

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ФИЦ КазНЦ РАН

д.ф.-м.н. Калачев А.А.

«12» марта 2020 г.



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Федеральный исследовательский центр  
«Казанский научный центр Российской академии наук»  
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».**

#### **Актуальность.**

Свойства жидкостей с парогазовыми пузырьками и процессы, протекающие в них, могут существенно зависеть от динамики отдельных пузырьков. В частности, во многих приложениях важную роль играют деформации поверхностей пузырьков, сильный рост которых может приводить, например, к разрушению их межфазных поверхностей (к дроблению пузырьков). Одной из причин роста деформаций может оказаться механизм, основанный на перекачке в деформационную моду энергии из возбуждаемой акустической волной радиальной моды при выполнении резонансных условий. При этом, как и в ряде других задач с пузырьками, важно учитывать диссипацию энергии, которая, в частности, обусловлена тепловыми эффектами, влиянием вязкости и сжимаемости жидкости. Указанный механизм роста деформаций имеет многочисленные приложения, а его исследование и получение оценочного условия дробления пузырьков является актуальной проблемой гидродинамики многофазных сред.

## **Содержание работы.**

Диссертационная работа изложена на 95 страницах, включая 16 рисунков, состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 115 наименований.

**Во введении** дан обзор литературы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обоснована научная новизна и отмечена практическая значимость. Кратко описаны методология и методы исследования, апробация, личный вклад и публикации автора по теме работы, приводится краткое содержание последующих глав.

**В первой главе** решается задача динамики свободно колеблющегося пузырька при резонансе частот радиальной и деформационной моды колебаний 2:1 в отсутствие диссипации. Строится аналитическое решение для описания процессов перекачки энергии, позволяющее получить период перекачки в произвольную моду и выделить моды, вероятность возбуждения которых наиболее высока. Обсуждается возможность дробления пузырька по такому механизму. Устанавливается аналогия с задачей о качающейся пружине при таком же резонансе между модами колебаний.

**Вторая глава** посвящена затуханию малых радиальных колебаний сферического пузырька в гомобарическом приближении при постоянной температуре жидкости и отсутствии фазовых переходов. Рассмотрены такие механизмы диссипации, как вязкий, термический и акустический. Показано, что в большинстве случаев среди них определяющую роль оказывает термический механизм. Определены также условия, при которых важны другие механизмы затухания. Путём усреднения по объёму выведены формулы для параметров линейных свободных и вынужденных колебаний малого сферического пузырька в жидкости. Обсуждается применение полученных результатов для описания резонансного механизма дробления пузырька и для других приложений.

**В третьей главе** получено асимптотическое описание динамики малых радиальных и деформационных колебаний пузырька в случае

резонансной частоты возбуждающей волны, а также резонанса частот радиальной и деформационной моды 2:1. Учтены термический, акустический и вязкий механизмы диссипации энергии радиальной моды, эффекты поверхностного натяжения. Показано, что затуханием деформационной моды можно пренебречь для пузырьков не слишком большого радиуса. Доказано, что амплитуда деформационной моды значительно вырастает и способна многократно превысить амплитуду радиальной моды, что может привести к дроблению пузырька. 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, выносимые на защиту.

**Наиболее существенные результаты, полученные соискателем:**

Методом нормальной формы получено аналитическое описание резонансной перекачки энергии между радиальной и произвольной деформационной модой свободных малых колебаний газового пузырька в жидкости в отсутствие затухания при резонансе частот мод 2:1. Найден период перекачки энергии и относительное увеличение амплитуды деформации в ходе перекачки в зависимости от номера моды.

Получены параметры свободных и вынужденных 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.

Исследованы малые вынужденные колебания газового пузырька в акустической волне в жидкости при резонансной частоте акустической волны, а также резонансе частот между радиальной и деформационной модами колебаний 2:1. С помощью методики осреднения Крылова-

Боголюбова аналитически описан процесс перекачки энергии между модами в пренебрежение затуханием деформационной моды.

Предложен новый резонансный механизм дробления пузырька при описанном выше резонансе. Получены оценочные условия дробления газового пузырька в жидкости по резонансному механизму в случаях быстрого и медленного включения акустической волны, а также характерное время быстрого включения.

#### **Обоснованность и достоверность полученных результатов.**

Обоснованность и достоверность результатов диссертации обусловлены использованием современного математического аппарата, согласованностью полученных асимптотик с результатами численных расчетов, наличием в литературе экспериментальных данных о перекачке энергии между радиальной и деформационной модами и разрушении пузырьков в результате роста их несферических деформаций.

#### **Научная новизна результатов.**

Научная новизна проведённых исследований состоит в полученных оригинальных результатах по резонансной перекачке энергии между радиальной и произвольной деформационной модой свободных малых колебаний газового пузырька в жидкости в отсутствие затухания при резонансе частот мод  $2:1$ , методически новым способом учёта основных механизмов диссипации энергии для колеблющегося пузырька в линейном приближении, а также впервые полученным аналитическим описанием вынужденных колебаний пузырька и оценочным условием его дробления в случае резонанса  $2:2:1$ .

#### **Практическая ценность.**

Практическая значимость полученных результатов обусловлена большим количеством возможных приложений предлагаемого механизма дробления пузырьков. Одним из наиболее перспективных вариантов является использование описанного механизма дробления в медицине для прорыва гематоэнцефалического барьера путём введения в кровь ультразвуковых контрастных агентов (покрытых оболочкой пузырьков

резонансного радиуса) и облучения их вблизи барьера акустической волной.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Результаты диссертации Вановского В.В. могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых на кафедре газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ, кафедре аэрогидромеханики Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского, в ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ТюмФ ИТПМ СО РАН, ИПМаш РАН, ИМех УФИЦ РАН и других, занимающихся данной и смежными тематиками.

### **Замечания по диссертационной работе:**

1. В работе анализируется перекачка энергии между радиальной и произвольной деформационной модой колебаний газового пузырька. При этом используется предположение, что энергия перекачивается только в одну деформационную моду. Непонятно, почему не принимается во внимание тот факт, что за счет нелинейных эффектов энергия из одной деформационной моды также может перекачиваться в другие, что может сыграть роль дополнительного диссипативного механизма.

2. В третьей главе диссипация энергии учитывается только для радиальных пульсаций, а для деформационных колебаний считается пренебрежимо малой. Представляется, что такое допущение следовало бы как-то обосновать, учитывая малость амплитуд как радиальных, так и деформационных колебаний.

3. В работе отсутствует обсуждение соответствия полученных результатов имеющимся в литературе экспериментальным данным, например, о перекачке энергии между радиальной и деформационной модами и о разрушении пузырьков в результате роста их несферических деформаций.

4. В рукописи присутствуют ряд опечаток и стилистических неточностей. Также не вполне понятна мотивация подробного изложения

во второй главе хорошо описанного в литературе вывода уравнения Келлера радиальных колебаний одиночного пузырька.

Данные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе.

### **Заключение.**

Диссертация Вановского В.В. «Резонансный механизм дробления газового пузырька в жидкости» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи о резонансной перекачке энергии между радиальной и деформационной модами колебаний пузырька и оценка условий дробления пузырька вследствие этой перекачки. Полученные результаты имеют существенное значение для развития гидродинамики многофазных сред и могут иметь технологические и медицинские приложения. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах международного и всероссийского уровня, опубликованы в 8 научных работах, из них 6 индексируются в базах данных WoS или Scopus и входят в список рекомендуемых изданий ВАК. Автореферат с достаточной степенью отражает основные результаты работы и соответствует содержанию диссертации. Диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.20013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Работа доложена автором и обсуждена 03.03.2020 г. на расширенном заседании отдела механики многофазных сред Института механики и машиностроения – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук». Отзыв на диссертацию подготовлен на

основании заключения отдела механики многофазных сред ИММ ФИЦ  
КазНЦ РАН (протокол № 1 от 03.03.2020 г.).

Отзыв подготовили:

Заведующий отделом механики  
многофазных сред ИММ ФИЦ  
КазНЦ РАН, чл.-корр. РАН,  
д.ф.-м.н. по специальности  
01.02.05 - механика жидкости,  
газа и плазмы



Губайдуллин  
Дамир  
Анварович

Главный научный сотрудник,  
заведующий лабораторией  
вычислительной динамики  
сплошной среды ИММ ФИЦ  
КазНЦ РАН, профессор, д.ф.-м.н.  
по специальности 01.02.05 -  
механика жидкости, газа и  
плазмы



Аганин  
Александр  
Алексеевич

Старший научный сотрудник  
лаборатории вычислительной  
динамики сплошной среды ИММ  
ФИЦ КазНЦ РАН, к.ф.-м.н. по  
специальности 05.13.18 -  
математическое моделирование,  
численные методы и комплексы  
программ



Давлетшин  
Анас  
Ильгизович

420111, г. Казань,  
ул. Лобачевского, д. 2/31,  
т. (843)236-52-89,  
e-mail [info@imm.knc.ru](mailto:info@imm.knc.ru)