

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Бердникова В.С. на диссертацию Шмырова Андрея Викторовича “Динамика слоя поверхностно-активного вещества в жидких многофазных системах с конвективными течениями”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

В работе Шмырова А.В. систематизированы результаты экспериментальных исследований поведения слоя нерастворимых ПАВ (олеиновая и стеариновая кислоты) на поверхности слоя воды под действием однонаправленного термокапиллярного течения и осесимметричных течений различной природы. Выяснена роль физико-химических характеристик слоя ПАВ в динамике изучаемых многофазных систем.

**Актуальность темы работы** определяется тем, что многофазные среды широко распространены и применяются во многих технологических процессах – обогащения, теплообмена, химического синтеза и пр. В то же время, пока не удаётся построить полные физико-математические модели поведения таких сред, что позволило бы выполнить подбор оптимальных параметров управления многофазной средой, задействованной в том или ином процессе, средствами численного эксперимента. Особенно это касается многофазных сред, содержащих поверхностно-активные вещества на межфазных поверхностях. Понимание поведения таких систем до сих пор во многом опирается на анализ экспериментальных результатов. Хорошо известно, что малое количество молекул ПАВ на межфазной поверхности в жидких средах, из-за концентрационного эффекта Марангони, способно качественно изменить граничные условия для тангенциальной компоненты скорости. Гораздо менее изучены гидродинамические эффекты, связанные с другими физико-химическими характеристиками слоя ПАВ, обусловленными индивидуальными характеристиками и концентрациями. В гидродинамике традиционно принято считать, что эффекты, обусловленные физико-химическими свойствами ПАВ, если и существуют, то оказывают незначительный по сравнению с эффектом Марангони вклад в динамику межфазной границы. Однако результаты исследований, накопленных в экспериментаторами, специализирующимися в физико-химии межфазной поверхности свидетельствуют об обратном. Поэтому получение новых данных о гидродинамике и о ее влиянии на слои ПАВ на поверхности воды с использованием современных методов диагностики актуально.

**Новизна результатов** работы обусловлена в первую очередь тем, что впервые выполнены систематические экспериментальные исследования влияния физико-химических характеристик адсорбированного слоя ПАВ на характер и устойчивость режимов течения жидкой фазы. Впервые выполнены измерения положения застойной точки на границе слоя ПАВ. Предложена методика расчета положения застойной точки, дающая хорошее совпадение с результатами экспериментов. Впервые определена

величина коэффициента поверхностной диффузии для случая газообразного слоя ПАВ. Предложена новая методика измерения коэффициента поверхностной диффузии в динамических условиях. Впервые продемонстрировано, что возникновение много вихревых структур в слое ПАВ пороговым образом зависит от поверхностной сдвиговой вязкости этого слоя и от скорости течения жидкости под этим слоем. Предложен механизм формирования вихревой периодической структуры в застойной зоне и предложен безразмерный параметр, при критической величине которого в застойной зоне возникает движение. Количественная оценка этого параметра позволяет прогнозировать условия развития неустойчивости слоя ПАВ в задачах многофазной гидродинамики.

**Достоверность результатов** и обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертации, обеспечена разработкой адекватных методик проведения эксперимента, применением современной техники, методов визуализации и измерения физико-химических величин, воспроизводимостью результатов измерений, а также сравнением, где возможно, полученных результатов с результатами имеющихся, теоретических исследований и численного эксперимента.

**Научная значимость результатов** работы заключается в том, что они полезны с общетеоретической точки зрения. Получены новые данные, необходимые для развития гидродинамики многофазных сред и теории тепло-массообмена в системах с неоднородными пространственно-временными распределениями температуры и концентрации поверхностно активных веществ на свободных границах жидкостей или на границах раздела несмешивающихся жидких сред. Результаты работы могут быть использованы при анализе процессов тепло-массообмена в различных технических и технологических двухслойных (жидкость-газ) и многослойных (несмешивающиеся жидкость-жидкость-газ) системах, а также в природных условиях.

**Практическая значимость результатов** работы состоит в том, что они полезны при анализе технических и природных систем, в которых жидкой средой является вода, поскольку из-за её высокой поверхностной энергии межфазная граница практически никогда не бывает свободной от ПАВ. Представленные в работе экспериментальные методики могут найти применение в таких областях как контроль загрязнения межфазных поверхностей и измерение ряда физико-химических характеристик адсорбированных на них слоёв ПАВ. Выполненная модернизация метода капиллярных волн позволяет использовать его для изучения свойств межфазных поверхностей непосредственно внутри исследовательских или технологических установок в присутствии внешних силовых полей (электрических, магнитных, центробежных).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы, включающего 187 наименований. Работа содержит 29 рисунков и 1 таблицу. Общий объём диссертации составляет 163 страницы.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, выяснена степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, кратко описаны методологии и методы исследований, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов и информация о структуре работы.

**Первая глава** посвящена описанию физико-химических характеристик адсорбированных слоев ПАВ, и приведены примеры гидродинамических задач, в которых проявляются каждая из этих характеристик.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментального исследования динамики слоя нерастворимого ПАВ на поверхности воды в узкой прямоугольной полости (геометрия Хеле-Шоу). Движение на межфазной поверхности возникает в результате её неоднородного нагрева при помощи излучения галогеновой лампы пропущенного через систему линз. Параметры оптической системы подобраны так, чтобы распределение температуры на однородной поверхности, освещаемой с её помощью, содержало линейный участок. В эксперименте удалось реализовать постоянный градиент температуры вдоль исследуемой поверхности в качестве начального условия на межфазной границе. На самой межфазной поверхности присутствует слой олеиновой кислоты с контролируемой концентрацией. Под действием термокапиллярного эффекта изначально однородное распределение ПАВ на поверхности нарушается, возникает встречный градиент концентрации, который уравнивает термокапиллярные касательные напряжения. В результате на поверхности воды возникает динамическое равновесие двух встречных капиллярных механизмов. Для описания условий этого равновесия в работе используется безразмерный параметр подобия – параметр упругости  $E$ , который можно трактовать как отношение двух чисел Марангони, концентрационно-капиллярного и термокапиллярного. В случае, когда  $E > 1$ , динамическое равновесие возникает на всей межфазной поверхности. В случае  $0 < E < 1$ , термокапиллярный эффект превалирует над концентрационно-капиллярным, динамическое равновесие возможно лишь на части поверхности. Часть межфазной поверхности оказывается свободной от ПАВ, и на ней развивается термокапиллярное течение. Определено положение границы между этими двумя зонами в зависимости от величины параметра  $E$ . Обнаружено, что полученная в экспериментах зависимость существенно отличается от найденной в теоретических исследованиях, что обусловлено некорректностью некоторых допущений в теоретических моделях. Показано, что экспериментально полученные зависимости можно описать, исходя из решения лишь уравнения баланса капиллярных касательных напряжений, что говорит об относительно слабом влиянии вязких касательных напряжений на положение застойной точки. Выполнены измерения скорости на межфазной поверхности, находящейся в состоянии динамического равновесия двух

встречных капиллярных механизмов. Полученные данные были использованы для расчета величины коэффициента поверхностной диффузии с помощью формулы, известной из литературы. Для разреженных слоёв ПАВ такие измерения выполнены впервые, их результаты совпали по порядку величины с предсказаниями, полученными ранее в теоретическом исследовании.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований динамики слоев нерастворимого ПАВ на поверхности воды в цилиндрической кювете при наличии осесимметричного течения от центра к периферии. Движение на межфазной поверхности обеспечивается локальным источником – генератором течения, расположенным на оси кюветы. В работе использованы источники осесимметричных течений нескольких конструкций. Это позволило задействовать разные механизмы приведения жидкости в движение – только капиллярные, только объёмные и источники смешанного типа. Поверхность воды покрыта контролируемым слоем нерастворимого ПАВ, в качестве которого выступает олеиновая или стеариновая кислота. Применение различных ПАВ позволяет варьировать в эксперименте поверхностную сдвиговую вязкость. Показано, что всё многообразие конвективных структур на межфазной поверхности, наблюдаемых в эксперименте можно свести к четырём конвективным режимам, характеристики которых изучены экспериментально. Для одного из конвективных режимов приведены результаты исследования структуры течения в объёме воды, заполняющем цилиндрическую кювету. Осесимметричное течение оказывается устойчивым во всём объёме жидкости за исключением вязкого пограничного слоя, в котором наблюдается переход от осесимметричной структуры течения на глубине к вихревой периодической структуре на межфазной поверхности, занятой слоем ПАВ. Показано, что выбор одного из четырёх конвективных режимов в каждом конкретном случае можно предсказать на основе величин двух параметров подобия – параметра упругости  $E$  и поверхностного числа Рэлея, нового безразмерного параметра, введенного в диссертации. Первый параметр отвечает за сжатие слоя ПАВ и образование свободного от него участка межфазной поверхности, а второй описывает пороговый характер развития периодических вихревых структур на участке межфазной поверхности, занятом ПАВ.

**В приложении** дано описание экспериментальных методик возбуждения и регистрации высокочастотных цилиндрических капиллярных волн. Метод капиллярных волн используется для исследования реологических характеристик адсорбированных слоёв ПАВ и в классическом виде требует существенной площади межфазной поверхности и большого количества исследуемой жидкости. В представленной в работе модификации МКВ удаётся кардинально снизить этот объём. Компактность измерительной ячейки позволяет выполнять измерения характеристик межфазной поверхности в стеснённых условиях, например, внутри действующей лабораторной или технологической установки,

а также в присутствии внешних силовых полей (электрических, магнитных, центробежных).

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

**Замечания** по работе в целом:

1. В главе 1 на стр. 18 цитирование и главное интерпретация содержания работ [1 – 8] не корректны, т.к. надо говорить о том, что при нарушении устойчивости механического равновесия в подогреваемых снизу слоях жидкости со свободной поверхностью на относительную роль сил плавучести и термокапиллярного эффекта влияют *их толщина* и перепады температуры между горизонтальными границами.

2. При описании рабочего участка установки на стр.48 нет полного описания конструкции. Как устроен узел сжатия стеклянных стенок, насколько он массивен и как его наличие влияет на зависимость температуры от времени при включенном источнике ИК нагрева поверхности. Этот вопрос имеет общий характер и относится ко всей работе. Методология проведения экспериментов в части контроля температуры описана поверхностно. Нет информации о влиянии неизбежного монотонного роста температуры при непрерывном разогреве на поверхностях жидкости и ПАВ на измеряемые характеристики, на кривизну или форму поверхности слоя воды (чистую и со слоями ПАВ) при ее тепловом расширении. Зависимости поверхностного давления (изотермы сжатия, изотермы поверхностного давления – рис. 2.2 и рис. 3.3) для слоев олеиновой и стеариновой кислоты как функции относительной поверхностной концентрации представлены только для фиксированной температуры. Как эти данные можно применять при других температурах, при неоднородных распределениях и при монотонном изменении температуры во времени?

3. В тексте и в подписи к рис. 2.7, как и ко многим другим, не указано, при каких перепадах температуры или градиентах температуры получены экспериментальные данные. В подписи к рис. 2.8 (стр. 70) и в тексте нет информации о значениях длины чистой поверхности слоя воды в зависимости от времени при различных поверхностных концентрациях ПАВ, при каких значениях средней температуры и градиентах температуры получены данные не указано. На плоском рабочем участке эксперименты проведены при высотах слоя воды 3 и 8 мм, но в подписях к рисункам и в тексте не указывается, при какой высоте слоя получены конкретные данные. Аналогично в главе 3 указано, что эксперименты проводились в кюветах разных диаметров и при высотах слоев воды от 10 до 40мм, но в подрисуночных подписях нет соответствующих данных. В описании методологии экспериментов со слоями в цилиндрических кюветах при подаче струек воды и раствора этанола не указано были эксперименты выполнены в условиях монотонного увеличения высоты слоя или был организован сток жидкости и обеспечен постоянный заданный уровень.

4. Методология тепловизионных измерений распределений температуры на чистой свободной поверхности воды и при наличии слоя ПАВ в условиях облучения источником ИК излучения не описана совершенно. Как отраженное излучение могло повлиять на точность измерений? Как менялись во времени распределения температуры на всех поверхностях плоского рабочего участка (в Гл.1; и почему не приведены примеры термограмм – кадров из тепловизионных фильмов) и на поверхности жидкости в цилиндрической полости (Гл.3). При наличии горизонтальных градиентов температуры вдоль поверхностей слоев жидкости и неизбежных перепадов температуры между торцевыми стенками плоского рабочего участка и между центром слоя жидкости и стенками цилиндрической кюветы обязательно развивается термогравитационная конвекция. Поэтому необходимо оценивать соответствующие числа Рэлея и их соотношения с числами Марангони. Роль сил плавучести по мере разогрева может возрасти и это влияет на исследуемые процессы.

5. В работе встречаются физически не корректные выражения. Например, в водной части на стр.8 “в результате кризиса потока импульса, переносимого вязкими силами из движущегося объема жидкости на межфазную поверхность” (как диссипативные силы что-то переносят?); на стр. 10 “Величина поверхностной диффузии слоя ПАВ” (наверное коэффициента диффузии!); на стр.54 “что соответствует максимальной разности поверхностного натяжения, обусловленной термокапиллярным механизмом” и на стр. 60 “значение критического приращеня поверхностного натяжения ... обусловленного термокапиллярным механизмом”; на стр.90 “Увеличение поверхностного натяжения, вызванное термокапиллярным механизмом” (здесь явно перепутаны причины и следствия); на стр. 68 “Безразмерное положение застойной точки”; на стр.70 “Временная эволюция поверхностной скорости...”; на стр. 95 “Зависимость размера безразмерной застойной зоны от числа упругости...”

6. Есть противоречия в интерпретации полученных результатов. Например, утверждается в разделе 3.3.4: стр. 98 “Наблюдения за вихревой структурой течения, формирующейся на границе раздела в застойной зоне показало, что размер и количество вихрей *не зависят от типа и интенсивности источника* и поверхностного давления в слое ПАВ и определяются только шириной застойной зоны”. Но на Стр. 99 “В конце этого раздела *необходимо обсудить разброс, который хорошо виден на рисунке 3.7в между данными по экспериментам с источником М1 и всеми остальными источниками. ... Влияние этанола проявляется не только в разбросе данных, но и в форме вихрей. ... Этот же фактор приводит к большему количеству вихрей* по сравнению с другими источниками при фиксированном размере застойной зоны, что видно на рисунке 3.7в.”

Сделанные выше замечания имеют исключительно конструктивный характер и не исключают общую положительную оценку работы. В целом диссертация Шмырова

Андрея Викторовича – завершённый этап научных исследований, выполненных на высоком методическом уровне. Работа хорошо оформлена с использованием современных средств. Основная часть работы написана на профессиональном уровне. Список публикаций состоит из 10 печатных работ в журналах, все из которых входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. В них достаточно полно отражены основные результаты диссертацию.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Таки образом, можно сделать заключение, что диссертация Шмырова Андрея Викторовича является оригинальной, завершённой научно-квалификационной работой, в которой наиболее важными являются новые научные результаты исследований влияния физико-химических параметров поверхностно-активного вещества на динамику и устойчивость адсорбированного слоя ПАВ при его взаимодействии с конвективными течениями. Считаю, что диссертация Шмырова Андрея Викторовича по своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и их научно-практической значимости удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п.9 “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации, а сам Шмыров Андрей Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки «Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН»  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева д.1  
тел. +7 (383) 316-53-32, e-mail: [berdnikov@itp.ncs.ru](mailto:berdnikov@itp.ncs.ru)

 /Бердников Владимир Степанович/ 21 ноября 2022 г.

Подпись В.С. Бердникова удостоверяю:  
Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.  
 /М.С. Макаров/

