

## Отзыв официального оппонента

на диссертацию Георгия Сергеевича Ганченко

«Микротечения электролита в электрическом поле и их устойчивость»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Г.С. Ганченко посвящена изучению поведения электролита под действием электрического поля в микро- и наномасштабах. Рассмотрены течение плёнки электролита со свободной границей под действием электрического поля, направленного вдоль плёнки; и течение электролита, возникающее в канале между электрическими мембранами при наличии разности потенциалов между мембранами.

Исследования микромасштабных течений жидкости под действием внешних полей получили в последнее время активное развитие, что связано с возможностью создания новых методик управления жидкостью в микро- и наномасштабах. Особое значение указанные выше явления имеют для медицины, где ставится задача адресной доставки лекарств и вопросы диагностики. Поэтому **актуальность проведенных исследований** не вызывает сомнения.

**Практическая значимость** заключается в возможности применения теоретических результатов, полученных в работе, для проектирования лабораторий на чипе, принцип работы которых основан на управлении рабочей жидкостью в микро- и наномасштабах.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений.

**Во введении** дается краткий обзор имеющихся на данный момент экспериментальных и теоретических результатов других авторов, формулируются основная цель и задачи работы, перечисляются положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации посвящена описанию основных математических моделей, используемых при моделировании явлений, рассматриваемых в диссертации. В этой главе сформулированы основные системы дифференциальных уравнений и поставлены краевые условия для двух типов течений: со свободной границей и между электрическими мембранами.

**Во второй главе** рассматривается течение плёнки электролита на заряженной твердой подложке при наличии тангенциального к пленке постоянного электрического поля. Аналитически с помощью приближения Дебая-Хюккеля для малых чисел Дебая и численно для произвольных значений найдено одномерное стационарное течение пленки. Проведено сравнение одномерного решения с результатами экспериментов других авторов, целью которых было измерение скорости течения микропленки при электроосмотическом течении. Сравнение показало хорошее соответствие

теоретических результатов, полученных диссертантом, с экспериментальными данными.

Далее рассматривается устойчивость одномерного течения по отношению к двумерным, периодическим вдоль пленки возмущениям: проведен асимптотический анализ для малых волновых чисел; обнаружено, что одномерное течение неустойчиво по отношению к длинноволновым возмущениям. Численное решение линейной задачи показало, что одномерное течение неустойчиво и по отношению к коротковолновым возмущениям. Проведено также численное моделирование в полной двумерной постановке, оно подтвердило результаты линейного анализа устойчивости.

**В третьей главе** рассмотрена задача о возникновении течения электролита между двумя электрическими мембранами, при фиксированной разности электрических потенциалов между ними. Новым результатом, полученным автором, здесь является обобщение задачи на случай гидрофобности поверхности мембраны: обобщены формулы для скорости на границе зоны пространственного заряда и формулы для критических значений разности потенциалов. Обнаружено, что гидрофобные свойства мембран приводят к дестабилизации одномерного решения и возникновению электроконвекции при меньших разностях потенциалов, чем в случае гидрофильных мембран. Результаты численного решения линейной задачи устойчивости, результаты моделирования в полной двумерной постановке и результаты аналитического асимптотического анализа хорошо согласуются между собой.

**Четвертая глава** посвящена исследованию течения электролита в микроканале в приближении Хеле-Шоу. Обнаружено, что с уменьшением толщины канала одномерное решение становится более устойчивым. Обнаружено, что имеет место гистерезис, что связано с возникновением изолированной области неустойчивости. Исследование устойчивости дополнено численным моделированием в полной двумерной постановке. Кроме того, в этой главе исследована автомодельность структур, возникающих в результате потери устойчивости одномерным решением и возбуждения электроконвекции. Обнаружено, что структуры, имеющие форму клина, имеют универсальный угол раскрытия, слабо меняющийся во времени и при изменении параметров в широком диапазоне. Завершает четвертую главу исследование, посвященное анализу возможности выпрямления электрического тока системой асимметричных микроканалов, разделенных ионоселективной неидеальной мембраной. На основе численного решения одномерной системы получены количественные оценки степени выпрямления электрического тока системой и обнаружено, что степень выпрямления существенно зависит от асимметрии каналов и от селективных свойств промежуточной мембраны.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

Направление исследований, представленных в диссертации, находится на стыке электрофизики и гидродинамики, немалую роль играет также тот факт,

что задачи рассмотрены для микронных масштабов, что делает результаты, полученные в данной диссертации, современными и вызывающими большой теоретический и практический интерес. Результаты исследований являются **новыми**, они в необходимой степени отражены в публикациях в ведущих российских и зарубежных журналах и были представлены на различных международных научных конференциях. Диссертация написана на высоком научном уровне и хорошо оформлена. **Научная достоверность** результатов подтверждается использованием апробированных математических методов, обоснованно выбранных для конкретных задач, и соответствием результатов в предельных случаях с имеющимися данными других авторов. Необходимо также отметить, что автором проведено сопоставление части результатов с имеющимися экспериментальными данными и обнаружено их соответствие.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает её содержание.

По работе следует отметить следующие замечания:

1. В задаче о течении плёнки пренебрегается влиянием электрического поля в твердой диэлектрической подложке, в краевых условиях (1.15) и (1.16), однако подобное слагаемое на границе с непроводящим газом не исключается, формула (1.30).
2. При анализе линейной устойчивости рассмотрены только двумерные, периодические вдоль пленки (в главах 3 и 4 – вдоль канала) возмущения и ничего не сказано о возмущениях другого типа.
3. В второй главе совсем не описаны физические механизмы потери устойчивости одномерным решением. Указано лишь наличие трех базовых видов возмущений, однако анализ механизмов потери устойчивости с точки зрения баланса сил отсутствует.
4. Неудачный выбор обозначения для  $E$ . В данной работе  $E = d\Phi/dy$ , хотя обычно  $E$  – это напряженность поля равная градиенту электрического потенциала со знаком минус.
5. В конце третьей главы говорится о соответствии результатов экспериментальным данным, однако никакие графики сравнения не приведены.
6. В пункте 4.3 рассмотрение математической модели жидкостного микродиода ограничивается нахождением одномерного решения и никаких замечаний и оценок по поводу устойчивости такого решения, в диапазоне рассмотренных параметров, не приводится.
7. В приложении А приведены альтернативные краевые условия на поверхностях мембран, однако нигде в работе они не использованы.

Указанные недостатки не умаляют ценности диссертации. **Основные результаты диссертации** изложены в 21 научной работе, из которых 7 опубликованы в рекомендованных ВАК РФ изданиях. Работа прошла **апробацию** на многочисленных (десяти) отечественных и зарубежных конференциях.

На основании изложенного, считаю, что диссертация Г.С.Ганченко соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней». Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Ее автор, Георгий Сергеевич Ганченко, является квалифицированным специалистом в области электрогидродинамики и заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт механики сплошных сред» Уральского отделения Российской академии наук

*Любимова*

Татьяна Петровна Любимова

Рабочий адрес: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1.

Телефон: +7 (342) 237 83 31

Электронная почта: [lubimova@icmm.ru](mailto:lubimova@icmm.ru)

Я, Татьяна Петровна Любимова, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

*Любимова*

Татьяна Петровна Любимова

Подпись Любимовой Т.П. заверяю



*Сергей / А. Усманов*