

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 19.11.2020 № 63

О присуждении Франц Елизавете Александровне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Неравновесный электрофорез ионоселективной микрочастицы» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 16.09.2020, протокол № 58, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Франц Елизавета Александровна 1992 г. рождения, в 2015 г. окончила магистратуру ФГБОУ ВО Кубанский государственный университет (г. Краснодар) по направлению «Прикладная математика и информатика». В 2020 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в ФГБОУ ВО Кубанский государственный университет по научной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры математики и информатики Краснодарского филиала ФГБОУ ВО Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации. Диссертация выполнена на факультете компьютерных технологий и прикладной математики ФГБОУ ВО Кубанский государственный университет (КубГУ).

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор кафедры прикладной математики КубГУ, Демехин Евгений Афанасьевич.

Официальные оппоненты:

1. Зубарев Николай Михайлович, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, профессор РАН, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург;
2. Алабужев Алексей Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории вычислительной гидродинамики ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН"), г. Пермь;

дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Ростов-на-Дону, в своем положительном заключении, составленным Жуковым Михаилом Юрьевичем, д.ф.-м.н., зав. кафедрой вычислительной математики и математической физики, и утвержденном проректором по научной и исследовательской

деятельности ЮФУ, д.х.н. А.В. Метелицей, указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, которая содержит новые научные результаты и вносит вклад в понимание электрокинетических явлений около изогнутой ионоселективной поверхности. В работе приводятся новые теоретические результаты исследования электрофореза ионоселективной микрочастицы в электрических полях различной напряженности. Теоретические результаты 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. Представленная диссертационная работа «Неравновесный электрофорез ионоселективной микрочастицы» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Франц Елизавета Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискателем опубликовано 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Калайдин Е.Н., Шелистов В.С., Франц Е.А., Куцепалов А.С., Демёхин Е.А. Численное исследование движения микрочастицы с ионообменной поверхностью в электрическом поле // Доклады Российской Академии наук. 2015. Т. 465. С. 549-553.

В работе методом прямого численного моделирования продемонстрирован переход от электрофореза первого рода (линейный режим) к электрофорезу второго рода (нелинейный режим). Подтверждено предположение о взаимном влиянии электрокинетических неустойчивостей по механизмам Духина и Рубинштейна.

2. Frants E.A., Ganchenko G.S., Shelistov V.S., Amiroudine S., Demekhin E.A. Nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule for weak and moderate external electric fields // Physics of Fluids. 2018. V. 30. P. 022001.

В работе с использованием метода сращиваемых асимптотических разложений получены решения нулевого и первого порядка для распределения плотности заряда, концентраций и электрического потенциала в пределе малого числа Дебая и малой напряженности электрического поля.

3. Ganchenko G., Frants E., Shelistov V., Demekhin E. The movement of an ion-exchange micro particle in a weak external electric field // Microgravity Science and Technology. 2018. V. 30, №. 4. P. 411-417.

Проведено решение задачи движения ионоселективной частицы в электрическом поле малой напряженности. Изучена зависимость средней плотности тока через поверхность частицы от угла при изменении напряженности электрического поля.

4. Ganchenko G.S., Frants E.A., Shelistov V.S., Nikitin N.V., Amiroudine S., Demekhin E.A. Extreme nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule // Physical Review Fluids. 2019. V. 4. P. 043703. (WoS, Scopus).

В работе проведен полуаналитический анализ задачи электрофореза ионоселективной частицы при высокой напряженности электрического поля в предположении малости числа Дебая. Полуаналитическое решение сравнивается с результатами численного моделирования полной нестационарной системы Нернста-Планка-Пуассона-Стокса и

экспериментальными данными из других работ.

Публикации содержат в сумме 78 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Зубарева Н.М. В отзыве отмечается актуальность тематики диссертации, приведен анализ содержания диссертации по главам, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Отмечаются так же обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- вопрос о несоответствии рис. 1.2 неподвижной системе координат, как это указано в тексте диссертации;
- вопрос о несоответствии распределения ионов вокруг частицы, изображенного на рис. 3.1, описанию этого же распределения в тексте;
- наличие неточностей и опечаток, нескольких некорректно оформленных ссылок на литературу;
- замечание по поводу неудачных обозначений во второй главе диссертации;
- замечание о неполноте списка обозначений;
- вопрос об области применимости найденной зависимости скорости от напряженности, полученной для случая сильного электрического поля.

2. Положительный отзыв официального оппонента Алабушева А.А. В отзыве отмечено, что диссертация содержит новые теоретические результаты, в частности получены формулы скорости электрофореза в пределе малой и высокой напряженности электрического поля. В диссертации обнаружен новый эффект – возникновение неустойчивости. В качестве одного из достоинств диссертации выделяется использование одновременно численных и аналитических методов для исследования задачи. Оппонент отмечает следующие замечания:

- наличие неточных формулировок и некорректное использование терминов;
- замечание к стилю изложения и оформления диссертации;
- отсутствие описания характеристик вычислительной сетки в приложении А;
- замечание об отсутствии ссылок на работы других авторов в автореферате.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой законченный научный труд, посвященный решению одной из задач в области электрогидродинамики. В работе приводятся новые теоретические результаты исследования электрофореза ионоселективной частицы в постоянном электрическом поле. 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 напряженности 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. Полученные результаты имеют практическую значимость – электрокинетическая неустойчивость может быть использована в микромасштабных устройствах для повышения эффективности смешивания жидкостей.

Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- вопрос о применимости гипотезы сплошности при исследовании задачи в микромасштабах;
- замечание о том, что в работе не учитываются процессы диссоциации и рекомбинации ионов в электролите;
- вопрос о существовании локального максимума на распределении плотности заряда;
- вопрос о переходе к хаотическому режиму. Не обоснован вывод о том, что наблюдается сценарий удвоения периода при переходе к хаотическому режиму.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1. Положительный отзыв от Демина В.А., д.ф.-м.н., доцента, зав. кафедрой теоретической физики, ФГБОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь (1 замечание);
2. Положительный отзыв от Алексеенко С.В., академика РАН, д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией проблем теплопереноса ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск (1 замечание);
3. Положительный отзыв от Перминова А.В., д.ф.-м.н., доцента, профессора кафедры общей физики факультете прикладной математики и механики ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь (2 замечания);
4. Положительный отзыв от Люшнина А.В., к.ф.-м.н, декана факультета информатики и экономики ФГБОУ ВО Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, г. Пермь (1 замечание).
5. Положительный отзыв от Бунякина А.В., к.ф.-м.н, доцента кафедры математических и компьютерных методов ФГБОУ ВО Кубанский государственный университет, г. Краснодар (1 замечание);

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- в тексте автореферата неверно указана размерность коэффициента диффузии, а для приведенного диапазона характерных размеров микрофлюидных систем дается оценка характерного времени только для одного конца диапазона;
- в тексте автореферата не приводится система уравнений с граничными условиями, которая соответствует математической постановке задачи;
- в главе 4, где приведены результаты численного моделирования задачи, показано возникновение электрокинетической неустойчивости. Однако ссылки на соответствующие экспериментальные работы отсутствуют;
- из содержания автореферата не ясно, есть ли возможность практического применения результатов, полученных для случая малой напряженности электрического поля;
- в автореферате не указано, каким способом были решены уравнения 1.21-1.24;

- для рис. 10 из автореферата не указано, какая из кривых лучшим образом соответствует экспериментальным данным для высокой напряженности электрического поля;
- при описании результатов третьей главы не приведено само аналитическое решение, а для диффузионного слоя не поясняется почему не удалось найти аналитическое решение.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области физической гидродинамики и электрогидродинамики, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных исследований различных гидродинамических систем; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, является одним из ведущих научных центров в области физической гидродинамики и электрогидродинамики, в нем активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру проблем физики и механики. Научно-исследовательская работа ведется по следующим направлениям: волновые движения в сплошных средах, аэроакустика, смешанные задачи механики сплошной среды, динамика вязкого газа, теория электрофореза, перенос массы и тепла в многокомпонентной жидкости. В университете функционирует научные школы «гидромеханика». Университет является учредителем 19 научных журналов, среди которых: «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки». Из них 13 журналов входят в перечень ВАК. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на заседании кафедры вычислительной математики и математической физики Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Воровича Южного федерального университета в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработана** теоретическая модель описания движения ионоселективной микрочастицы;
- **предложены** формула для вычисления скорости электрофореза в слабом электрическом поле и оценка скорости частицы в сильном электрическом поле;
- **доказано** существование электрокинетической неустойчивости на поверхности ионообменной микрочастицы в области входящего потока катионов;

– **введены** неравновесная структура пограничных слоёв, включающая двойной электрический слой, область пространственного заряда и диффузионный слой; отрыв диффузионного слоя.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что расширяет известные знания об электрофорезе ионоселективных микрочастиц и устраняет ряд пробелов, касающихся движения таких частиц на микромасштабах. В частности, **доказано** несоответствие существующего предположения о квадратичной зависимости скорости электрофореза от напряжённости электрического поля, выдвинутого С.С. Духиным и Н.А. Мищук в их экспериментальных работах по электрофорезу ионоселективных частиц и несостоятельность предположения об отсутствии влияния диффузионного слоя на поведение микрочастицы. В данной работе доказывается другой характер зависимости, отличающийся от квадратичной.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

– **использованы** методы малого параметра и сращивания асимптотических разложений;

– **изложены** сходства и различия движения диэлектрической и ионоселективной частицы;

– **раскрыта** структура течения жидкости около микрочастицы под действием внешнего электрического поля;

– **изучены** механизмы проявления неравновесных процессов при движении ионоселективной микрочастицы и формирования пограничных слоёв;

– **проведена модернизация** теории электрофореза с целью адекватного отражения зависимости скорости ионоселективной микрочастицы от напряжённости электрического поля.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– **разработаны и апробированы** реализации моделей электрофореза ионоселективных микрочастиц для случаев сильного и слабого электрического поля;

– **определены** границы применимости этих моделей;

– **создан** алгоритм прямого численного моделирования движения микрочастицы и окружающей её жидкости при электрофорезе;

– **представлены** количественные оценки скорости электрофоретического движения микрочастиц и параметров течения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

– **теория** согласуется с результатами численного моделирования, а для предельных случаев согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

– **идея** исследования **базируется** на применении методов механики сплошных сред в рассматриваемых пространственных масштабах и использовании классических аналитических методов исследования;

– **использованы** известные уравнения Нернста-Планка, Пуассона, Стокса и методы аналитического и численного исследования (метод малого параметра, сращивание асимптотических разложений, спектральное разложение оператора и конечноразностные схемы);

– **установлено** количественное соответствие результатов аналитического и численного моделирования с опубликованными в открытой печати экспериментальными данными во всех случаях, когда эти данные допускают прямое сравнение.

