

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и  
инновационной деятельности  
ФГБОУ ВО «Кубанский  
государственный технологический  
университет», доктор технических  
наук, профессор

Калманович С.А.  
2016 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Кирий Владимира Александровича на тему: «Электрокинетическая неустойчивость вблизи реальных ионоселективных поверхностей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости

Диссертационная работа В.А. Кирий посвящена численному исследованию электрогидродинамики и гидродинамической неустойчивости раствора электролита вблизи несовершенных ионоселективных мембранных поверхностей в микронных масштабах. В работе приняты во внимание всегда присутствующие на поверхности мембранные неоднородности проводимости и шероховатости микронного размера, рассматриваются процессы диффузии и электромиграции внутри нанопористых мембранных установок. Мембрана не считается абсолютно селективной, то есть она пропускает ионы противоположного знака. Задача описывается сложной сцепленной системой уравнений математической физики, ответственных за транспорт анионов и катионов, электрическое поле и гидродинамику жидкости, системой Нернста-Планка-Пуассона-Стокса.

**Актуальность темы** определяется большим научным и практическим

интересом к задачам электрогидродинамики малых масштабов. Этот интерес в последнее время возрастает. Прежде всего, это связано с широким использованием микро- и нанотечений в технике, биологии и медицине. В рассматриваемых микротечениях поверхностные силы становятся сравнимыми по величине с объемными. Это влечет за собой, в частности, практическую невозможность использования обычных механических принципов прокачки жидкости созданием градиента давления. Именно поэтому в важных для современных приложений микромасштабах на первый план выходят способы управления течением вязкой жидкости с помощью различных электрических эффектов. В ряде таких устройств необходимо приводить жидкость в движение и рабочей жидкостью является электролит, который течет за счет внешнего электрического поля. Вблизи ионоселективных поверхностей имеется большой электростатический заряд и это создает перспективы создания новых типов микронасосов. Перемешивание жидкостей и снятие тепловых напряжений в микромасштабах является большой проблемой в силу очень малых, практически нулевых чисел Рейнольдса; эта проблема может быть решена за счет особого вида электрогидродинамической неустойчивости, исследуемой в настоящей работе.

**Основной целью** диссертационного исследования является численное изучение электрогидродинамики и электрогидродинамической неустойчивости течения электролита вблизи несовершенных ионоселективных мембранных поверхностей с учетом всегда присутствующих микронеоднородностей проводимости и микрошероховатости.

**Оценка содержания работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы из 134 наименований и двух приложений. Общий объем диссертации 127 страниц, включая 51 рисунок и 4 таблицы.

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 7 в журналах,

рекомендованных ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертации.

Основные результаты, полученные в диссертационном исследовании и выносимые на защиту, являются **новыми**. Для неидеально селективных мембранных систем получены точные численные решения, описывающие допредельные и предельные токовые режимы. Рассчитаны границы потери устойчивости одномерных состояний равновесия и, соответственно, смены токового режима на сверхпределенный. Описаны основные бифуркационные переходы и неустойчивости вблизи неидеально селективных электрических мембран при изменении селективности и приложенной разности потенциалов. Исследовано поведение электролита вблизи неоднородных электроселективных поверхностей, состоящих из чередующихся проводящих и непроводящих элементов, а также вблизи микрошероховатой поверхности.

Во **введении** автор описывает стоящие перед ним проблемы, он обосновывает их актуальность, формулирует цель работы, научную новизну, дает информацию об апробации работы, о своих публикациях и личном вкладе.

**Первая глава** посвящена истории проблемы, в ней дается обзор практически важных приложений электрогидродинамики малых масштабов вблизи ионоселективных поверхностей и показывается фундаментальная важность исследуемой задачи. Обсуждаются особенности микро- и нанотечений, границы применимости понятия непрерывности сплошной среды, методы контроля и управления течением жидкости, используя электростатические силы. Выписывается полная система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса, описывающая проблемы электрокинетики. Анализируется влияние поверхностей, ограничивающих течение жидкости, и постановку краевых условий на таких поверхностях, замыкающую задачу. В качестве перспективных для практических применений поверхностей рассмотрены электрические мембранны, пропускающие только один тип ионов и проявляющие необычные

черты, которые могут быть использованы в приложениях. Анализируется вольтамперная характеристика с точки зрения теории гидродинамической устойчивости и теории бифуркаций. Экспериментальные данные отражают существование трёх токовых режимов. Причинами возникновения сверхкритических токов могут служить несколько физических механизмов: диссоциация воды, конвекция Рэлея-Бенара, термоэлектрокинетическая неустойчивость, микровихри Духина-Мищук и электрокинетическая неустойчивость. Основным механизмом возникновения сверхпределных токов является электрокинетическая неустойчивость.

**Во второй главе** формулируется задача о поведении раствора электролита вблизи несовершенной электроселективной поверхности, и внутри нанопористой мембранны. Задача приводится к безразмерному виду и описывается четырьмя безразмерными параметрами: разностью потенциалов между электродами, числом Дебая, коэффициентом сцепления гидродинамики и электростатики и плотностью фиксированного заряда в пористой мемbrane. Малая плотность фиксированного заряда соответствуют сильным растворам электролита, а большая — слабым растворам. Также рассмотрена постановка задачи для совершенной катионообменной мембранны, абсолютно непроницаемая для анионов. В главе рассмотрен случай допредельных и предельных токов, когда решение оказывается одномерным и описывается нелинейным дифференциальным третьего порядка с разрывными коэффициентами относительно электрического потенциала. Это уравнение решается численно. В конце главы обсуждаются результаты, которые неплохо совпадают с полуаналитическими результатами Рубинштейна.

**В третьей главе** рассматривается линейная неустойчивость одномерного состояния равновесия к синусоидальным возмущениям как необходимое условие возникновения режима сверхпределных токов. Краевая задача на собственные значения системы обыкновенных дифференциальных уравнений

решается численно, и обсуждаются полученные результаты. Находится пороговое значение разности потенциалов в зависимости от параметров: фиксированного заряда мембранны и числа Дебая. Найдена граница монотонной потери устойчивости и колебательной. Критические значения параметров, найденные автором, находятся в разумном соответствии с полученными в упрощенном подходе Рубинштейна-Зальцмана.

**Четвертая глава** посвящена прямому численному моделированию эволюции процесса во времени и проявлению нелинейных неустойчивостей. В качестве начальных условий рассматривались случайные малые возмущения типа «белого шума». Показано, что для докритических значений параметров этот малый шум затухает и решение эволюционирует к одномерному стационарному состоянию равновесия, соответствующему допредельным или предельным токам. При закритических параметрах решения для одномерного состояния равновесия оказываются неустойчивыми, и имеет место переход к режиму сверхпредельных токов. Для слабых растворов устанавливается неоднородное распределение заряда около межфазовой поверхности типа острых стационарных «шипов»; вдали от поверхности раствор нейтрален; неоднородность заряда вдоль межфазной поверхности создает скорость проскальзывания и, в конечном итоге, - микровихри в жидкости. Эти микровихри создают дополнительный механизм потока ионов и приводят к сверхпредельным режимам. При увеличении концентрации раствора „шипы“ становятся более размазанными и пропадают, а заряд распределяется по всему пространству. При этом монотонная неустойчивость сменяется колебательной, причем, характерная частота колебаний лежит в интервале  $\tilde{f} = 50 — 300\text{Гц}$ . Показано, что неустойчивость может иметь место как для допредельных, так и предельных состояний равновесия.

В четвертой главе также проводится численное моделирование влияния непроводящих пятен реальной мембранны. Пятна создают неоднородность

в распределении заряда и микровихри Духина-Мищук даже для устойчивых течений. Последний механизм составил конкуренцию механизму Рубинштейна-Зальцмана. Показано, что взаимодействие обоих механизмов может приводить как к резонансным случаям усиления, так и к подавлению одного механизма другим. Другим типом неоднородности, изученным в работе является микрошероховатость поверхности, приводящая согласно механизму Духина-Мищук к возбуждения микровихрей. В ходе численных экспериментов были найдены резонансные длины микрошероховатостей в диапазоне  $0.1 \div 1$  мкм. При таких параметрах неоднородности разрушается зона обеднённого солевого раствора, что и приводит к интенсификации электрического тока.

**В заключении** кратко перечислены основные результаты работы согласно пунктам, выносимым на защиту.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением классических аналитических и численных методов решения поставленных задач, сопоставлением результатов, полученных разными способами, между собой, а также с работами других авторов.

**Практическая значимость** работы состоит в возможности использования результатов и выводов при проектировании ионообменных мембран, а также при создании устойчивых микроструй и монодисперсных капель.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в Кубанском государственном университете, Кубанском государственном технологическом университете, Институте мембран КубГУ, Институте механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии науки, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и других научно-исследовательских учреждениях при разработке новых моделей микронасосов, методик очистки и обессоливания воды, моделях микромиксеров, управления течениями жидкости в малых мас-

штабах электрическим полем.

По работе имеются следующие **замечания**:

1. Модель процессов внутри пористой мембранны предполагает не только диффузию и электроконвекцию, но и конвективную составляющую переноса ионов. Течение жидкости внутри пористой мембранны описывается законом фильтрации Дарси. Считаю, что автор должен был, по крайней мере, оценить эту фильтрацию и найти границы размера пор, когда фильтрационная конвективная составляющая должна быть принята во внимание.

2. В диссертации принималась модель электролита, не учитывавшая эффектов ионной диссоциации, рекомбинации, а также возможных химических реакций, которые могут оказывать существенное влияние на течение жидкости.

3. Не понятно, из каких соображений задавались доли проводящих и непроводящих участков на поверхности электрической мембранны?

4. В работе используются обозначения, не принятые в электрогидродинамике сплошных сред и это несколько затрудняет чтение диссертации. Например, для числа Дебая обычно применяется обозначение  $De$ , автор же использует греческую букву  $\nu$ . То, что автором называется коэффициент сцепления, обычно называют «материальным числом Пекле». Такие примеры можно продолжить.

5. Карта режимов в главе 3 недостаточно полно отражает влияние числа Дебая при его малых значениях. Мне кажется, для того, чтобы понять асимптотику малых чисел Дебая, необходимо его уменьшение примерно в десять раз.

Высказанные замечания не влияют на положительную оценку диссертации и не ставят под сомнение основные результаты работы.

## Заключение

Автореферат полно отражает содержание диссертации.

Диссертация в целом представляет собой законченный научный труд, в котором содержатся решения задач, имеющих существенное значение для понимания гидродинамики микротечений во внешнем электрическом поле. Указаны конкретные способы управления параметрами таких течений.

Работа удовлетворяет требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК при Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кирий Владимир Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры физики ФГБОУ ВО «КубГТУ» от «26» октября 2016 г., протокол № 5.

Профессор кафедры физики  
ФГБОУ ВО «КубГТУ»,  
доктор технических наук, профессор

  
Магомадов  
Алексей Сайпудинович

Заведующая кафедры физики  
ФГБОУ ВО «КубГТУ»,  
кандидат физико-математических наук  
профессор

  
Шапошникова  
Татьяна Леонидовна

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
технологический университет»  
Адрес: 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2  
Контактная информация: тел. 8612558532  
e-mail: shtale@yandex.ru

