

Отзыв официального оппонента

о диссертации А.И. Мизева «Тепловая и концентрационная конвекция Марангони в задачах с плоской и цилиндрической геометрией», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Согласно традиции, отзыв официального оппонента начинается с обоснования актуальности избранной темы и степени ее разработанности. На первый вопрос достаточно убедительный ответ дан диссертантом, и мне остается сделать несколько добавлений.

Эффекты Марангони в наибольшей степени проявляются в ситуациях, когда поверхностные силы сравнимы с объемными или доминируют над ними. Они играют основную роль в процессах, происходящих в условиях микрогравитации. Однако критерии подобия течений жидкости устроены так, что в их числители входит произведение гравитационного ускорения на характерный линейный размер в некоторой положительной степени. На этом основана аналогия между процессами переноса при пониженной гравитации и в микромасштабах (В.В. Пухначев, G.M. Homsy, 2006). Кроме того, даже в нормальных условиях эффект Марангони может служить фактором отбора вторичных течений, возникающих при потере устойчивости основного состояния. Именно этот фактор выделяет гексагональные ячейки в проблеме Рэля-Бенара (Е.А. Кузнецов и М.Д. Спектор, 1980). Наконец, конвекция Марангони (концентрационная или тепловая) проявляет себя в движениях эмульсий и несмешивающихся жидкостей с близкими плотностями.

Чтобы эффекты Марангони были заметны, достаточно малость размера системы хотя бы в одном направлении. Неудивительно, что огромное число работ по термокапиллярной и концентрационно-капиллярной конвекции посвящено пленочным течениям. В диссертации А.И. Мизева исследованы течения объемной природы, что выгодно выделяет ее на общем фоне. Кроме того, эта диссертация помогает исправить сложившийся дисбаланс между работами численного и аналитического характера и экспериментальными исследованиями течений Марангони. Сказанное подтверждает актуальность темы диссертации.

Что касается степени разработанности выбранной темы, то следует оценивать в сравнении с результатами предшественников. Могу сказать, что в большинстве работ по течениям Марангони изучается термокапиллярная конвекция. Этот случай характерен тем, что температура не разделяется на поверхностную и объемную. Если же в жидкости присутствуют растворимые

поверхностно активные вещества (ПАВ), то значения их концентраций на поверхности и в объеме различны (они связаны изотермой адсорбции). Это обстоятельство усложняет экспериментальную и теоретическую стороны дела. Ситуация усугубляется, если, вместе с растворимыми, имеются и нерастворимые ПАВ. Именно такой случай рассмотрен диссертантом (задачи о затопленном источнике тепла или массы). Еще один пример относится к тепловой конвекции в плоском слое. Здесь известны два классических случая – задача Бенара-Марангони (градиент температуры перпендикулярен слою жидкости) и задача Остроумова-Бириха (градиент температуры направлен вдоль слоя). Диссертант впервые экспериментально изучил устойчивость плоского горизонтального слоя жидкости с верхней свободной границей при наличии наклонного градиента температуры.

Эти примеры демонстрируют новизну постановок задач диссертации. Естественным следствием является и новизна полученных результатов. Нет необходимости перечислять все результаты; остановлюсь лишь на некоторых из них. Показано, что затопленный источник тепла способен генерировать поверхностные волны, и они являются единственным типом неустойчивости в такой системе. Тем самым, экспериментально подтверждено теоретическое предсказание работы M. Smith & S. Davis [29]. Система возникающих волн обладает большим разнообразием, включая цилиндрические и спиральные волны; последние делятся на два семейства.

В задаче о локализованном источнике ПАВ обнаружено два режима движения – стационарный и колебательный, причем период колебаний может быть очень большим. Дано наглядное физическое объяснение этого явления.

Очень детально рассмотрена концентрационно-капиллярная конвекция в системе несмешивающихся жидкостей. Изучены случаи как растворимых, так и нерастворимых сурфактантов. Оказалось, что помещение на интерфейс даже малого количества нерастворимого ПАВ приводит к нарушению осевой симметрии течения, первоначально обладавшего таковой; при этом вблизи оси симметрии экспериментальной установки осесимметричный характер течения сохраняется. Данный вывод важен потому, что в технологических приложениях практически невозможно исключить попадание нерастворимых ПАВ на межфазную границу.

Насколько мне известно, прямых методов измерения коэффициента поверхностной диффузии сурфактанта не существует. Диссертант остроумно реализовал способ его измерения в экспериментах со смешанной конвекцией (термокапиллярной и концентрационно-капиллярной). Опыты проводились в ячейке Хеле-Шоу, что позволило подавить возможные неустойчивости по отношению к двумерным возмущениям.

Характер конвективного течения определяется величиной параметра упругости E . Если $E > 1$, то сурфактант находится в разреженном (газовом) состоянии, и вся свободная поверхность представляет застойную зону. Автор показал, что величина коэффициента поверхностной диффузии в этом случае может на два-четыре порядка превышать значения, использованные ранее в теоретических работах.

Случай $0 < E < 1$ более сложен. Здесь застойная зона соседствует с участком, свободным от сурфактанта, на нем развивается термокапиллярная конвекция. Автор не только провел измерения коэффициента диффузии, но и на основе простых физических соотношений вывел формулу для параметра E (4.3). Результаты расчета по этой формуле хорошо согласуются с данными эксперимента, чего нельзя сказать о зависимости, предложенной в работе В. Carpenter & G.M. Homsy [112].

Оригинальностью отличается исследование устойчивости плоского горизонтального слоя в присутствии наклонного градиента температуры. В задаче имеется три управляющих параметра – два числа Марангони и аналог числа Бонда. Здесь имеются четыре качественно различных вида вторичных течений, три из которых были описаны ранее. Диссертант обнаружил новый тип неустойчивости, возникающий при больших числах Бонда. Он отвечает за появление структур, наблюдаемых при выращивании кристаллов методом Чохральского.

Выше упомянуты некоторые результаты, изложенные в главах 2-5 диссертации. Заключительная шестая глава является самой большой по объему. В ней изучены механизм аккумуляции твердых включений тепловой конвекцией Марангони в жидком мостике и образующиеся в нем структуры. В качестве рабочих жидкостей использовались *n*-декан и смесь расплавов нитрата натрия и нитрата цезия. Эксперименты с такими расплавами более трудоемки, но они дают возможность наблюдать течения в жидких мостиках с большим аспектным отношением. Еще большие возможности доставляют эксперименты в условиях микрогравитации. Один из них был выполнен в рамках проекта MAXUS-6 Европейского и Немецкого космических агентств на беспилотном (хочется подчеркнуть это слово) космическом аппарате.

На основе проведенных экспериментов диссертант сформулировал необходимое и достаточное условия существования аккумуляционных структур. Будучи существенно трехмерными, эти структуры дают подробное представление о характере движений в жидком мостике в процессе развития неустойчивостей. Важным является вывод о том, что аккумуляция твердых частиц не чувствительна к наличию силы тяжести и наблюдается в условиях космического полета.

Переходя к оценке достоверности полученных результатов, должен сказать, что я не являюсь экспериментатором и не могу профессионально оценить такие моменты, как адекватность измерительной аппаратуры или степень погрешности измерений. Этим объясняется практическое отсутствие замечаний по диссертации. Здесь я полагаюсь на высокий научный уровень Пермской гидродинамической школы, представителем которой является автор. О достоверности результатов диссертации также свидетельствует широкая их апробация и сравнение с публикациями других исследователей – как экспериментального, так и теоретического плана.

Обсуждаемые результаты имеют несомненное научное значение. Они состоят как в совершенствовании методической базы для проведения опытов в земных и космических условиях, так и в постановке задач для специалистов в области математического моделирования и теории гидродинамической устойчивости. Одна из них – разработка процедуры двухмасштабного временного разложения для расчета течений на больших временах, которые формируются в результате совместного действия термокапиллярных и концентрационно-капиллярных сил.

Диссертация написана хорошим языком и богато иллюстрирована. Число замеченных опечаток невелико. Список цитированной литературы, содержащий 239 наименований, представляет самостоятельную ценность. В этом списке указано лишь 27 публикаций на русском языке. К сожалению, в нем отсутствуют ссылки на работы В.А. Батищева, В.В. Кузнецова и А.С. Овчаровой, связанные с тематикой диссертации.

Результаты А.И. Мизева, выносимые на защиту, прошли широкую апробацию. Они докладывались на 13 отечественных и 12 международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 13 статей в журналах из списка ВАК, среди которых такие авторитетные издания как *Advances in Colloid and Interface Science*, *Physics of Fluids*, *Microgravity Science and Technology*. Четыре статьи написаны без соавторов.

Автореферат диссертации хорошо отражает ее содержание. Он может служить основой для написания обзора по тематике диссертации.

Диссертация А.И. Мизева является законченным экспериментальным исследованием по физической гидродинамике. Ее результаты стимулируют теоретические исследования в области конвекции и поверхностных явлений в жидкости. Развитые диссертантом оригинальные экспериментальные методы наверняка найдут применение в работах последователей. Они могут быть востребованы для оптимизации технологических процессов роста кристаллов и очистки полупроводниковых материалов.

У меня нет сомнений в том, что Алексей Иванович Мизев заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор,
главный научный сотрудник федерального
государственного бюджетного учреждения
науки «Институт гидродинамики им. М.А.
Лаврентьева Сибирского отделения РАН»
630090, г. Новосибирск, пр. Академика
Лаврентьева, д. 15, тел. +7 (383) 333-18-19
e-mail: pukhnachev@gmail.com

Пухначев / Пухначев Владислав Васильевич / «28» января 2019 г.

Подпись В.В.Пухначева удостоверяю:

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН

Любашевская / И.В. Любашевская /

