

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ
на Шмырова Андрея Викторовича,
представившего диссертацию
«Динамика слоя поверхностно-активного вещества в жидкких
многофазных системах с конвективными течениями»
на соискание ученой степени **кандидата физико-математических наук**
по специальности **1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Шмыров Андрей Викторович начал заниматься научной работой в лаборатории гидродинамической устойчивости в 1995 году, будучи студентом 3 курса физического факультета Пермского государственного университета. После успешного окончания указанного университета по направлению «Физика», квалификация «Специалист», Андрей Викторович поступил в очную аспирантуру Института механики сплошных сред УрО РАН по специальности «01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы». К сожалению, по не зависящим от Андрея Викторовича обстоятельствам, изначально сформулированная в рамках аспирантуры задача не была доведена до стадии законченного диссертационного исследования, и в 2014 году ему была предложена новая тема для исследования, работа над которой и привела к представлению рассматриваемой диссертации.

В качестве диссертационной работы Андрею Викторовичу было предложено исследовать задачу о динамике слоя поверхностно-активного вещества при наличии конвективных течений в объеме. Данная тематика, лежащая на стыке межфазной гидродинамики и физической химии, является одной из наименее исследованных проблем современной гидродинамики. Присутствие сурфактанта ((сокр. от англ. surface-active agent, синоним ПАВ), адсорбирующегося на межфазной поверхности в виде мономолекулярного слоя, приводит к существенному усложнению традиционных задач механики жидкости. Наличие у сурфактанта своих собственных характеристик, таких как поверхностные давление и плотность, поверхностная диффузия и поверхностная реология, приводят к необходимости рассмотрения слоя сурфактанта, как отдельной двумерной жидкости, для успешного описания которой гидродинамические модели должны быть дополнены

самостоятельными уравнениями состояния, а также переноса массы и импульса. Кроме того, наличие адсорбционно-десорбционных процессов, характерных для растворимых сурфактантов, требует включения дополнительных уравнений переноса между двумерным и трехмерным континуумами. В результате, решение столь непростой проблемы аналитическими методами в рамках теоретического исследования не представляется возможным, и на первый план выходят численные методы исследования. Однако для их успешного применения необходимы знания о численных значениях физико-химических характеристик слоя сурфактанта и их функциональной зависимости от параметров задачи – температуры, поверхностной концентрации, pH объемной фазы и т.д. В отсутствие или при недостаточной точности имеющихся данных измерений, наличие свободных параметров в численном моделировании приводит к появлению множества возможных решений, валидация которых возможна только путем сравнения с результатами эксперимента.

В такой ситуации основным инструментом исследований, по-прежнему, остается лабораторный эксперимент. Следует отметить, что лабораторные исследования подобных проблем являются одними из наиболее сложных в современной гидродинамике. В наибольшей степени это обусловлено отсутствием простых и универсальных методов измерения концентрации сурфактанта на поверхности. Существующие методы не всегда доступны, например, метод нейтронного рассеяния, и, как правило, пригодны только для ограниченного класса веществ. В результате исследователь вынужден судить о присутствии сурфактанта и его распределении на межфазной поверхности лишь косвенно, например, из анализа полей скорости жидкости или динамики свободной поверхности. Однако для решения такой обратной задачи необходимо иметь некую модель явления, создание которой, как говорилось выше, осложнено недостатком экспериментальных данных. В результате получается замкнутый круг, когда несовершенство эксперимента не позволяет выделить корректную теоретическую модель, которая могла бы помочь развитию экспериментальных методик. Сложности подобным задачам добавляет тот факт, что различные физические процессы в слое сурфактанта могут влиять на гидродинамические процессы схожим образом, что

затрудняет интерпретацию экспериментальных данных. Во многих отношениях поверхностно-активные вещества ведут себя как "скрытые переменные", которые нельзя измерить напрямую, но которые влияют на потоки жидкости настолько глубоко, что их необходимо определить, чтобы понять даже грубые, качественные явления в жидкости.

В такой ситуации на первый план выходит поиск таких постановок лабораторного эксперимента, в рамках которых удалось бы разделить вклады различных эффектов и изучив их влияние по отдельности. В рамках диссертационного исследования Андрею Викторовичу было предложено реализовать экспериментально две такие постановки.

Считаю, что Андрей Викторович блестяще справился с поставленной задачей. В частности, им были проведены исследования динамики слоя сурфактанта в узком канале, что навязывает одномерное течение на межфазной поверхности. Такой выбор геометрии позволяет исключить из рассмотрения эффекты поверхностной вязкости и сосредоточиться на влиянии дилатационных характеристик слоя. Использование нерастворимого сурфактанта исключает из рассмотрения адсорбционно-десорбционные эффекты. В качестве внешнего воздействия на слой сурфактанта им было предложено использовать термокапиллярный эффект, для чего была разработана и реализована уникальная методика создания температурного профиля на межфазной поверхности за счет излучения в инфракрасном диапазоне. Задача о динамике слоя сурфактанта на неоднородно нагретой поверхности была исследована теоретически около сорока лет назад, но экспериментально реализована впервые. По результатам исследования было продемонстрировано предсказанное ранее в теоретических работах пороговое формирование двух зон на поверхности: зоны свободной от сурфактанта, где развивается интенсивное термокапиллярное течение, и застойной зоны, сформированной молекулами сурфактанта на периферии. Полученные Андреем Викторовичем результаты позволили не только скорректировать вид безразмерного параметра задачи, но и показать некорректность некоторых предположений, сделанных при построении теоретической модели. Кроме того, им было впервые показано, что положение границы между зонами определяется также фазовым состоянием

в слое сурфактанта и продемонстрирована возможность существования в пределах слоя областей с разным фазовым состоянием. При выполнении данных исследований предложена методика визуализации распределения сурфактанта на неизотермической межфазной поверхности с помощью тепловизора. Для описания полученных результатов Андреем Викторовичем предложена простая аналитическая модель, результаты расчетов в рамках которой продемонстрировали отличное согласие с результатами лабораторного эксперимента. Также им была предложена и впервые реализована уникальная методика измерения коэффициента поверхностной диффузии в динамических условиях, т.е. при наличии течения на границе раздела. Это позволило впервые провести измерения данного параметра в разреженных слоях сурфактанта.

Вторая из реализованных в диссертационном исследовании экспериментальных постановок касается динамики слоя сурфактанта при наличии осесимметричных течений под поверхностью раздела. В такой постановке основной интерес был сосредоточен на возникновении на межфазной поверхности, занятой молекулами сурфактанта, многовихревого течения, периодического в азимутальном направлении. Такие течения наблюдались ранее многими исследованиями, но адекватного физического объяснения их происхождению до сих пор предложено не было. Андреем Викторовичем было впервые проведено систематическое экспериментальное исследование данной проблемы с использованием как различных способов создания течения, так и сурфактантов с различными реологическими характеристиками. В результате проведенных исследований им было показано, что развитие многовихревого течения является результатом неустойчивости механического равновесия слоя сурфактанта, которая развивается при достижении критического потока импульса со стороны течения в объеме. Анализ отношения характерных времен процессов, участвующих в формировании неустойчивости, позволил предложить в работе безразмерный параметр подобия задачи и оценить его критическое значение из результатов экспериментов.

Высокий уровень диссертационного исследования подтверждается опубликованием полученных результатов в ведущих мировых журналах,

входящих в первый квартиль журналов по механике жидкости.

Поскольку тематика диссертационного исследования является междисциплинарной, Андрею Викторовичу пришлось самостоятельно изучать основы таких научных дисциплин, как химия и физическая химия, что подчеркивает его способность к самообучению. Объем самостоятельно изученных первоисточников подтверждается довольно обширным списком цитируемой литературы, использованным в диссертационной работе. За время выполнения диссертационного исследования Андрей Викторович освоил сложный комплекс измерительного оборудования, относящийся к измерениям свойств межфазных поверхностей и характеристик поверхностно-активных веществ. Кроме того, в ходе работы над диссертацией им была предложена существенная модернизация метода капиллярных волн. Несмотря на давнюю историю данного метода, он до недавнего времени оставался на периферии научных исследований в силу несовершенства методик как генерации волны, так и измерений ее характеристик. Предложенные докторантом новые решения, основанные на применении акустического метода возбуждения высокочастотной вынужденной капиллярной волны в сочетании с интерференционным методом фиксации мгновенного профиля поверхности, позволили повысить точность метода и, что наиболее важно, максимально адаптировать его для исследования физико-химических характеристик слоев сурфактанта в физико-химических и биохимических задачах, где объем исследуемой жидкости, как правило, существенно ограничен. Важность предложенных изменений метода и высокий интерес исследователей к данной работе подчеркивается тем фактом, что статья с описанием модернизированного метода набрала около тысячи прочтений и более десяти сторонних цитирований за три года после публикации в журнале.

Работая над диссертацией, Андрей Викторович принимал активное участие во всероссийских и международных конференциях различного уровня, а также многих научно-исследовательских проектах и программах. По тематике диссертационного исследования им опубликовано 10 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Считаю, что отличная базовая подготовка и опыт научно-исследовательской работы, полученные Шмыровым Андреем Викторовичем за время работы над диссертацией, позволяют считать его квалифицированным научным специалистом, заслуживающим присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Научный руководитель:

Заведующий лабораторией гидродинамической
устойчивости ИМСС УрО РАН,
д.ф.-м.н., доцент

 Мизёв Алексей Иванович

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Тел.: +7 (342) 237-83-14

E-mail: alex_mizev@icmm.ru

Я, А.И. Мизев, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

 / Мизев А.И./

07 сентября 2022 г.

