

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Сандуляну Штефана Васильевича «Асимптотические и численные методы исследования взаимодействия газовых пузырьков в жидкости вблизи их контакта в пульсирующем поле давления», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы

Коалесценция пузырьков во многих случаях играет важную роль в различных технологических, физико-химических и биологических процессах, а также в фармацевтике и медицине. В одних случаях необходимо интенсифицировать массообмен, в других - эффективно освободиться от газовой фазы. Перспективным инструментом для решения обеих задач является ультразвуковое воздействие на такие газожидкостные системы. Таким образом, тема диссертационного исследования, посвященного определению условий слияния газовых пузырьков и его отсутствия в пульсирующем поле давления, безусловно является актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, который включает 93 наименования. Общий объем диссертации составляет 129 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан достаточно полный обзор работ, посвященных взаимодействию двух сферических пузырьков переменных радиусов, как в вязкой, так и в невязкой жидкостях. Далее дается краткое изложение математической модели, используемой автором. Данную задачу предлагается решать с помощью Лагранжева формализма. В качестве кинетической энергии системы берется кинетическая энергия жидкости, которая находится во второй главе, а в качестве непотенциальных сил – вязкие силы, которые находятся в

третьей главе. Два из четырех уравнений Лагранжа разрешаются в предположении малой амплитуды акустического воздействия и частотой много меньше частоты собственных колебаний пузырьков.

Вторая глава посвящена определению кинетической энергии идеальной несжимаемой жидкости при движении в ней двух сфер переменных радиусов вдоль оси симметрии. Поле скоростей задается функцией тока. Она найдена в виде разложения по полиномам Гегенбауэра. Кинетическая энергия найдена как интеграл от произведения функции тока и ее производной по контуру сформированному из бисферических координат. Коэффициенты квадратичной формы кинетической энергии представлены и в виде точных рядов, и в виде асимптотических разложений вблизи контакта.

В третьей главе найдены вязкие силы, действующие на сферы для различных граничных условий. При этом, как и во второй главе, найдена функция тока в виде разложения по полином Гегенбауэра. Из точных рядов вязких сил, для случая прилипания и нулевого тангенциального напряжения на поверхностях сфер, найдены главные асимптотики, которые оказались равны по модулю и противоположны по знаку. Также найдены главные асимптотики вязких сил для случая проскальзывания на границе.

В четвертой главе изучается динамика сближения пузырьков под действием акустического поля давления. Используя результаты второй и третьей глав, два уравнения Лагранжа для координат центров сфер сводятся к одному уравнению с помощью преобразования Рауса. Для относительного зазора получено дифференциальное уравнение второго порядка, которое было исследовано методом осреднения для малых амплитуд пульсаций пузырьков. Полученные аналитические результаты подтверждаются численными расчетами уравнений Лагранжа. Важный результат был получен для вязких сил с использованием граничных условий прилипания. Оказалось, что при отношении радиусов пузырьков менее 2,8 суммарная сила, усредненная по периоду,

отрицательна для любого расстояния между пузырьками и не зависит от безразмерного параметра вязкости, т.е. пузырьки всегда сближаются.

Для отношений радиусов пузырьков более 3 получено, что средняя сила меняет знак при некотором расстоянии между ними, то есть при малых амплитудах пульсаций, в этом случае пузырьки будут осциллировать около некоторого среднего расстояния. Данное расстояние монотонно увеличивается с ростом безразмерного параметра вязкости. Однако, с увеличением амплитуды пульсаций пузырьков, для фиксированного параметра вязкости, из численных расчетов на основе нелинейных уравнений Лагранжа было получено, что осциллирующий зазор между пузырьками в минимальном положении может быть настолько мал, что слияние пузырьков будет возможно и для отношений радиусов пузырьков более 3.

Для вязких сил, найденных в случае граничных условий нулевого тангенциального напряжения из метода осреднения, а также из численных решений дифференциальных уравнений следует, что пузырьки всегда будут сближаться вплоть до контакта.

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

Замечания по диссертационной работе

1. Хотелось бы отметить, что найденное в главе 4 условие слияния (коалесценции) пузырьков при разнице их размеров меньше чем в 2,8 раза, которое не зависит от параметра вязкости, является довольно неожиданным и, по-видимому, является необходимым, но не достаточным условием, так как на процесс коалесценции пузырьков оказывает влияние не только соотношение их размеров.

2. Обобщенные координаты центров сфер z_1 и z_2 введены в параграфе 1.2, однако, их подробное описание приведено только в параграфе 2.2. Кроме мелких орфографических ошибок, отметим, что в некоторых местах приведены ссылки на главу 1 вместо главы 2. На рисунке 4.13 в комментарии к рисунку перепутаны

цвета.

Указанные недостатки не умаляют значения представленной диссертации и не влияют на общую положительную оценку работы.

Новизна диссертационной работы заключается в том, что была теоретически изучена динамика двух пульсирующих пузырьков при малых зазорах между ними и определены необходимые условия их слияния. Показано, что вязкие силы могут препятствовать процессу коалесценции.

Практическая значимость.

Найденные в работе условия сближения и слияния пульсирующих пузырьков могут быть использованы в химико технологических и биотехнологических реакторах. Разработанная теория будет полезна для эффективного освобождения мелкодисперсной газовой фазы из газожидкостной системы.

Обоснования и достоверность.

В работе проведено тщательное сравнение полученных результатов с результатами полученными другими авторами при решении схожих задач другими методами. Результаты метода осреднения соответствуют численным решениям уравнений Лагранжа. Полученное автором необходимое условие коалесценции пузырьков качественно согласуется с современными экспериментами, представленными в литературе. Все вышесказанное дает право заявлять об обоснованности и достоверности полученных в диссертации результатов.

Заключение.

Работа выполнена на высоком уровне и представляет собой законченное научное исследование. Основные результаты диссертации представлены в 12 научных работах, 3 из которых индексированы в базах данных WoS или Scopus и входят в список рекомендуемых изданий ВАК РФ. Результаты докладывались

на международных и всероссийских научных конференциях, а также обсуждались на научных семинарах Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что данная диссертационная работа «Асимптотические и численные методы исследования взаимодействия газовых пузырьков в жидкости вблизи их контакта в пульсирующем поле давления» удовлетворяет всем требованиям п.9 "Положения о порядке присуждении ученых степеней" ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), а ее автор, Сандуляну Штефан Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости газа и плазмы, главный научный сотрудник лаборатории физико-химической механики перспективных технологий, ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук



Борис Владимирович
Бошенятов

27 августа 2020 г.

Телефон: 8(495) 946-18-06 (служебный)

E-mail: bosbosh@mail.ru

Почтовый адрес: 125040, г. Москва, Ленинградский проспект,
д. 7, стр. 1.

Подпись г.н.с. Бошенятова Бориса Владимировича
Удостоверяю, ученый секретарь ИПРИМ РАН



Ю.Н. Карнет