

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Алексея Анатольевича Алабушева
на диссертационную работу Елизаветы Александровны Франц
“НЕРАВНОВЕСНЫЙ ЭЛЕКТРОФОРЕЗ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ”,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Е.А. Франц посвящена исследованию электрофореза ионоселективной частицы в растворе электролита. Проведены численные расчёты, аналитически рассмотрены два предельных случая слабого и сильного внешнего электрического поля.

Актуальность. Теоретическому и экспериментальному исследованию движения частиц в растворах электролита под действием внешнего электрического поля уделяется особое внимание на протяжении многих лет. Особенно это актуально в настоящее время как с развитием микрофлюидики в целом, так и при внедрении мембранных технологий в частности. Несмотря на активное исследование ионоселективных мембран и их широкого использования, например, для ионоселективных электродов, описание движения ионоселективных частиц сталкивается с дополнительными трудностями, и в первую очередь, с подвижностью самой частицы. В следствие выше сказанного актуальность заявленной цели работы «теоретическое исследование движения сферической ионоселективной микрочастицы в постоянном электрическом поле» не вызывает сомнений.

Новизна результатов. В диссертации впервые численно рассмотрено поведение ионоселективной частицы в растворе электролита во внешнем электрическом поле. Численные результаты дополнены двумя важными предельными случаями слабого и сильного электрического поля. Показано что при умеренных электрических полях наблюдается стационарное течение, при котором образуются вложенные друг в друга три пограничных слоя: двойной электрический слой, область пространственного заряда и тонкий диффузионный слой. В зоне исходящего потока ионов присутствует только двойной электрический слой. Этот поток создает струю с высокой электропроводностью. Увеличение внешнего поля сужает эту струю, но увеличивает ее проводимость. В точке на поверхности частицы, где поток ионов исчезает, происходит отрыв диффузионного пограничного слоя. При достаточно сильных полях стационарное решение теряет устойчивость.

Теоретическая и практическая значимость работы. В диссертации аналитически рассмотрены два важных предельных случая, которые могут быть полезны для предварительных оценок в эксперименте. Численные расчёты можно использовать при проектировании и создании микрофлюидных устройств. Обнаруженный эффект неустойчивости течения может быть полезен для создания устройств перемешивания.

Достоверность и апробация. Достоверность результатов подтверждается, во-первых, хорошим совпадением полученных численных результатов с представленными экспериментальными данными других авторов. Во-вторых, аналитические предельные случаи согласуются с результатами численных расчетов. В-третьих, использовались хорошо зарекомендовавшие себя и апробированные аналитические и численные методы. Результаты, представленные в диссертации, прошли апробацию на различных конференциях и семинарах.

Основные результаты диссертации представлены в открытой печати в виде 18 печатных работ, 4 из которых входят в журналы из перечня ВАК.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитированной литературы, содержащей 90 наименований, и дополнительных разделов. Общий объем диссертации 126 страниц. Она содержит 37 рисунков и 3 таблицы. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Во **введении** дана общая характеристика работы, указаны ее цель, актуальность, новизна, научная и практическая значимость, достоверность результатов, сведения об апробации работы и основных публикациях.

Первая глава содержит краткие обзоры около сотни публикаций по тематике диссертации, а также формулируется общая математическая постановка задачи. Важным является допущение, что безразмерный радиус Дебая считается малым.

Во **второй главе** рассматривается аналитическое решение задачи в слабом электрическом поле. Безразмерная напряжённость внешнего поля на бесконечности полагается малой, но больше малого безразмерного радиуса Дебая. Найдено выражение для функции тока электроосмотического течения и, кроме того, формулу для скорости электрофореза, аналогичную уравнению Гельмгольца — Смолуховского для заряженной непроницаемой частицы.

В **третьей главе** аналитически рассматривается другой предельный случай – сильное электрическое поле. Безразмерная напряжённость внешнего поля на бесконечности полагается большой, а её произведение на малый безразмерный радиус Дебая конечным. В этой ситуации необходимо учитывать явление релаксации, т.е. нарушение симметрии диффузионного слоя вокруг частицы. Получена оценка для толщины диффузионного слоя и формула для скорости электрофореза. Найдена поправка полуэмпирической зависимости скорости электрофореза Духина.

В **четвёртой главе** приводятся результаты численного решения задачи для разных значений напряженности внешнего электрического поля. Метод вычислений и разностная схема приводится в Приложении А.

С увеличением напряжённости внешнего электрического поля за частицей образуется облако повышенной концентрации соли, которая в дальнейшем вытягивается в направлении потока и превращается в струю. Перед частицей во входящей области возникает обедненная зона, концентрация соли в которой стремится к нулю с увеличением напряжённости. Решение при малых напряжённостях хорошо описываются аналитическими формулами главы 2. Полученные электроконвективные вихри вблизи частицы качественно совпадают с результатами экспериментов. Когда внешнее электрическое поле становится больше определенного критического значения, стационарное течение теряет устойчивость и возникает электрокинетическая неустойчивость.

К **достоинствам** диссертационной работы следует отнести, во-первых, литературный обзор. Во-вторых, рассматривается одна общая задача задачи с ясной математической формулировкой. Результаты решения задач подробно проанализированы, из них выделены основные положения, которые лаконично сформулированы в конце каждой главы и в обобщающем заключении к диссертации. В третьих, продемонстрировано хорошее владение как численными методами, так и аналитическими. Несомненно, что результаты, полученные в диссертации, имеют важную

теоретическую и практическую значимость, и могут быть полезны как при дальнейшем развитии темы диссертации, так и проектировании технологических устройств.

По содержанию диссертационной работы можно сделать только незначительные замечания, относящиеся к стилю изложения и оформления. Например, и в диссертации (стр. 7) и в автореферате (стр. 3) используются ссылки «В статье Мищук было показано, ...», «В статье Daghighi было численно показано, ...» без упоминания в списке литературы. Используются не совсем понятные термины, такие как «точное численное решение» (стр. 93). Не приведены характеристики вычислительной сетки в Приложении А.

Заключение

Диссертационная работа Франц Елизаветы Александровны на тему «Неравновесный электрофорез ионоселективной микрочастицы» является законченной научной квалификационной работой и по своим квалификационным признакам соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013г., предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а её автор, Франц Елизавета Александровна, заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Вычислительной гидродинамики» Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»)

Алабушев Алексей Анатольевич

02.11.2020

Подпись А.А. Алабушева заверяю.

Подтверждаю, что А.А. Алабушев не входит в состав членов диссертационного совета Д 004.036.01, утвержденных приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН, к.ф.-м.н.  / Юрлова Наталья Алексеевна

Я, Алабушев Алексей Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

E-mail: alabuzhev@icmm.ru

Тел.: +7(342)2378331

Почтовый адрес: 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1

Лаборатория «Вычислительной гидродинамики» ИМСС УрО РАН

Web-сайт: <http://www.icmm.ru>