

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и исследовательской деятельности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»



Метелица А.В.

«02» ноября 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
Франц Елизаветы Александровны
«Неравновесный электрофорез ионоселективной микрочастицы»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Е.А. Франц посвящена исследованию актуальной задачи современной электрогидродинамики. Основным объектом изучения является сферическая ионоселективная частица, находящаяся в растворе бинарного моновалентного электролита под действием внешнего постоянного электрического поля. В работе рассмотрены два предельных случая: слабое и сильное электрическое поле. Около поверхности частицы, находящейся в электролите, формируются тонкие слои с избыточным зарядом. Точная структура слоев зависит от напряженности электрического поля. В слабом поле формируется только двойной электрический слой (ДЭС), за пределами которого раствор электронейтрален. В случае сильного электрического поля, за ДЭС формируется еще один заряженный слой – зона пространственного заряда, за которым следует электрически нейтральный диффузионный слой с пониженной относительно равновесной концентрацией. На заряд в этих слоях действует электрическое поле, порождающее кулоновскую силу, что приводит заряженную жидкость в движение. Таким образом, формируется электроосмотическое течение жидкости около поверхности частицы, которое, в свою очередь вынуждает двигаться частицу в электрическом поле. В представленной работе приводятся новые теоретические результаты исследования электрофореза ионоселективной микрочастицы, которые дополняются численным решением полной неупрощенной системы Нернста-Планка-

Пуассона-Стокса. Представленные результаты верифицируются путем сравнения основных характеристик, таких как скорость частицы, с результатами экспериментов, изложенных в литературе.

Актуальность темы исследования связана с возросшим практическим интересом к электрокинетическим явлениям в малых масштабах. Во многих микрофлюидных устройствах перенос жидкости и взвешенных в ней частиц вызван прохождением электрического тока через ионообменный материал в водном растворе электролита. Использование этого типа материала играет ключевую роль в таких приложениях, как обессоливание воды, разделение синтезированных частиц и биологических клеток по размеру, прекоцентрация образцов и топливные элементы.

Основной целью диссертационного исследования является теоретическое исследование электрофореза сферической ионоселективной микрочастицы в постоянном электрическом поле, выявление формы зависимости скорости электрофореза частицы от приложенной напряженности электрического поля.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы из 90 наименований, списка рисунков и таблиц, а также приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 125 страниц.

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертационных исследований.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, являются новыми. В работе получено асимптотическое решение системы, описывающей электрофорез ионоселективной частицы, для малой напряженности электрического поля. Для этого же случая получена аналитическая формула скорости электрофореза, показывающая линейный отклик скорости от напряженность электрического поля. Выведено аналитическое разложение системы отдельно для каждого из пограничных слоев для сильного электрического поля. Обнаружено возникновение феномена потери устойчивости зоны пространственного заряда, находящегося в области входящего потока катионов.

Во **введении** автор формулирует научную и практическую значимость исследования, а также ставит цель и задачи работы.

Первая глава дает краткое историческое описание развития области, за которым следует обзор современной литературы, как теоретической, так и экспериментальной. Вводится математическая постановка задачи, основанная на нелинейной системе уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса. Обосновывается пренебрежение инерциальными членами и приближение

ползущего течения для исчезающе малых чисел Рейнольдса. Дается пояснение относительно использованных в задаче краевых условий.

Во **второй главе** проведено аналитическое решение для случая малой напряженности электрического поля. Автор производит разложение по малым параметрам задачи – числу Дебая, которое делит задачу на внутреннюю и внешнюю области и напряженности электрического поля, относительно которого рассмотрены приближения нулевого и первого порядка. Из условия баланса сил, действующих на частицу, автор выводит аналитическую формулу для скорости электрофореза ионоселективной частицы.

Третья глава исследует случай сильного электрического поля. Структура пограничных слоев претерпевает существенные качественные изменения. Помимо двойного электрического слоя также формируется зона пространственного заряда и диффузионный слой. Решение приводится отдельно для каждого тонкого пограничного слоя и внешней области электролита, за исключение двойного электрического слоя, влиянием которого пренебрегается. Из аналитического решения следует отрыв диффузионного пограничного слоя.

В **четвертой главе** приводятся результаты численного моделирования полной неупрощенной системы уравнений. Его результаты подтвердили факт отрыва диффузионного слоя, а также выявили возникновение электрокинетической неустойчивости около поверхности ионоселективной частицы в области входящего потока ионов. Распределение функции тока показывает формирование электроконвективного вихря Духина-Мишук, ранее описанного в литературе. Численные и аналитические результаты сопоставлены с данными из семи экспериментальных работ (две для слабого и пять для сильного электрического поля). Сравнение с экспериментальными данными подтверждает гипотезу автора о степени пропорциональности скорости частицы напряженности электрического поля.

О **достоверности полученных результатов** свидетельствует факт согласования приведенных аналитических (асимптотический метод) и численных (конечно-разностный метод) результатов как между собой, так и с экспериментальными данными из работ других авторов.

Наибольшую **практическую значимость** представляет обнаружение электрокинетической неустойчивости в области входящего потока ионов. Данный эффект может быть использован в микромасштабах для повышения эффективности смешивания жидкостей.

Имеется ряд **замечаний** по работе:

1. Несмотря на заявленные характерные масштабы порядка десятков микрометров, автор не обосновывает возможность использования гипотезы сплошности и использования уравнения Навье-Стокса при описании движения частиц такого масштаба.

2. В работе не учитываются процессы диссоциации и рекомбинации ионов в электролите, а так химических реакций, что может быть существенным при описании течения жидкости.

3. Результаты численного моделирования показывают существование локального максимума на графике распределения плотности заряда. Однако автор не дает никакого объяснения его существования.

4. На рис. 4.19 показан переход к хаотическому режиму. Автор говорит о сценарии удвоения периода. Однако не ясно, на основе чего был сделан данный вывод. Автор не приводит ни результаты Фурье или вейвлет анализа, которые показывали бы период, ни энергию этого периода и его сопутствующую и основную частоту.

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

Автореферат полно отражает содержание диссертации.

Диссертация в целом представляет собой законченный научный труд по решению некоторых задач электрогидродинамики, содержит новые научные результаты и вносит вклад в понимание электрокинетических явлений около изогнутой ионоселективной поверхности

Работа удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, а ее автор, Е.А. Франц заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук (специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), профессором кафедры вычислительной математики и математической физики Жуковым Михаилом Юрьевичем (344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а, Южный федеральный университет),

тел. +7 (863) 2-975-111(214),

e-mail: myzhukov@sfedu.ru

Отзыв о диссертации обсужден и утвержден на заседании кафедры вычислительной математики и математической физики института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича Южного федерального университета (протокол № 2 от 16 сентября 2020 г.).

Зав. каф. вычислительной математики
и математической физики, д.ф.-м.н., профессор



Жуков М.Ю.