняется вид зависимостей $R(T)$ и $P(T)$. На рис. 6 приведены примеры пульсаций пузырька в разные моменты времени T. Для промежутка времени в двадцать периодов внешнего акустического поля (Рис. 6, А, а) на одном периоде акустического поля присутствуют четыре максимума, и расположение этих максимумов имеет характерный вид. Далее два соседних максимума начинают приближаться друг к другу (рис. 6, Б, б) и на рис.6 Б, в они сливаются. На одном периоде акустического поля остается три максимума, то есть порядок пульсаций изменился. Он стал равен 3/1.

Таким образом, при плавном изменении равновесного радиуса пузырька порядок пульсаций изменяется без резкого изменения формы и характера его пульсаций.

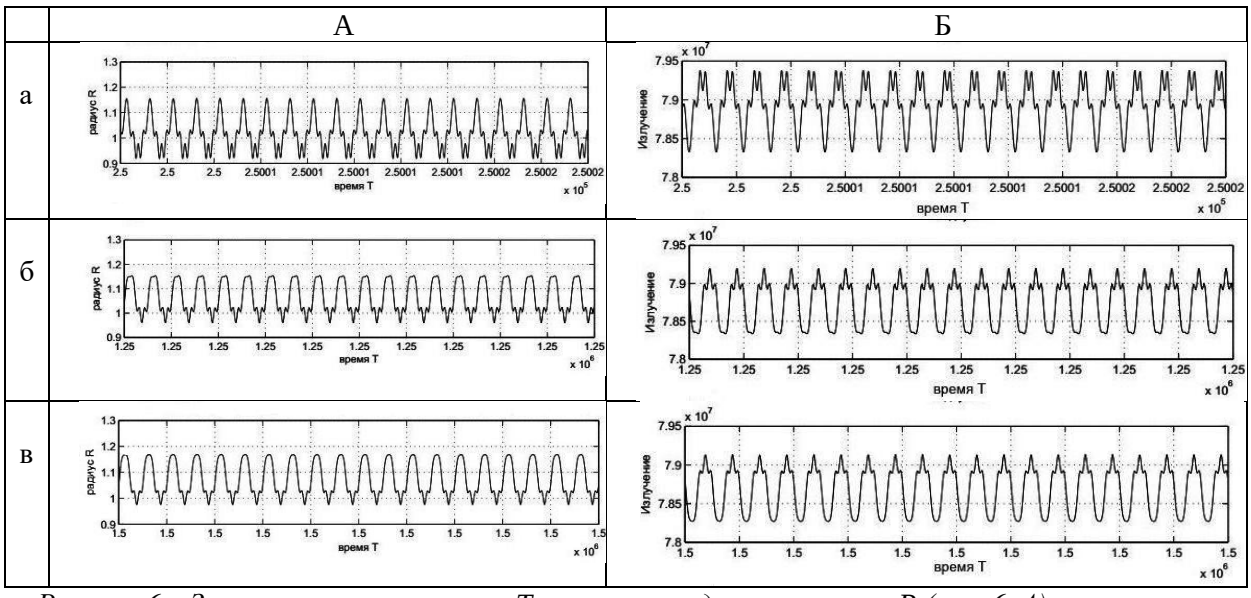

Рисунок 6 – Зависимости от времени T текущего радиуса пузырька R (рис. 6, А), излученного пузырьком давления P_u (рис. 6, Б). Рис.6, а – T=250000 – 250020, порядок пульсаций 4/1; Рис.6, б – T=1250000 – 1250020, порядок пульсаций 4/1; Рис.6, в – T=1500000 – 1500020; , порядок пульсаций 3/1

Во всех реальных жидкостях растворены газы и в них находятся мельчайшие пузырьки и неоднородности, называемые «зародышами кавитации». Таким образом, в такой жидкости, находящейся под действием акустического поля, все пузырьки участвуют в процессе «направленной» или «выпрямленной» диффузии. И при значениях амплитуды акустического поля выше некоторой критической величины, называемой порогом «выпрямленной» диффузии, начинают расти. Этот рост приводит к изменению резонансных свойств пузырьков, и, следовательно, к изменению характера их пульсаций. Что, в свою очередь, приводит к изменению характера акустического излучения пузырьков и спектров этого излучения.

Список литературы:

1. Hsieh D.Y. and Plesset M.S. Theory of rectified diffusion of mass into gas bubbles // J. Acoust. Soc. Am., 1961. **33**, P.206 – 215.
2. Crum L.A. Measurements of the growth of air bubbles by rectified diffusion // J. Acoust. Soc. Am., 1980. 68, P.203 – 211.
3. Мельников Н.П., Нюркин А.О. Влияние выпрямленной диффузии на резонансную динамику кавитационных пузырьков. // Доклад на международном научно-промышленном форуме Транспорт. Горизонты развития, 2024, ISBN 978-5-901722-87-9.
4. Акуличев В.А., Богуславский Я.Я., Иоффе А.А., Наугольных К.А. Излучение сферических волн конечной амплитуды // Акустический журнал, 1967, Т. 13, № 3 С. 321-328.
5. Ilyichev V.I., Korets V.L. and Melnikov N.P. Spectral characteristics of acoustic cavitation // Ultrasonics, 1989, vol. 27, № 6, pp. 357 – 361.