

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Института теплофизики СО РАН,

член-корр. РАН

Алексеев С.В. /

23 декабря 2015 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Ганченко Георгия Сергеевича

“МИКРОТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ”

по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы
на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук.

В диссертационной работе представлено теоретическое исследование гидродинамики жидких диэлектриков и растворов электролита в двухфазных и однофазных системах в микро- и наномасштабах под действием внешнего электрического поля при различных условиях на границах исследуемой области. Течения в микроканалах сегодня широко исследуются в связи с возросшим разнообразием практического применения. С развитием нанотехнологий и биомедицинских технологий появилось много исследований, в которых учитываются разнообразные физические воздействия на течения. В этой связи исследование микротечения электролита в электрическом поле является **актуальным**. Постановка задачи ограничивается исследованиями электроосмотических течений, когда движение жидкости вызывается внешним воздействием электрического поля.

В первой главе диссертационной работы рассмотрено современное состояние исследований однофазных и двухфазных электроосмотических течений для микро- и наномасштабов. Приведены уравнения и краевые условия математической модели, описывающей рассматриваемые задачи, в частности система уравнений, описывающая поведение бинарного электролита под действием электрического поля. Работа ограничивается рассмотрением случая полной диссоциации и отсутствия химических реакций и эффектов ионной рекомбинации. Приведены краевые условия на межфазных границах электролит/твердый диэлектрик, электролит/газ при наличии поверхностных зарядов с учетом наличия внешнего электрического поля и краевые условия на границе между гидрофобными мембранами и электролитом при наличии нормального к поверхностям электрического поля.

Во второй главе рассматривается линейная и нелинейная устойчивость электроосмотического течения микро- и нанопленок раствора электролита. Аналитически и численно найдено решение для одномерного стационарного течения. Исследована устойчивость найденного решения относительно бесконечно малых возмущений. В длинноволновом приближении найдено асимптотическое решение. Обнаружено три моды возмущений, соответствующие возмущению объемной проводимости, возмущению объемного заряда и возмущению поверхностного заряда на свободной границе раздела фаз. В общем случае возмущений произвольной длины задача решалась численно. Получены спектры собственных значений и изучена их трансформация с изменением числа Дебая. Численно исследована нелинейная устойчивость одномерного стационарного течения. Для этого использовались начальные условия в виде белого шума малой амплитуды. Исследовалось взаимодействие мод неустойчивости. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

В третьей главе исследуется течение электролита вблизи электрической мембраны с гидрофобными свойствами. Найдено аналитическое решение задачи при малых числах Дебая. Рассмотрена задача, описывающая течение электролита между полупроницаемыми мембранами, одна из которых гидрофобная. Рассмотр-

рено состояние равновесия и исследована его устойчивость относительно малых возмущений. Найдено аналитическое решение задачи при малых числах Дебая.

Получено численное решение задачи линейной устойчивости для произвольных значений чисел Дебая. В отличие от задачи об устойчивости плёнки, описанной в главе 2, потеря устойчивости оказалась монотонной. Исследовалось влияние степени гидрофобности на устойчивость. Рассмотрена нелинейная устойчивость и изменение вольт-амперной характеристики при наличии конвективного механизма переноса ионов. Найдено смещение критического значения разности потенциалов с увеличением гидрофобности.

Четвертая глава посвящена исследованию течения Хеле-Шоу электролитов на мембране в узких щелях с характерной шириной щели от десятков нанометров до сотен микрон. Приводится постановка задачи для случая электроизолированных стенок, непроницаемых для обоих типов ионов. Найдено решение в электронейтральной области. Получено дисперсионное соотношение для кривых нейтральной устойчивости при малых числах Дебая. Кривые нейтральной устойчивости рассчитывались полученные численно. Исследовалось изменение устойчивости течения с уменьшением толщины микроканала. Численно решалась нелинейная задача в двумерной постановке. Определено смещение критического значения разности потенциалов с уменьшением толщины канала. Утверждается, что выявлен физический механизм, приводящий к увеличению потока ионов к мембране для «сверхпределных токов». Расчеты показали, что при возникновении режима «сверхпределных токов» возникают структуры плотности заряда, имеющие форму «шипа». В качестве практического приложения предложена математическая модель жидкостного микро- нанодиода.

В **Заключении** приводятся выводы диссертационной работы.

Резюмируя, можно сказать, что в диссертационной работе получен ряд новых результатов по исследованию электроосмотического течения в микроканалах и его устойчивости при различных постановках граничных условий.

К сожалению, работа не свободна от недостатков:

- При выводе безразмерных уравнений в главе 1 введена безразмерная скорость, однако не указано на какую величину она обезразмерена. Более того, во все безразмерные критерии, использованные автором, не входит вязкость. Следовательно, она входит в выражение для характерной скорости. Этот факт сильно затуманивает физическое содержание задачи. Считается очевидным, что течение может быть только ползущим. Однако требуется оценка числа Рейнольдса, построенное по этой скорости, чтобы сделать это утверждение. Этот вопрос возникает потому, что при переносе зарядов учитываются конвективные слагаемые (формула (1.6)). Нужна оценка того, что соответствующее диффузионное число Пекле не мало, а число Рейнольдса мало. В обычной гидродинамике эти числа, как правило, одного порядка, поскольку число Шмидта не отличается от единицы на много порядков.
- Значительное место в работе занимает представление численных расчетов. На основе численных расчетов получено наиболее существенные результаты работы. Однако, методы расчетов только упоминаются. Не упоминаются конкретные характеристики расчетов, связанные с аппроксимацией и точностью расчетов. Это, по-видимому, связано с тем, что автор диссертационной работы расчеты не проводил. Надо указывать, кто их сделал.
- Не указана величина характерного поверхностного заряда σ_s . Непонятно, как можно в такой ситуации проводить сравнение с экспериментом (рис. 2.23, с.54). В частности, на с.19 указан диапазон для σ_q , как же он был вычислен?
- Уравнение для электрического поля (2.14) можно проинтегрировать аналитически, используя эллиптические функции.
- В формулах на с.84 ошибки. Дивергенция не равна тому выражению, к которому она в этих формулах приравнивается.

Сделанные замечания не снижают ценности работы и не меняют общей положительной оценки работы. В целом работа выполнена на высоком профессиональном уровне, хорошо оформлена. В ней представлены интересные результаты по нелинейной устойчивости электроосмотических течений.

Результаты, выносимые на защиту, являются **новыми**. **Достоверность** результатов обоснована применением хорошо апробированных теоретических методов исследования, согласием аналитических и численных результатов, сравнением с экспериментальными данными. **Научная и практическая ценность** результатов обусловлена важностью полученных научных результатов для реализации электроосмотических течений в микроканалах, которые могут использоваться в биомедицинских технологиях, создании новых методов транспорта вещества на микро- и наномасштабах.

Результаты диссертации могут быть использованы в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институте проблем механики РАН, НИИ механики МГУ, ИВТ СО РАН.

Работа прошла хорошую апробацию на всероссийских и международных конференциях, а ее результаты опубликованы в трудах научных конференций и журналах, в том числе рекомендованных ВАК.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует критериям, установленным п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук, а её автор Ганченко Георгий Сергеевич достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Зав. лабораторией моделирования
Института теплофизики СО РАН
профессор, д.ф.-м.н.

Н.И. Яворский