

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Вановского Владимира Валерьевича «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

Резонансные явления в колебаниях пузырьков – активно развивающаяся область гидродинамики многофазных сред. Наиболее распространены исследования дробления вследствие сдвиговых напряжений в неоднородном потоке. Также имеется большое количество экспериментальных данных о возможности дробления пузырька в ударной волне и при облучении акустической волной большой амплитуды (близкой к кавитационному порогу). Резонансная перекачка энергии из радиальной моды колебаний пузырька в несферическую достаточно хорошо освещена в литературе: исследовался пороговый характер возникновения неустойчивости сферической формы вследствие затухания несферической моды, бифуркации и хаос при возбуждении данной неустойчивости, также предпринимались попытки объяснить этой неустойчивостью появление субгармоник в спектре облучаемого пузырька и даже солюминесценцию. Однако развитая неустойчивость, при которой амплитуда несферических колебаний может быть достаточно высокой, чтобы пузырёк раздробился, не исследовалась ранее. Тема диссертационной работы несомненно **актуальна**.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, который включает 115 наименований. Общий объем диссертации составляет 95 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, дан обзор литературы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту и указаны их научная новизна, практическая и теоретическая значимость.

В **первой главе** решается задача о динамике свободно колеблющегося пузырька при резонансе частот радиальной и произвольной деформационной моды колебаний 2:1 в отсутствие диссипации. Дается аналитическое описание процессов перекачки энергии, позволяющее получить период пе-

рекачки в произвольную моду и выделить моды, которые скорее всего будут возбуждаться. Рассмотрена аналогия с задачей о качающейся пружине при таком же резонансе между модами колебаний. Показывается, что, в отличие от пружины, амплитуда колебаний деформационной моды пузырька значительно превышает амплитуду радиальной моды, и обсуждается возможность дальнейшего дробления пузырька по такому механизму.

Во **второй главе** исследуется влияние диссипации энергии при малых радиальных колебаниях пузырька в приближениях гомобаричности, постоянства температуры жидкости и отсутствия фазовых переходов. Рассматриваются все основные механизмы диссипации: вязкий, термический и акустический, также предлагается способ одновременного решения задачи для свободных и вынужденных колебаний с помощью единой системы уравнений. Показывается, что в большинстве реальных случаев определяющую роль оказывает именно термический механизм диссипации, также определяются условия, при которых важны другие механизмы затухания. Путём усреднения по объёму характеристик пузырька выводятся точные формулы для параметров линейных свободных и вынужденных колебаний малого сферического пузырька в жидкости. Обсуждается применение полученных результатов для описания затухания волн в пузырьковой среде, описания резонансного механизма дробления пузырька и для других приложений.

В **третьей главе** с использованием метода осреднения Крылова–Боголюбова дано асимптотическое описание динамики малых колебаний пузырька в случае резонансной частоты возбуждающей волны, а также резонанса частот радиальной и деформационной моды 2:1 (резонанс 2:2:1). Рассматривается осесимметричная деформационная мода, как наиболее интересная вследствие максимального возрастания амплитуды при перекачке энергии свободных колебаний. При этом учитывались все существенные механизмы диссипации энергии радиальной моды (термический, акустический, вязкий), эффекты поверхностного натяжения. Предполагается, что затуханием деформационной моды можно пренебречь для пузырьков не слишком большого радиуса. Показано, что амплитуда деформационной моды значительно растёт и существенно превышает амплитуду

радиальной моды, что может привести к дроблению пузырька. Предложен новый резонансный механизм дробления газового пузырька в акустической волне. Показано, что дробление пузырька с резонансным радиусом возможно при относительно небольшой амплитуде давления в возбуждающей волне резонансной частоты. Получено оценочное условие дробления для случаев быстрого и медленного включения акустической волны.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Специального упоминания заслуживают следующие результаты, полученные в диссертации:

1. Предложен новый резонансный механизм дробления пузырька. Получены условия дробления газового пузырька в жидкости по резонансному механизму в случаях быстрого и медленного включения акустической волны, а также характерное время быстрого включения. Показано, что величина амплитуды давления в акустической волне много меньше равновесного давления в жидкости.
2. Единым образом получены параметры колебаний пузырька с учётом акустической, вязкой, тепловой диссипации и поверхностного натяжения, рассчитана огибающая резонансных кривых для вынужденных колебаний пузырька, которая может быть использована для нахождения условий резонансного дробления пузырька. Проанализированы различные механизмы затухания и определены условия доминирования термической диссипации над другими механизмами.

Диссертацию отличает внутренняя цельность и логическое единство глав.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, соответствует общепринятой в рамках специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы и обеспечивается адекватностью применяемых математических моделей колебаний газового пузыря, основанных на законах сохранения механики сплошной среды.

Достоверность результатов работы следует из строгого применения математических методов (в частности, были использованы метод инвариантной нормализации гамильтониана В.Ф. Журавлёва и метод осреднения Крылова–Боголюбова), сравнением с численными расчетами, а также в

проведении сравнения с результатами других авторов.

Научная значимость работы состоит в дальнейшем усовершенствовании и применении методов гамильтоновой механики к задачам механики жидкости и газа.

Практическая ценность диссертационной работы обеспечивается многочисленными возможными приложениями резонансного механизма дробления пузырька в медицине, в процессах массообмена, в технологии подводных сооружений, в морской акустике.

Все результаты диссертации являются новыми и представляют интерес для приложений. Работа выполнена на высоком научном уровне.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, из них 6 индексируются в базах данных WoS или Scopus и входят в список рекомендуемых изданий ВАК РФ.

Название диссертации соответствует её содержанию и заявленной специальности. Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно её отражает.

Диссертация В.В. Вановского «Резонансный механизм дробления газового пузырька в жидкости» является законченной научно-квалификационной работой.

Имеются следующие замечания:

1. В диссертации (в главах 1 и 3) не указаны конкретные численные методы, использованные для численного моделирования уравнений Гамильтона. Также не указано, каким образом осуществлялся контроль точности полученных результатов. В главе 1 моделируются уравнения Гамильтона без диссипации, поэтому автор мог бы использовать закон сохранения энергии для верификации численных расчётов.
2. Материал диссертации изложен в очень сжатом виде. Некоторые формулы приводятся без предварительных выкладок (например, формула (1.13) для кинетической энергии пузырька, формула (1.17) для частот колебаний радиальной и деформационной мод). Хотя, раздел 2.2 посвящен подробному выводу уравнения Келлера.
3. Список литературы составлен не в алфавитном порядке, что неудобно при чтении диссертации.

Указанные замечания не снижают положительной оценки работы в целом.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация В.В. Вановского «Резонансный механизм дробления газового пузырька в жидкости» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и по своим квалификационным признакам соответствует всем пунктам «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), а ее автор, Вановский Владимир Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – механика
жидкости газа и плазмы,
профессор кафедры гидромеханики
механико-математического факультета
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова
04 июня 2020 г.

А.В. Аксенов

Телефон: 8(495)939-39-58 (служебный)

E-mail: aksenov@mech.math.msu.su

Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва,
Ленинские горы 1, Главное здание МГУ,
Механико-математический факультет

Подпись профессора Аксенова Александра Васильевича
удостоверяю:

Декан механико-математического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
член-корр. РАН



А.И. Шафаревич