

В диссертационный совет Д 004.012.01
на базе Федерального государственного бюджетного уч-
реждения науки Института механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук.
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Кирий Владимира Александровича
**«ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВБЛИЗИ РЕАЛЬНЫХ
ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ»**, представленную на соискание
учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы.

В диссертации В.А. Кирий рассмотрены две задачи электрогидроди-
намики бинарного раствора электролита во внешнем электрическом поле:
электрогидродинамическая устойчивость и возникновение конвекции в ме-
жэлектродном пространстве, заполненном электролитом и содержащим па-
нопористую мембрану, и вынужденное движение жидкости за счёт силы
Кулона, созданной в двойном электрическом слое микронеоднородностями
проводимости и шероховатости. Обе задачи решаются автором численно.
Полученные автором результаты являются определённым вкладом в созда-
ние фундаментальных основ современных микро - и нанотехнологий с ис-
пользованием микромиксеров, жидкостных диодов, микронасосов, очистки
и обессоливания воды и т.д. Поэтому **актуальность** проведённых диссер-
тантом исследований не вызывает сомнений.

Диссертация содержит следующие основные **новые результаты**.

Расчёты выполнены на основе системы Нернста-Планка-Пуассона-
Стокса. Получены численные решения, описывающие режимы до предель-
ных, предельных и сверхпределных токов для неидеально селективной мем-

бранны. Эти одномерные решения были исследованы автором на устойчивость к малым синусоидальным возмущениям и получены пороговые значения разности потенциалов перехода к сверхпределным токовым режимам. За данным типом электрогидродинамической неустойчивости закрепилось название неустойчивости Рубинштейна-Зальцмана. Диссертантом рассмотрено решение полной нелинейной системы Нернста-Планка-Пуассона-Стокса в области, включающей как раствор электролита, так и пористую мембрану. В области пористой мембраны переносом ионов конвекцией пренебрегалось, и учитывался только перенос диффузией и электромиграцией. Диссертантом описаны основные бифуркационные переходы при изменении контрольных параметров: разности потенциалов, числа Дебая и плотности фиксированного заряда мембраны. Описано изменение двумерных полей концентраций ионов, плотности заряда, электрического потенциала и поля скоростей при различных параметрах задачи. При малых концентрациях раствора неустойчивость имеет монотонный характер, а при достаточно больших – колебательный.

Рассмотрена задача о возникновении вынужденной электроконвекции за счёт всегда присутствующих на поверхности неоднородностей различной физической природы с характерным размером порядкам десятков микронов. Эти микронеоднородности имеют порядок величины зоны обессоливания и других характерных геометрических размеров и поэтому они могут оказывать существенное влияние на поток ионов к межфазной поверхности и менять вольт-амперную характеристику мембраны, приводя к возникновению сверхпределных токов. Этот механизм называется механизмом Духина-Мишук и его проявление возможно при неоднородностях межфазной поверхности различной физической природы. Наличие неоднородности искажает распределение заряда в двойном электрическом слое и зоне отошедшего заряда, что в свою очередь приводит к возникновению тангенциальной составляющей

электрического поля и тангенциальной силы Кулона и, в конечном итоге, к возникновению вынужденных микровихрей и конвективной составляющей переноса ионов. Возникает сверхпределный ток. Кирий В. А. рассматривает два типа неоднородностей межфазной поверхности: вызванных наличием непроводящих участков реальной мембранны и вызванных микрошероховатостью. Показано, что механизмы Рубинштейна-Зальцмана и Духина-Мишук могут как подавлять друг друга, так и приводить к резонансному усилению. В частности, получен интересный результат: правильное расположение проводящих и непроводящих участков приводит к интенсификации тока через мембрану. Этот результат может быть использован при проектировании мембран с заранее заданными свойствами.

Высокая степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается проведением исследования с помощью современных численных вычислительных методов, дающих высокую степень достоверности, согласованием полученных численных результатов с аналитическими результатами исследований (см. например, рис. 2.6).

Апробация результатов проведена в достаточном объёме. Основные результаты диссертационной работы достаточно полно опубликованы в ведущих научных журналах, в том числе в семи журналах, входящих в перечень ВАК. Все основные результаты докладывались на шести всероссийских и международных конференциях, четырёх научных семинарах, что свидетельствует о достаточно надёжной их апробации и признании их специалистами по исследуемой области.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов следует из применения в исследованиях современных общепринятых моделей электрогидродинамики сплошных сред, близостью к результатам других ав-

торов в определённом диапазоне параметров и качественным совпадением с экспериментальными данными. Существует количественное согласие результатов расчёта порога неустойчивости, полученных методами линейной теории устойчивости и с помощью прямого численного интегрирования полной нелинейной системы уравнений.

Значимость для науки и практики результатов, полученных автором диссертации. Решение задачи исследования электрокинетической неустойчивости вблизи реальных ионоселективных поверхностей имеет значение для развития отрасли знаний по специальности механика жидкости, газа и плазмы. Исследования, проведённые с использованием численных методов, позволяют сократить затраты на проведение экспериментальных исследований и в ряде случаев заменить их теоретическими предсказаниями, а также могут быть использованы для проектирования устройств, использующих ионообменные мембранны (микронасосы, микромиксеры, системы обессоливания).

Замечания по диссертации:

1. Автор мало говорит о численных методах решения задачи. Между тем задача является весьма сложной, описывающей несколько сцепленных физических процессов, а именно: задача определяется двумя нестационарными уравнениями переноса ионов, стационарным уравнением для электрического поля, уравнением Пуассона, уравнения движения жидкости в приближении Стокса. Желательно более подробно остановиться на методах решения этой нетривиальной задачи математической физики.
2. Численные решения для одномерного состояния равновесия, определяющего допредельный или предельный режимы, и исследование задачи на линейную устойчивость сравнивались «с полуаналитическими решениями Рубинштейна-Зальцмана». Желательно уточнить - какая модель была выбрана этими авторами, и какие упрощения позволили решить задачу.

Сверху и снизу от нанопористой мембраны возникает зона пространственного заряда, создающая электростатическое давление, и это давление будет разным в верхней и нижней части мембраны. Не заставит ли это давление жидкость двигаться через мембрану? Учёл ли автор этот эффект?

3. Вопрос, близкий к предыдущему: концентрация соли в верхней и нижней окрестностях мембраны, как это следует из расчётов автора (см. например рис. 2.3 (b)), будет различаться. Это опять вызовет разность осмотического давления. Не приведёт ли разное осмотическое давление к прокачке жидкости через пористую мембрану? Учтено ли это движение в модели?
4. На стр. 14 автор приводит размер 10 нм., как тот размер, который определяет условную границу приложимости гипотезы силопности среды. На той же странице, несколько ниже, диссертант утверждает, что куб с характерным линейным размером 10 нм. содержит 30 тысяч молекул воды. Не видит ли диссертант здесь противоречия?

Диссертация, несмотря на указанные недостатки методического характера, представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу. **Автореферат** полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Таким образом, по форме и содержанию диссертационная работа Кирий Владимира Александровича «Электрокинетическая неустойчивость вблизи реальных ионоселективных поверхностей» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи исследования электрогидродинамики бинарного раствора электролита во внешнем электрическом поле, а также электрогидродинамической устойчивости и возникновение конвекции в межэлектродном пространстве, заполненном электролитом и содержащим нанопористую мембрану, и вынужденное движение жидкости за счёт силы Кулона, созданной в двойном электрическом слое

микронеоднородностями проводимости и пероховатости.

Данная задача имеет значение для развития отрасли знаний по специальности механика жидкости, газа и плазмы, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук и удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Считаю, что автор диссертационного исследования, **Кирий Владимир Александрович**, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Жуков Михаил Юрьевич, даю своё согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Вычислительной математики и математической физики ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, <http://www.sfedu.ru>, тел. +7-863-305-19-90, info@sfedu.ru.

Жуков Михаил Юрьевич
08.11.2016



М.Ю. Жуков

Подпись М.Ю. Жукова заверена

Засв. диплом р-р
Михаил Юрьевич

А. С. Когель