

ОТЗЫВ
официального оппонента к.ф.-м.н. Субботина С.В.
на диссертационную работу 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»

Диссертационная работа Шмырова А.В. посвящена экспериментальному исследованию взаимодействию нерастворимого слоя ПАВ (поверхностно активное вещество) с жидкостью в полостях различной геометрии. Интерес обусловлен разработкой новых перспективных методов управления тепло- и массопереносом в многофазных системах с границей раздела. В данном случае адсорбированный слой ПАВ может выполнять роль отдельной фазы и сильно влиять на динамику движения жидкости во всей системе. В связи с этим важно научиться учитывать сложные физико-химические аспекты реальных ПАВ, выходящие за рамки простых теоретических моделей. Однозначно, физический эксперимент здесь является ключевым, что определяет **актуальность работы**.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 187 наименований и приложения. Общий объем работы – 163 страницы, включая 29 рисунков и 1 таблицу.

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

Первая глава посвящена общему описанию движения жидкости при наличии пленок ПАВ, проанализирована литература по современному состоянию проблемы. Рассмотрены как термо-, так и концентрационно-капиллярные эффекты на межфазной границе. Дан подробный обзор физико-химических характеристик ПАВ (поверхностное давление, поверхностная диффузия, нелинейное уравнение состояния, адсорбция/десорбция, дилатационные упругость и вязкость слоев ПАВ, сдвиговая упругость и вязкость). Определено место диссертационного исследования среди работ других авторов.

Вторая и третья главы посвящены описанию проводимых экспериментальных исследований.

Во второй главе экспериментально исследуется взаимодействие течения в ячейке Хеле-Шоу со слоем нерастворимого ПАВ. Движение жидкости задается путем создания постоянного градиента температуры на свободной поверхности. В такой постановке движение на поверхности одномерное, в то время как в объеме жидкости – двумерное. Показано, что структура течения определяется одним безразмерным параметром – числом эластичности E , который определяется как отношение концентрационно-капиллярных эффектов к термокапиллярным. Если $E < 1$, термокапиллярное течение сжимает слой ПАВ, при этом одновременно действует встречный эффект Марангони, тормозящий это течение. В результате возникает чистый участок межфазной поверхности, граничащий с застойной зоной, занятой ПАВ. Положение границы застойной зоны зависит от сжимаемости слоя ПАВ. Проведены расчёты положения застойной зоны на основе решения уравнения баланса касательных напряжений, в предположении малости вязкого слагаемого; продемонстрировано хорошее согласие с экспериментом. В ситуации, когда $E > 1$, вся межфазная поверхность является застойной зоной. Для разраженного (газообразного) слоя ПАВ предложен метод измерения коэффициента поверхностной диффузии на основе измерения скорости поверхностного течения.

В третьей главе исследовано взаимодействие течения со слоем ПАВ в осесимметричной геометрии. В зависимости от механизма движущей силы рассмотрены различные источники движения жидкости: источники поверхностного типа (S), объемного типа (V) и смешанного типа (M). Обнаружено четыре различных конвективных режима. I. Система периодических по азимуту вихревых пар ($E > 1$). II. Слой ПАВ оттесняется от источника течения в виде кольца, в котором формируется многовихревая азимутально-периодическая система вихрей; внутри кольца существует круглая зона чистой от ПАВ поверхности с интенсивным осесимметричным течением в ней ($E < 1$). III. Осесимметричное растекание жидкости под неподвижным слоем ПАВ (слабая интенсивность течения). IV. Двухзонное течение в отсутствии движения во внешнем кольцевом слое ПАВ. Продемонстрировано, что наличие трения под застойной зоной является необходимым условием для развития многовихревой структуры на поверхности. Предложен механизм ответственный за возникновение неустойчивости и соответствующий безразмерный комплекс – поверхностное число Рэлея Ra_s , который зависит от величины вязких касательных напряжений на межфазной поверхности, протяжённости застойной зоны и вязких характеристик жидкости и слоя ПАВ.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложении описана методика модернизированного метода капиллярных волн для определения равновесных и динамических свойств слоёв ПАВ.

Теоретическая значимость работы обусловлена обилием полученных закономерностей в многофазных системах, содержащих слой ПАВ. Оценки, сделанные для коэффициента поверхностной диффузии, указывают на необходимость пересмотра теоретических результатов для разряженных слоев ПАВ. Введение новых безразмерных комплексов позволит предсказать условия развития многовихревой циркуляции в слое ПАВ, что является **важным с прикладной точки зрения** в задачах управления массопереноса на границе раздела.

Обнаруженные в рамках диссертационного исследования явления обладают **научной новизной**. Можно отметить несколько ярких результатов:

1. Впервые выполнены измерения положения застойной точки на границе слоя ПАВ с нелинейным видом уравнения состояния.
2. Впервые измерена величина поверхностной диффузии разряжённого слоя ПАВ.
3. Впервые показано, что механизм возникновения многовихревых структур в слое ПАВ связан с поверхностной сдвиговой вязкостью этого слоя.

Основные научные результаты опубликованы в 10 различных работах, две из которых в одном из самых авторитетных журналов по гидродинамике **Journal of Fluid Mechanics**.

По диссертации Шмырова А.В. существенных замечаний нет. Работа выполнена на очень высоком уровне и написана грамотным научным языком, все описанные результаты хорошо проанализированы, проделанная работа является подспорьем для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Хочется отметить первую главу диссертации, которая не является формальным обзором литературы, а по настоящему вводит читателя в задачу, что является показателем глубины понимания проблемы. В то же время, можно было бы рекомендовать сопроводить эту часть диссертации иллюстративным материалом. Так, например, об уравнении состояния подробно рассказывается на 29 странице, а вид самого графика приводится только во второй главе на 55 странице. Несомненной заслугой диссертанта является разработка уникальных экспериментальных установок и методик. Здесь стоит отметить модернизацию метода капиллярных волн, который опубликован в 2019 году в **Physics of Fluids**, и великолепно цитируется (Приложение А). **Достоверность результатов и выводов** не вызывает

сомнений и обеспечивается использованием надежных современных методик измерения и обработки данных, детальным изучением и анализом результатов, сравнением полученных данных с результатами других авторов. Несмотря на высокий уровень выполненных исследований, к тексту диссертации могут быть высказаны следующие **вопросы и незначительные замечания:**

1. В тексте диссертации существует путаница в обозначениях одних и тех же физических величин. Например, начальная концентрация в тексте второй главы обозначается как Γ_0 , а на рисунках 2.5, 2.7, 2.10 и.т.д. – Γ ; поверхностное давление в текстах первой и второй главы π , а в уравнениях третьей главы уже Π ; длина ячейки обозначается как L , так и l и т.д. Должен признаться, это сильно затрудняет восприятие информации, учитывая, что общее число параметров исчисляется несколькими десятками. Ситуацию могло бы поправить Приложение с полным списком обозначений, которое бы служило ориентиром, как для самого диссертанта, так и читателей.

2. В Главе 2 исследуется течение в кюветах с размерами либо $1.6 \times 0.8 \times 0.25$ см, либо $1.6 \times 0.3 \times 0.25$ см, которые автор называет вертикальными ячейками Хеле-Шоу. В последнем случае кювета представляет собой призму с практически квадратным основанием, расположенную горизонтально. Возникает вопрос о применимости приближения Хеле-Шоу в этом случае. Проводились ли измерения полей скорости в разных сечениях, проходящих вдоль длинной стороны кюветы?

3. К сожалению, встречаются опечатки в формулах и тексте. Так, на стр. 65 в формуле для E вместо σ_Γ должно быть σ_g . Судя по описанию рис. 2.4 на стр. 60 обозначение кривых 1 и 2 также перепутано. В подписи к рис. 2.6 безразмерная координата x_c/L , а на самом рисунке – x_c и т.д.

4. Для описания результатов экспериментов по измерению положения застойной точки (Глава 2) автор сразу вводит параметр упругости E , который зависит от начальной концентрации ПАВ и разности температуры ΔT . Хотя это и не отмечено в тексте, но можно догадаться, что на рис. 2.6 параметр E меняется только за счет ΔT . Верно ли, что на рис. 2.7 экспериментальные точки получены при фиксированном ΔT , но различных значениях Γ_0 ? Что можно сказать о воспроизводимости данных и о доверительных интервалах?

5. В тексте говорится об измерениях при помощи лотка Ленгмюра и пластинки Вильгельми. Для широкого круга читателей можно было предусмотреть расширенное описание техники экспериментов.

6. Как соотносятся между собой цвета на периферии термограммы (рис. 3.6a) и количество пар вихрей? Соответствуют ли друг другу левая и правая части рисунка?

7. Ничего не сказано о контроле за высотой заполнения кюветы в ходе одного эксперимента при использовании источников V-типа в третьей главе. Зависит ли количество вихревых пар от высоты слоя жидкости? В продолжение этого вопроса можно отметить, что в параграфе 3.2.1 говорится об использовании кювет разного диаметра (от 8 до 17 см) с глубиной от 1 до 4 см. На что влияет аспектное соотношение?

Заключение. Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Шмырова Андрея Викторовича. Работа выполнена на очень высоком научном уровне, а сам соискатель является признанным специалистом в области межфазной гидродинамики. Считаю, что диссертация по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и уровню научно-практической значимости результатов 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 несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Доцент кафедры физики и технологии
ФГБОУ ВО «Пермский государственный
гуманитарно-педагогический университет»,
кандидат физ.-мат. наук

Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24,
ПГГПУ, <http://pspu.ru>
Телефон – 8-963-880-60-80
E-mail: subbotin_sv@pspu.ru


Субботин Станислав
Валерьевич

22.11.2022

Подпись Субботина С.В. заверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО "ПГГПУ"
Гранкина Е.Н.

