

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Галимзянова Марата Назиповича «Волны давления в жидкости с парогазовыми пузырьками и задачи акустической устойчивости», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы. Диссертация М.Н. Галимзянова посвящена теоретическому и численному изучению задач нестационарной гидродинамики пузырьковых жидкостей. Основное внимание уделяется исследованию термодинамической устойчивости перегретых жидкостей с парогазовыми пузырьками при акустических возмущениях, одномерным задачам акустики в таких средах, а также численному исследованию фокусировки волн конечной амплитуды в пузырьковых кластерах в рамках двумерных постановок задач. Несмотря на то, что исследования динамики пузырьковых сред имеют уже значительную историю, подробное изучение динамики волн в пузырьковых жидкостях не потеряло своей актуальности. Это обусловлено значительным кругом практических задач, требующих детального параметрического анализа. Прежде всего, это задачи использования так называемых «пузырьковых экранов» для защиты подводных аппаратов и технических конструкций от волновых нагрузок, использование акустических методов для определения параметров пузырьковых сред при возможной разгерметизации подводных газопроводов, задачи перекачки пузырьковых сред, течения кавитирующих и вскипающих жидкостей в технических устройствах и многие другие приложения. В силу многопараметрического характера волновых процессов в пузырьковых средах ряд важных для приложений вопросов остается малоисследованным. Автор настоящей диссертации выбрал для подробного исследования несколько таких малоисследованных вопросов и представил подробный их параметрический численный анализ в рамках достаточно апробированных континуальных моделей пузырьковых сред. Основное внимание уделяется оценке условий начала резкого роста парогазовых пузырьков в перегретых

жидкостях, задачам взаимодействия акустических волн с поверхностями скачка газонасыщенности среды, а также вопросам фокусировки и усиления двумерных волновых импульсов в пузырьковых кластерах различной формы. Все эти задачи представляют несомненный фундаментальный и прикладной интерес, что делает **тематику диссертации актуальной и современной.**

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации. Автор использует апробированные односкоростные, но двухтемпературные модели механики пузырьковой жидкости и математически корректные постановки краевых задач. Правильность основных проведенных выкладок не вызывает сомнения. Используемые численные методы также хорошо апробированы. Автор тестирует используемые им численные алгоритмы на необходимом числе примеров и приводит, где это возможно, контроль точности и сравнение собственных результатов с результатами (в том числе, экспериментальными) других авторов. Все это позволяет заключить, что в рамках принятых моделей основные результаты диссертации являются **вполне обоснованными.**

Оценка содержания, а также новизны и достоверности полученных результатов. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 243 страницы, в том числе 70 рисунков и список литературы, включающий 258 наименований.

Наиболее существенными результатами диссертации являются следующие:

- Проведено подробное параметрическое исследование термодинамической устойчивости (стабильного объемного содержания пузырьков) при акустических воздействиях на пузырьковые жидкости с газопаровыми пузырьками. Изучены границы устойчивости на плоскости «начальный размер пузырьков - объемная доля газовой фазы» при вариации перегрева жидкости. Обнаружено, что наличие нерастворимого газа в пузырьках мо-

жет качественно изменить границы устойчивости, известные из предыдущих работ, в которых рассматривались чисто паровые пузырьки.

- В области термодинамической устойчивости пузырьковой среды исследованы законы затухания акустических колебаний в воде с «мелкими» и «крупными» паровоздушными пузырьками при различных начальных температурах среды. В широком диапазоне параметров изучено влияние нерастворимого газа в пузырьках на законы затухания акустических колебаний. Найден диапазон параметров, соответствующий максимальному затуханию колебаний.

- Аналитически изучены законы отражения и преломления гармонических волн малой амплитуды при их «косом» падении на границу раздела между чистой и пузырьковой средой. Показано, что для низкочастотных волн (с частотой меньше собственной частоты колебаний пузырьков) при их падении со стороны пузырьковой жидкости под углом, превышающим некоторое пороговое значение, происходит полное отражение падающей волны. Установлено, что для начальной температуры среды 373°K угол отражения достигает максимума 70° . При падении волны со стороны чистой жидкости под любым углом волна проходит в область пузырьковой среды.

- На основании параметрических численных расчетов падения скачка давления конечной амплитуды на пузырьковые кластеры различной формы, расположенные в круглой трубе, изучены законы распространения и кумуляции ударных импульсов. Для сферического кластера показано, что может формироваться мощная уединенная волна, чья амплитуда превосходит исходную амплитуду в десятки раз.

- Подробно исследованы также пузырьковые кластеры в виде полого и сплошного цилиндров, расположенных вдоль оси трубы. Найдены области определяющих параметров, соответствующие максимальному эффекту усиления ударного импульса.

Перечисленные результаты являются новыми, их достоверность в рамках использованных моделей не вызывает сомнений. Часть существенных полученных результатов хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными и предыдущими публикациями.

Полученные численные решения задач об усилении ударного импульса в пузырьковых завесах представляют несомненный практический интерес для возможных приложений в теплоэнергетике, био- и химической технологиях, а также в медицине и инженерных разработках.

По содержанию и тексту диссертации можно высказать ряд замечаний и сформулировать несколько дискуссионных моментов:

- 1) Формулировку задачи хотелось бы видеть в безразмерном виде, с выделением параметров подобия и оценкой характерных для рассмотренных условий значений чисел Струхала, Рейнольдса, Пекле, Шмидта и др. Это позволило бы априори оценивать роль вязкости, теплопроводности и диффузии в рассмотренных волновых процессах.
- 2) Хотелось бы также видеть сравнение типичных расстояний между пузырьками с длинами волн рассматриваемых возмущений, это позволило бы оценить границы применимости используемого континуального подхода. Необходимо также было бы оценить вклад так называемой «объемной вязкости» пузырьковой среды, которой пренебрегается в принятой автором модели. В то же время, в известной работе (G. Taylor, The Two Coefficients of Viscosity for an Incompressible Fluid Containing Air Bubbles//Proc. Royal Soc.y A, 1954, 226(1164), 34–37) показано, что из-за собственных колебаний пузырьков объемная вязкость пузырьковых сред может на несколько порядков превосходить сдвиговую вязкость несущей жидкости.

- 3) Значительным новым элементом в модели, используемой автором, является учет присутствия инородного, не участвующего в фазовом переходе газа в паровых пузырьках. В тоже время, одно из тестирований модели проведено путем сравнения результатов расчетов фазовой скорости и коэффициента затухания акустических возмущений с известными экспериментами E. Silbermann, в которых использовалась жидкость с чисто паровыми пузырьками. Эти эксперименты описываются и более простыми моделями пузырьковой среды.
- 4) В диссертации нет оценок роли относительного движения жидкости и пузырьков в задачах о распространении волн конечной амплитуды и фокусировке ударного импульса
- 5) Несмотря на довольно значительный список цитируемой литературы, автор не упоминает очень важные и широко известные публикации, имеющие прямое отношение к теме диссертации. Это, прежде всего, монография классика теории акустики дисперсных систем Самюэля Темкина (S. Temkin, Suspension acoustics. An introduction to the physics of suspensions (Cambridge Univ Press. 2005)), а также известные публикации других классиков механики пузырьковых сред и акустики:
- L. van Wijngaarden, One-dimensional flow of liquids containing small gas bubbles// *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1972. V. 4, 369-396;
- M.S. Plesset, A. Prosperetti, Bubble dynamics and cavitation// *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1977. V. 9, 145-185;
- K.W. Commander, A. Prosperetti, Linear pressure waves in bubble liquids: Comparison between theory and experiment// *J. Acoustical Soc. Amer.*, 1989. V. 85. N2, 732-746;
- L. Van Wijngaarden, Shock waves in bubble liquids//Chapter in monograph "Shock wave science and technology library. V. 1 (Ed. Marinus E.H. Van Dongen)". 2007. pp. 3-33.
- O.V. Rudenko. Nonlinear acoustic waves in liquids with gas bubbles: A Review// *Phys. Wave Phenom.* 2022, V. 30, 145–155 .

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом, а являются, скорее, пожеланиями для направлений дальнейших исследований. Диссертационная работа М.Н. Галимзянова является законченным научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. В диссертации проведено детальное исследование широкого круга задач волновой динамики пузырьковых жидкостей, которое можно квалифицировать как **новое крупное научное достижение в механике многофазных сред, вполне соответствующее уровню докторских диссертаций**. Все рассмотренные задачи представляют значительный фундаментальный и прикладной интерес.

Автореферат и текст диссертации достаточно аккуратно оформлены, автореферат полностью отражает содержание диссертации. К сожалению, имеется заметное число опечаток (например, бросающиеся в глаза опечатки в инициалах академика Л.И. Седова). Основные результаты диссертации хорошо апробированы, они докладывались на крупных профильных научных конференциях и опубликованы в 16 работах, 4 из которых – в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus, 9 статей в журналах, индексируемых RSCI, и три статьи из непереводных российских журналов перечня ВАК. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в экспериментальных и теоретических исследованиях пузырьковых жидкостей и многофазных систем, проводимых в таких организациях, как НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, ИГиЛ СО РАН им. М.А. Лаврентьева, ИТПМ СО РАН, ИВТ РАН, Институт теплофизики СО РАН и др.

В целом, считаю, что представленная к защите работа Галимзянова М.Н. является самостоятельной и законченной научной работой, которая удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, согласно п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного

Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (в редакции Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. № 62), а ее автор заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 — механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, профессор, заведующий лабораторией механики многофазных сред НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова
119189 Москва, Мичуринский проспект д. 1,
НИИ механики МГУ, тел. 8(495)9393088,
e-mail: osiptsov@imec.msu, сайт: <http://lab110.imec.msu.ru/rus/21.html>

Осипцов Александр Николаевич

Подпись А.Н. Осипцова удостоверяю

И.О. Директора Института механики

МГУ имени М.В. Ломоносова

Профессор РАН



Георгиевский Д.В.

12.11.2024 г.