

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Ахатова Искандера Шаукатовича на диссертацию Вановского Владимира Валерьевича на тему «Резонансный механизм дробления газового пузырька в жидкости», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

1. Актуальность темы диссертационного исследования

В диссертации представлены результаты теоретического исследования механизма дробления газового пузырька в жидкости. Рассматриваются случай свободных колебаний пузырька, и случай вынужденных колебаний пузырька в поле переменного внешнего давления жидкости.

Проблема актуальна с точки зрения фундаментальной гидродинамики. История вопроса нелинейной устойчивости газовых пузырьков уходит корнями к классическим работам сэра Лэмба (Hogase Lamb) конца 19 века. С того времени эта проблема постоянно привлекала внимание ученых, работающих в области теоретической гидродинамики и механики многофазных сред в России и в мире, но несмотря на более чем вековую историю, она до сих пор далека от полного разрешения. Значительное достижение в этом направлении было сделано в конце 20 века в работах Гэри Лиля (L. Gary Leal) и его группы из Калифорнийского университета в Санта Барбаре. Им было показано, что при колебаниях пузырька происходит перекачка энергии за счет нелинейного взаимодействия между радиальной и деформационной модами колебаний.

Проблема также актуальна с точки зрения многочисленных приложений осциллирующих и дробящихся пузырьков в морской акустике и биомедицине, для развития новых методов предотвращения кавитационной эрозии, новых методов активизации массообменных процессов, и многих других инженерных приложений.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации диссертации получены и сформулированы в рамках классической гидродинамики с использованием современных аналитических, асимптотических и численных методов исследования. Постановки и математические формулировки всех рассмотренных в диссертации задач соответствуют классическим представлениям механики сплошных сред. Задача о свободных колебаниях пузырька рассмотрена на основе метода инвариантной нормализации гамильтониана, развитого в работе академика В.Ф. Журавлева (ПММ, 2002). Задача о вынужденных колебаниях пузырька рассмотрена с использованием метода осреднения Крылова-Боголюбова. Приближенные аналитические результаты сравнены с численными решениями полученными методами вычислительной математики.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Следует отметить три основных новых результата представленных в диссертации:

а) Получено аналитическое решение для описания процесса перекачки энергии между радиальной и деформационной модами свободных колебаний газового пузырька в жидкости в отсутствие диссипации при резонансе частот 2:1. Решение найдено для всех деформационных мод с индексом (n, m) . Это новый результат. Решение получено методом инвариантной нормализации гамильтониана. Достоверность полученного результата обеспечивается строгой обоснованностью метода инвариантной нормализации гамильтониана, который дает экспериментально подтвержденные результаты для задачи о качающейся пружине, математическая аналогия с которой легла в основу идеи применения этого метода для задачи о колебаниях пузырька.

б) Получено аналитическое решение для описания процесса перекачки энергии между радиальной и деформационной модами вынужденных колебаний газового пузырька в акустической волне в жидкости при резонансной частоте волны, и резонансе частот между радиальной и деформационной модами колебаний газового пузырька 2:1. Это новый результат. Решение получено методом осреднения Крылова-Боголюбова. Достоверность полученного результата обеспечивается строгой обоснованностью метода Крылова-Боголюбова, который широко применяется в многочисленных задачах теории нелинейных колебаний; а также сравнением с численными расчетами.

в) Сформулированы критерии дробления газового пузырька в условиях п. б). Показано, что пузырек может дробиться в акустической волне, амплитуда которой много меньше равновесного давления в жидкости. Это новый результат, полученный на основе аналитического решения представленного в п. б), достоверность которого уже описана.

4. Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем

Диссертация В.В. Вановского является самостоятельным научным исследованием. Во всех предшествующих работах по неустойчивости колебаний газовых пузырьков другими авторами изучались только вопросы порога возникновения неустойчивости, а также поведение пузырьков вблизи этого порога. В своей диссертационной работе В.В. Вановский пошел дальше – он исследовал процесс развития этой неустойчивости и исследовал возможности дробления пузырьков в предположении, что неустойчивость уже развита и энергия перекачивается из радиальных колебаний в деформационные. В этом заключается основной научный вклад автора диссертации.

5. Соответствие автореферата диссертации

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Замечания

1. Пузырек, помимо радиальных и деформационных колебаний, совершает также трансляционное движение в акустическом поле, которое может оказывать существенное влияние на динамику колебаний пузырька и на все сопутствующие этому физико-химические процессы.

2. В тексте диссертации не приводится сравнение методов, которые использовал автор с методами примененными в работах Гэри Лиля. Это затрудняет сравнительный анализ полученных решений.
3. В диссертации на стр. 7 утверждается, что «Существует много экспериментальных подтверждений того факта, что пузырьки в акустической волне излучают на субгармонических частотах, делящих нацело частоту волны. Наличие таких субгармоник может вызываться несферическими колебаниями пузырька, находящимися в целочисленном резонансе частот с радиальной модой (ссылка на работу Eller & Flynn, JASA, 1969).»
Однако, излучение на субгармонических частотах может возникать за счет нелинейного резонанса только радиальной моды без участия колебаний изменения формы, как было показано в работе Вернера Лаутеборна из Гёттингенского университета в Германии (Lauterborn, W., *Numerical investigation of nonlinear oscillations of gas bubbles in liquids, Journal of Acoustical Society of America* 59, 283, 1976).
4. При рассмотрении процесса перекачки энергии между модами автор учитывает затухание радиальной моды и пренебрегает затуханием деформационной моды. Это следовало бы объяснить.
5. В работе используется терминология – «в случаях быстрого и медленного старта акустической волны». Эта терминология нуждается в специальном разъяснении.
6. На стр. 20 в уравнениях (1.3) перемешаны переменные x , y , x_1 , x_2 . Это, наверное, опечатка?
7. На стр. 21 «решение уравнения для z имеет вид $z = \delta \cos t$ ». Может быть $z = \delta \cos 2t$?
8. На стр. 21 в уравнениях (1.5) пропущено уравнение для r_y .
9. На стр. 22 редакция последнего параграфа –
«Данные результаты, опубликованные в [64,81,82] актуальны и для задачи о перекачке энергии свободных колебаний пузырька между модами. Далее будет показано, что ...»
10. На стр. 23 редакция первого параграфа –
«Для простоты будет принято, что у пузырька задействованы только две из этих мод ...»

Приведенные замечания не снижают ценности и качества научных исследований, результаты которых представлены в диссертации Вановского В.В., и в целом диссертационная работа заслуживает высокой оценки.

Диссертация прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях и научных семинарах. Выносимые на защиту научные положения достаточно полно отражены в 8 публикациях, из них 6 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК, в том числе в ведущих рецензируемых журналах, таких как *Доклады академии наук* и *Прикладная математика и механика*. Опубликованные работы соответствуют тематике диссертации.

Диссертация Вановского В.В. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития гидродинамики и механики многофазных систем.

Заключение

Считаю, что представленная диссертация «Резонансный механизм дробления газового пузырька в жидкости» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Вановский В.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент



Искандер Шаукатович Ахатов
доктор физико-математических наук, профессор
Директор Центра проектирования, производственных технологий и материалов
Сколковского института науки и технологий
Территория Инновационного центра «Сколково»
121205, Москва, Большой Бульвар 30с1, офис E-B5-2020
тел. +7 (495) 280 14 81 доб. 3317; моб. +7 (916) 690 13 34
i.akhatov@skoltech.ru; www.skoltech.ru

Ольга Сергеевна Гук
Руководитель отдела кадрового администрирования
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий»
121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д.
30 стр.1
Телефон: +7 (495) 280-14-81 доб.3874
Мобильный: +7 (916) 370-05-35
email: O.Guk@skoltech.ru

