

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

 д.ф.-м.н. Е.В. Ерманок

«21» ноября 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института гидродинамики имени М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук
о диссертационной работе Шмырова Андрея Викторовича «Динамика слоя поверхностно-активного вещества в жидких многофазных системах с конвективными течениями», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Шмырова А.В. посвящена экспериментальному исследованию структуры конвективного течения вблизи свободной поверхности, содержащей сурфактант, а также скорости движения самой поверхности под действием течений различной природы.

Граничные условия для скорости жидкости на межфазной поверхности, содержащей слой молекул сурфактанта, зачастую являются сложной функцией свойств этого слоя, что кардинально отличается от случая чистой межфазной поверхности. Необходимость правильной постановки граничных условий в задачах со свободной поверхностью диктует важность исследований, в которых прослеживается связь между различными физико-химическими свойствами слоя сурфактанта и гидродинамическими параметрами движущихся сред. К сожалению, полной математической модели, учитывающей все свойства слоя сурфактанта, на данный момент, не существует, что не позволяет использовать численное моделирование для прогнозирования поведения реальных многофазных систем, содержащих сурфактантные слои. К тому же величины различных констант, характеризующих эти слои, представлены в литературе очень по-разному – какие-то из них измерены достаточно точно, тогда как про другие удаётся найти противоречивые сведения, а некоторые величины вовсе неизвестны. В таких условиях основную роль в развитии этой области знания должен играть гидродинамический эксперимент, в котором нужно уделить достаточно внимания контролю физико-химических параметров межфазной поверхности. К настоящему моменту подобных исследований известно достаточно мало, в силу их междисциплинарной сложности. Таким образом, развитие этого направления исследований является весьма актуальным с точки зрения прогресса в гидродинамике многофазных сред.

Актуальностью данной темы и объясняется проведение диссертационного исследования.

Оценка содержания диссертации.

Рецензируемая диссертационная работа характеризуется полнотой и завершенностью. Текст диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цели и задачи. Описана структура диссертации, выделены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту. В конце введения приведены сведения об апробации работы, количестве публикаций по теме диссертации и личном вкладе автора.

Первая глава посвящена обзору капиллярных эффектов возникающих на межфазной границе и знакомству с различными свойствами сурфактантных слоёв. Здесь же приведены основные сведения о существующих экспериментальных методиках измерения концентрации молекул сурфактанта на границе раздела фаз. Гидродинамические следствия различных физико-химических свойств поверхностных слоёв проиллюстрированы на известных задачах межфазной или многофазной гидродинамики.

Вторая глава посвящена исследованию термокапиллярного течения в горизонтальной прямоугольной полости со свободной верхней границей, содержащей контролируемый слой сурфактанта. Интересной особенностью экспериментальной установки является способ задания постоянного градиента температуры вдоль свободной границы с помощью оптической системы, которая перераспределяет и направляет на неё излучение лампы накаливания. Приведено подробное описание методики исследования, экспериментальной установки, процедуры подготовки свободной поверхности и нанесения слоя молекул сурфактанта. В эксперименте удалось визуализировать положение застойной точки, отделяющей участок поверхности занятый сурфактантом от чистого участка. Выполнены измерения координаты застойной точки в зависимости от параметра подобия задачи, обнаружено расхождение полученных данных с аналитической формулой, полученной ранее. Предложено убедительное объяснение такого расхождения, а также выполнены собственные расчёты координаты застойной точки с учётом нелинейности уравнения состояния поверхностного слоя в предположении слабого влияния вязких касательных напряжений на положение застойной точки. Измерение поверхностной скорости в случае когда термокапиллярный эффект уравновешен эффектом Марангони позволило оценить величину коэффициента поверхностной диффузии в разреженных слоях сурфактанта. Судя по представленному в этой главе обзору литературы, такая оценка получена впервые, при этом она подтверждается теоретической оценкой сделанной ранее.

В третьей главе экспериментально исследуется устойчивость осесимметричного течения на плоской свободной поверхности, содержащей слой молекул сурфактанта. В отличие от задачи, исследованной во второй главе, движение жидкости на поверхности возможно в двух измерениях радиальном и азимутальном. При этом форма кюветы и характеристики источника течения предполагают сохранение исходной осевой симметрии течения. Обнаружено, что всё многообразие конвективных структур на межфазной поверхности удаётся описать при помощи двух параметров подобия, один из которых параметр упругости E , ответственный за сжатие течением слоя сурфактанта – тот же самый, что и в предыдущей главе. Для описания порогового характера возникновения вихревых периодических структур на межфазной поверхности, покрытой слоем сурфактанта вводится новый параметр подобия – поверхностное число Релея. Здесь же приведена количественная оценка критической величины этого параметра, превышение которой приводит к развитию неустойчивости в поверхностном слое. Интересно, что физический механизм этой неустойчивости может быть очень похож на механизм неустойчивости Релея-Бенара. Исследование структуры объёмного течения под

поверхностным слоем убедительно доказывает, что осесимметричное течение само по себе абсолютно устойчиво, а возникновение вихревых структур наблюдается лишь в тонком приповерхностном слое, сравнимым с толщиной вязкого пограничного слоя.

В приложении приведено описание экспериментальной методики генерации и измерения характеристик поверхностных волн, которая позволяет применять метод капиллярных волн для исследования физико-химических свойств поверхностных слоёв сурфактанта в очень малых объёмах исследуемой жидкости. Результаты верификации выполненных измерений независимыми методами выглядят убедительно.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты исследований и определены перспективы дальнейшей работы.

Следует отметить следующие полученные в диссертации **основные результаты**:

В случае динамического равновесия встречных капиллярных эффектов на межфазной поверхности, покрытой слоем сурфатанта поверхностная скорость не равна нулю и обусловлена величиной коэффициента поверхностной диффузии. В случае достаточно разрежённых поверхностных слоев эта скорость оказывается значительной, так что её можно измерить с хорошей точностью. Таким образом впервые появляется возможность экспериментального измерения коэффициента поверхностной диффузии в разрежённых слоях сурфактанта.

На межфазной поверхности наблюдается четыре различных конвективных режима, переходы между которыми описываются при помощи двух параметров подобия. Первый из них – параметр упругости E ответственен за сжатие слоя сурфактанта приложенными к нему касательными напряжениями той или иной природы. Положение границы сжатого слоя можно найти исходя из упрощённой модели, не требующей решения полной системы гидродинамических уравнений. Второй параметр подобия – поверхностное число Релея Ra_s ответственен за пороговый характер развития вихревых периодических структур в слое сурфактанта. Получена количественная оценка его критической величины.

Научная и практическая значимость работы имеет мультидисциплинарный характер. Правильная постановка граничных условий на свободной поверхности – одна из основных трудностей решения задач многофазной гидродинамики. Предложенные в работе методики приближённого расчёта площади сжатого слоя сурфатанта на основе уравнения баланса капиллярных напряжений могут быть полезны при оценке результатов численного моделирования в таких задачах. Полученные данные по величине поверхностной диффузии будут очень полезны в любых теоретических исследованиях касающихся динамики систем с межфазной поверхностью, покрытой разрежённым слоем сурфактанта. В свою очередь полученная оценка критической величины поверхностного числа Релея позволит прогнозировать развитие вихревой циркуляции на межфазной поверхности в задачах с различной геометрией и характерными размерами. Новая экспериментальная методика регистрации поверхностных волн может оказаться востребованной в физико-химических лабораториях.

Достоверность результатов обосновывается тщательной разработкой методик проведения экспериментов, подтверждается сравнением полученных результатов с известными данными других теоретических работ.

По содержанию диссертационной работы имеется несколько замечаний:

1. На рис. 2.5. изображена сплошной линией кривая, рассчитанная по формуле (2.4). Хорошо было бы указать на рисунке, в какой точке происходит смена режима зависимостей. Изображенная кривая очень уж гладкая; непонятно, как это достигается при указанных в (2.4) функциях.

2. В пункте 2.3.5 приведена формула (2.6), задающая равновесную поверхностную скорость, а на рис. (2.10) – сравнение с опытными данными. Вопрос: получена ли эта

формула из аппроксимации приведенных данных, а если да, то применялся ли метод наименьших квадратов и по каким параметрам?

Заключение

Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования гидродинамических течений в задачах со свободной поверхностью, содержащей поверхностно-активное вещество под действием сил различной природы.

Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Основные результаты исследований опубликованы в 10 работах, включая 10 статей в журналах из списка ВАК. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа «Динамика слоя поверхностно-активного вещества в жидких многофазных системах с конвективными течениями» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шмыров Андрей Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа обсуждалась на научном семинаре «Прикладная гидродинамика» федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН протокол заседания № 25 от 19.10.2022 г. Отзыв обсужден и одобрен на заседании № 25 от 19.10.2022 г.

Заведующий лабораторией прикладной
и вычислительной гидродинамики ИГиЛ СО РАН
доктор физико-математических наук

21.11.2022

Кузнецов Владимир Васильевич

Руководитель семинара «Прикладная гидродинамика»
чл.-корр. РАН,
доктор физико-математических наук

21.11.2022

Пухначев Владислав Васильевич

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН); сайт: <http://www.hydro.nsc.ru>

Почтовый адрес: 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Телефон: +7 (383) 333 30 46; +7 (383) 333 16 12

Адрес электронной почты: igil@hydro.nsc.ru, kuznetsov@hydro.nsc.ru

Подписи Кузнецова В.В. и Пухначева В.В. удостоверяю
Учёный секретарь ИГиЛ СО РАН к.ф.-м.н.



А.К. Хе

21.11.2022 г.