

аттестационное дело № _____

дата защиты 18.12.2015 протокол № 103

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 501.001.89
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Ганченко Георгий Сергеевич, ФГБОУ ВО "Финансовый университет при
Правительстве Российской Федерации", Краснодарский филиал, лаборатория
электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов, младший научный сотрудник

Диссертация «Микротечения электролита в электрическом поле и их
устойчивость» в виде рукописи по специальности 01.02.05 – Механика жидкости,
газа и плазмы выполнена на кафедре вычислительной математики и информатики
факультета математики и компьютерных наук ФГБОУ ВПО «Кубанский
государственный университет». Диссертация принята к защите 02.10.2015 года,
протокол № 103-П, диссертационным советом Д 501.001.89 на базе Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова», 119234, Российская Федерация, Москва, Ленинские
горы, д. 1, действующего на основании приказа № 105/нк Министерства
образования и науки Российской Федерации от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Ганченко Георгий Сергеевич 1990 года рождения, в 2012 году
окончил с отличием факультет математики и компьютерных наук Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Кубанский государственный университет», в
2015 году окончил очную аспирантуру кафедры вычислительной математики и
информатики Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования «Кубанский
государственный университет». С 15.06.2015 и по настоящее время младший
научный сотрудник лаборатории электро- и гидродинамики микро- и

наномасштабов Краснодарского филиала Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации».

Научный руководитель – доктор физ.-мат. наук, профессор, Демехин Евгений Афанасьевич, ФГБОУ ВО "Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации", Краснодарский филиал, кафедра математики и информатики, профессор

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, Шутов Александр Алексеевич, кафедра прикладной математики, профессор;

доктор физ.-мат. наук, профессор, Любимова Татьяна Петровна, ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), лаборатория вычислительной гидродинамики, заведующая лабораторией;

ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН

(заключение составлено Яворским Николаем Ивановичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лабораторией моделирования, и утверждено директором института, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Алексеенко Сергеем Владимировичем)

дали положительные отзывы о диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы научного руководителя, официальных оппонентов и ведущей организации, на автореферат поступило 5 положительных отзывов.

В отзыве научного руководителя отмечается, что диссертационное исследование Г.С. Ганченко посвящено изучению течений электролита под действием внешнего электрического поля в микро- и наномасштабах. В работе рассмотрено два случая таких течений: первый предполагает, что электролит располагается на твердой заряженной непроницаемой для ионов поверхности, а с другой стороны располагается свободная граница раздела электролит-воздух, в движение электролит приводится за счет внешнего тангенциального поля; второй случай представляет собой течения электролита в микрозазоре между двумя

ионоселективными мембранами и сквозь систему проходит электрический ток, вызванный разностью потенциалов на мембранах. Основной отличительной чертой микротечений является тот факт, что поверхностные явления начинают преобладать над объемными и в классических постановках возникают новые эффекты, многие из которых еще недостаточно изучены – в этом заключается актуальность выбранной темы. С другой стороны, решение описанной выше проблемы имеет широкий круг практических применений, в том числе в областях медицинской диагностики и проектирования лабораторий на чипе.

Основными новыми результатами, полученными автором работы лично, можно считать:

1. Составлена математическая модель течения электролита со свободной границей раздела под действием внешнего тангенциального электрического поля.
2. Найдено одномерное стационарное решение и изучена его устойчивость, как аналитически в линейном приближении для малых волновых чисел возмущений, так и численно в полной постановке.
3. Изучено влияние гидрофобных свойств электрических мембран на режимах сверхпределных токов.
4. Оценена возможность выпрямления электрического тока в системе электролит-мембрана-электролит.

Полученные результаты хорошо соотносятся между собой и соответствуют экспериментальным и теоретическим данным, полученным другими авторами. Наряду с этим использование классических математических методов позволяет судить о достоверности полученных результатов.

Выполняя работу, Г.С. Ганченко зарекомендовал себя как квалифицированный специалист, способный самостоятельно решать поставленные нетривиальные задачи, а также способный в ходе работы сам ставить новые задачи для достижения конечной цели.

В отзыве научного руководителя делается заключение, что диссертация «Микротечения электролита в электрическом поле и их устойчивость» является законченным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, Георгий Сергеевич Ганченко,

достоин присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

В отзыве официального оппонента Любимовой Т.П. отмечается, что диссертация Г.С. Ганченко посвящена изучению поведения электролита под действием электрического поля в микро- и наномасштабах. 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. 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 твёрдой 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 плёнки (в главах 3 и 4 – вдоль канала) возмущения и ничего не сказано о возмущениях другого типа.
3. Во второй главе совсем не описаны физические механизмы потери устойчивости одномерным решением. Указано лишь наличие трёх базовых видов возмущений, однако анализ механизмов потери устойчивости с точки зрения баланса сил отсутствует.
4. Неудачный выбор обозначения для E . В данной работе $E=d\Phi/du$, хотя обычно E – это напряжённость 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. На основании изложенного официальный оппонент считает, что диссертация Г.С. Ганченко соответствует «Положению о порядке присуждения учёных степеней». Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Её автор, Георгий Сергеевич Ганченко, является квалифицированным специалистом в области электрогидродинамики и заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук.

В отзыве официального оппонента Шутова А.А. отмечено, что в диссертации выполнен анализ воздействий, влияющих на течение жидких объемов. В рассмотрение включены числа Дебая, Вебера, диффузионные эффекты, явления проскальзывания жидкости на гидрофобных границах. Научный и практический интерес к этой проблеме не ослабевает и постоянно происходит совершенствование известных методов, а также разработка новых подходов в задаче управления течением. Несомненно, тема представленной диссертационной работы, посвященной исследованию течения и устойчивости ЭГД течения, является актуальной. Достоверность результатов диссертации подтверждается их согласием с результатами других авторов.

По работе имеются следующие замечания:

1. В безразмерных граничных условиях (1.15) и (1.30) для скачка электрической индукции присутствует слагаемое, пропорциональное отношению

диэлектрических проницаемостей среды и воды. Для стеклянной подложки (проницаемость порядка 2-4) это отношение не менее $1/40$. Для границы воздух-вода эта величина составляет $1/80$. Почему в граничных условиях в первом случае такое слагаемое считается малым и опускается, а во втором – учитывается?

2. Пункт 3.2.1. диссертации основан на решении уравнения (3.8). Однако вывод этого уравнения отсутствует.
3. Наряду с прямым сопоставлением результатов автор использует «неявную» форму сравнения с данными независимых исследователей. В последнем случае предполагается, что читатель сделает выводы. На стр.68 присутствует фраза: «Вид зависимости от гидрофобности качественно тот же, что был предсказан в экспериментах Е.Д. Белашовой и В.В. Никоненко, см., например, рис. 6(б) в [59]». При этом прямо не разъясняется, каков уровень согласия данных.
4. В диссертации на стр.81 приведены граничные условия для зарядовых концентраций со ссылкой на книгу: Седов Л.И. Механика сплошной среды. Наука, 1973, Т.1, 536 с. В указанной книге таких граничных условий нет. Утверждается, граница раздела является поверхностью сильного разрыва. Однако отсутствует список величин, испытывающих сильный разрыв.
5. Рис. 4.2 и 4.18 не комментируются в тексте.

Оценивая диссертационную работу в целом, можно констатировать ее несомненную актуальность и научную новизну. Проведенный анализ диссертационной работы Ганченко Георгия Сергеевича позволяет сделать вывод о том, что она является законченной научно-квалифицированной работой, в которой решен ряд задач течения и устойчивости электролита в микрообъемах под действием внешнего электрического поля, имеющих существенное значение для электрогидродинамики.

Диссертационная работа Ганченко Георгия Сергеевича «Микротечения электролита в электрическом поле и их устойчивость» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а сам Г.С. Ганченко достоин

присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Выбор Любимовой Т.П. и Шутова А.А. в качестве официальных оппонентов обосновывается тем, что они являются известными специалистами в исследуемой области и имеют ряд работ, близких к теме диссертации.

Ведущая организация в своем отзыве указала, что «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, при создании новых методов транспорта веществ 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».

Отзыв ведущей организации содержит следующие замечания:

1. 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. Этот факт сильно затуманивает физическое содержание задачи. Считается очевидным, что течение может быть только ползущим. Однако требуется оценка числа Рейнольдса, построенного 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.
2. Значительное место в работе занимает представление численных расчётов. На основе численных расчётов получены наиболее существенные результаты работы. Однако, методы расчётов только упоминаются. Не упоминаются

конкретные характеристики расчётов, связанные с аппроксимацией и точностью расчётов. Это, по-видимому, связано с тем, что автор диссертационной работы расчёты не проводил. Надо указать, кто их сделал.

3. 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_a , как же он вычислен?
4. Уравнение для электрического поля (2.14) можно проинтегрировать аналитически, используя эллиптические функции.
5. В формулах на с. 84 ошибки. Дивергенция не равна тому выражению, к которому она в этих формулах приравнивается».

Но при этом отмечено, что «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».

Выбор ведущей организации обусловлен тем, что сотрудники Института теплофизики СО РАН являются признанными специалистами в области механики жидкости, газа и плазмы, имеют широко известные достижения в области науки, соответствующей тематике диссертации, и способны объективно оценить научную и практическую ценность диссертационного исследования.

Получен положительный отзыв на автореферат от Никоненко Виктора Васильевича, доктора химических наук, профессора, профессора кафедры физической химии ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет». В отзыве отмечено, что сделан действительно крупный вклад в развитие представлений о переносе ионов и воды в интенсивных токовых режимах.

Получен положительный отзыв на автореферат от Зубарева Николая Михайловича, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории нелинейной динамики ФГБУН «Институт электрофизики УрО РАН». В отзыве отмечено, что диссертационная работа является законченным научно-исследовательским трудом, в котором рассмотрен и решён на высоком научном уровне ряд фундаментальных задач, касающихся

гидродинамики различных однофазных и двухфазных систем во внешнем электрическом поле.

Получен положительный отзыв на автореферат от Цибулина Вячеслава Георгиевича, доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры вычислительной математики и математической физики ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет». В отзыве указывается, что актуальность диссертационного исследования связана с возможностью приложения полученных результатов к разработке современных нано- и биотехнологий, основанных на управлении жидкостью в микро- и наномасштабах. Также отмечается, что работа представляет большой интерес для специалистов в области гидродинамики, электрохимии и инженерных наук. В отзыве содержатся замечания:

1. Рисунок 6 (а) на стр. 14 нечитабелен из-за неудачного фонового цвета. В тексте отсутствует ссылка на рисунок (б).
2. На стр. 15 принимается предположение, что изменения неизвестных функций вдоль оси x много меньше изменений вдоль оси y , однако физическая обоснованность подобного допущения не приводится.
3. На стр. 21 приведено выражение $2\theta_0=1,923835107\approx 110.23^\circ$, в котором присутствует несогласованность в использовании разделителя целой и дробной части. В работе следовало раз и навсегда принять, какой тип разделителя будет использован: точка или запятая.

Подчеркивается, что указанные замечания вызваны неточностями, которые в основном имеют характер опечаток, а потому не меняют положительной оценки работы.

Получен положительный отзыв на автореферат от Норкина Михаила Викторовича, доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры вычислительной математики и математической физики ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет». Согласно отзыву, теоретические результаты, полученные в ходе данного диссертационного исследования, могут быть применены при конструировании микро- и наноприборов, в которых есть необходимость перемещения, разделения или смешивания жидкостей.

Получен положительный отзыв на автореферат от Моршневой Ирины Викторовны, кандидата физико-математических наук, доцента, доцента кафедры вычислительной математики и математической физики ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет». Замечания в отзыве касаются лишь пунктуационных ошибок и слишком сжатого отражения в автореферате п. 4.3 диссертации. При этом отмечено, что указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 работе в научных журналах и изданиях, из которых 7 статей опубликованы в изданиях, которые входят в перечень рецензируемых научных журналов и изданий. Всего соискатель имеет 30 опубликованных работ.

Основные работы по теме диссертации:

1. Electrokinetic instability of liquid micro- and nanofilms with a mobile charge / G. S. Ganchenko, E. A. Demekhin, M. Mayur, S. Amiroudine // *Physics of Fluids*. – 2015. – Vol. 27, No. 6. – P. 062002.
2. Shelistov V. S., Demekhin E. A., Ganchenko G. S. Electrokinetic instability near charge-selective hydrophobic surfaces // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 90. – P. 013001.
3. Численное моделирование электрокинетической неустойчивости в полупроницаемых мембранах / В. С. Шелистов, Н. В. Никитин, Г. С. Ганченко, Е. А. Демехин // *Доклады РАН*. – 2011. – Т. 440, №5. – С. 625–630.
4. Schiffbauer J., Demekhin E. A., Ganchenko G. S. Electrokinetic instability in microchannels // *Physical Review E*. – 2012. – Vol. 85. – P. 055302.
5. Шелистов В. С., Демехин Е. А., Ганченко Г. С. Автомодельное решение задачи об электрокинетической неустойчивости в полупроницаемых мембранах // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*. – 2014. – №5. – С. 62–65.
6. Об одном способе выпрямления тока в микромасштабах / Е. А. Демехин, М. Г. Барышев, Г. С. Ганченко, Е. В. Горбачева // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2014. – Т.55, №5. – С.3–13.

7. Численное решение задачи линейной устойчивости микро- и нанопленки электролита под действием внешнего электрического поля / Е. В. Горбачева, Г. С. Ганченко, Е. А. Демехин, В. А. Кирий // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2014. – №4. – С. 29– 37.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на 7 международных конференциях: «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (г. Москва 2012 и 2014), «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» (г. Санкт-Петербург 2012 и 2015), «Ion transport in organic and inorganic membranes» (г. Туапсе 2013 и г. Сочи 2015) и International Symposium of Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics (г. Париж 2015); и 3 всероссийских: «Современные проблемы математического моделирования» (п. Дюрсо 2013), «Всероссийская научная конференция молодых учёных и студентов» (г. Анапа 2013) и «Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям» (г. Тюмень 2014). Результаты диссертации обсуждались и были одобрены на семинаре по механике сплошных сред под руководством А.Г. Куликовского, В.П. Карликова, О.Э. Мельника.

Соискатель окончил аспирантуру в 2015 году в ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет».

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **развита** теория течений слабопроводящих жидкостей под действием внешнего электрического поля в микромасштабах;
- **обнаружено**, что одномерное течение ультратонкой плёнки электролита неустойчиво как по отношению к длинноволновым, так и по отношению к коротковолновым возмущениям, при этом первый сценарий развития неустойчивости приводит к возникновению поверхностных волн, а второй является внутренним и не приводит к значительному искажению свободной границы раздела;
- **изучена** линейная и нелинейная устойчивости течения электролита около гидрофобных мембранных поверхностей и течения электролита в ячейке Хеле-

Шоу. Обнаружено, что гидрофобность мембран приводит к дестабилизации одномерного режима и к увеличению электрического тока для режима сверхпределных токов. Дана простая аналитическая формула, выражающая поправку на гидрофобность для критических значений разности потенциалов.

- **изучены** автомодельные структуры, появляющиеся при потере устойчивости одномерным решением и провоцирующие возникновение режима сверхпределных токов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что развита теория ионного электролита, в соответствии с которой движение ионов в жидком диэлектрике описывается законами идеального газа и соответствующими уравнениями транспорта ионов (система уравнений Нернста–Планка).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что данные расчётов могут служить для оценки эффективности использования электроосмотических течений при создании экспериментальных систем, а также лечь в основу новых приборов, осуществляющих управление жидкостью в микромасштабах.

Достоверность результатов обусловлена использованием современных постановок задач об электрогидродинамических течениях слабопроводящих жидкостей и современных апробированных математических методов асимптотических и численных расчетов. При этом полученные в работе результаты для предельных случаев соотносятся с известными теоретическими подходами и в частных случаях соответствуют экспериментальным данным других авторов.

Все результаты, представленные в работе, получены лично автором или при непосредственном участии автора. Результаты асимптотического анализа, нахождение одномерных решений и исследование их линейной устойчивости, анализ результатов численных экспериментов принадлежат лично автору. Составление математической модели и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами опубликованных работ. Материалы других авторов, использованные в диссертации, во всех случаях содержат ссылки на источники.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследований, общего обоснованного подхода к решению рассматриваемых задач и взаимосвязи полученных выводов.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, и принято решение присудить Ганченко Георгию Сергеевичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **20** человек, из них 15 докторов наук (отдельно по каждой специальности рассматриваемой диссертации), участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за **18**, против **1**, недействительных бюллетеней **1**.

Председатель

диссертационного совета Д 501.001.89,

доктор физико-математических наук,

профессор

В.П. Карликов

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 501.001.89,

доктор физико-математических наук

В.В. Измоденов

Подписи удостоверяю:

И.о. декана механико-математического

факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

доктор физико-математических наук,

профессор

В.Н. Чубариков