

Отзыв официального оппонента

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

Диссертационная работа Е.А. Франц посвящена теоретическому изучению движения сферической ионоселективной частицы, находящейся в растворе электролита, под действием внешнего электрического поля.

В работе рассмотрены два предельных случая: электрическое поле малой и высокой напряженности. Эти случаи существенно различаются ввиду разной структуры пограничных слоев, формирующихся около поверхности частицы. В электрическом поле малой напряженности на границе раздела электролит-частица формируется тонкий двойной электрический слой (ДЭС) с дисбалансом заряда, вне которого раствор является электронейтральным. В электрическом поле высокой напряженности около частицы формируется более сложная структура пограничных слоев, которая включает ДЭС, область пространственного заряда и электронейтральный диффузионный слой. Заряд в ДЭС и в области пространственного заряда порождает кулоновскую силу, которая приводит жидкость в движение. Таким образом, формируется электроосмотическое течение жидкости около частицы, которое в итоге приводит к электрофоретическому движению самой частицы.

В работе с помощью асимптотического анализа описано поведение ионоселективной частицы для указанных предельных случаев. Приводятся также результаты численного моделирования полной нелинейной системы Нернста-Планка-Пуассона-Стокса применительно к рассматриваемой проблеме. Теоретические результаты сопоставляются с результатами численного моделирования, а также с известными экспериментальными данными.

Актуальность. Изучение электрокинетических явлений в микромасштабах, ассоциированных с ионоселективной поверхностью, безусловно актуально для современной электрогидродинамики. В микромасштабах перенос жидкости и взвешенных в ней частиц можно вызвать за счет приложенного электрического поля; использование ионообменного материала является ключевым фактором в таких практических приложениях как обессоливание воды и смешивание жидкостей.

Структура диссертации. Объем диссертации составляет 125 страниц, включая список литературы из 90 наименований, 3 таблицы и 37 рисунков. Диссертация состоит из списка обозначений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и таблиц, а также приложения.

Во введении дается обоснование научной и практической значимости исследования, а также формулируются цели и задачи работы. Изложены защищаемые научные положения.

В первой главе приводится обзор как теоретических, так и экспериментальных работ по направлению исследования; описывается современное состояние проблемы. Формулируется математическая постановка задачи, включающая нелинейную систему уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса, а также граничные условия на поверхности частицы и на значительном удалении от нее. Обосновывается использование приближения Стокса для гидродинамической части задачи; анализируются возможные механизмы переноса ионов.

Вторая глава посвящена аналитическому решению задачи в предельном случае малой напряженности электрического поля. Производится разложение уравнений по малым параметрам задачи (величине поля и числу Дебая); их решение находится отдельно для внутренней (внутри ДЭС) и внешней (вне ДЭС) областей с последующим сращиванием на границе. Основным результатом второй главы является нахождение аналитической зависимости скорости ионоселективной частицы от напряженности электрического поля, которая имеет линейный характер (формула (2.98)).

Третья глава посвящена решению задачи в другом предельном случае – при высокой напряженности внешнего электрического поля. Так как структура пограничных слоев становится более сложной, то решение находится отдельно для каждого слоя и внешнего объема раствора электролита, за исключением ДЭС, влиянием которого пренебрегается. Получены соотношения для вычисления электрофоретической скорости частицы и скорости электроосмотического скольжения.

В четвертой главе освещаются результаты численного моделирования полной, неупрощенной системы уравнений. Сравнение скоростей электрофореза, полученных аналитическим и численным подходами, показывает хорошее согласие как для малой, так и для большой напряженности электрического поля. Сравнение с экспериментами также демонстрирует неплохое согласие. Численное моделирование подтверждает факт отрыва диффузионного слоя и возникновение электрокинетической неустойчивости около поверхности ионоселективной частицы в области входящего потока ионов. Наблюдалось формирование электроконвективных

вихрей, которые были ранее экспериментально обнаружены Духиным и Мищук.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации. Изложенные автором научные положения и выводы достаточно ясно сформулированы и полностью обоснованы. Их достоверность подтверждается успешным сравнением аналитических результатов и результатов численного моделирования как между собой, так и с известными экспериментальными данными.

Новизна исследований и полученных результатов. В диссертации представлен целый ряд новых результатов. Получено асимптотическое решение задачи, описывающее электрофорез ионоселективной частицы для малой напряженности внешнего электрического поля. В частности, выведена аналитическая формула для скорости электрофореза, описывающая линейный отклик скорости на приложенное электрическое поле. Для предела сильного электрического поля найдены аналитические разложения для каждого из пограничных слоев. Для катионообменной микрочастицы обнаружена возможность потери устойчивости пространственного заряда, находящегося в области входящего потока катионов.

Практическая значимость полученных результатов. Наиболее существенным результатом диссертационной работы, который может быть внедрен на практике, является обнаружение электрокинетической неустойчивости в области входящего потока ионов. Данный эффект может найти применение для повышения эффективности смешивания жидкостей при создании микромиксеров.

Апробация. Результаты исследований докладывались на многочисленных международных научных конференциях и семинарах.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 17 научных работах, в том числе в 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК.

Автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертации.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации. Диссертация Франц Е.А. представляет собой хорошо структурированный завершённый научный труд, имеющий ценность для научного сообщества и перспективу применения в высокотехнологичных приложениях. Тем не менее, по тексту работы имеются замечания:

1. На рисунке 1.1 не ясно, почему внешнее поле приводит к асимметрии в распределении зарядов только для третьего вида частиц. Не понятна также природа объемного отрицательного заряда внутри металлической частицы. На рисунке 1.2 указана скорость частицы; вместе с тем, согласно подписи к нему, он дан в системе координат, связанной с неподвижной частицей. На рисунке 3.1 качественно показано распределение

ионов вокруг катионоселективной частицы. Оно явно не коррелирует с описанием такого распределения в тексте вокруг рисунка.

2. В уравнении (2.3) имеется производная по времени, несмотря на то, что рассматривается стационарное решение задачи. В уравнениях (2.3)-(2.8) перемешаны декартовы и сферические координаты при том, что выше все уравнения уже были переписаны в сферических координатах. В главе 2 для приближения нулевого порядка и для внешнего разложения приняты совпадающие обозначения, что затрудняет разбор работы. Так, например, величина Φ_0 должна формально удовлетворять противоречащим условиям (2.5) и (2.21).

3. Список обозначений на стр. 4 и 5 является неполным и неточным. Например, если в первой половине работы ключевой параметр работы – скорость частицы – обозначалась как U , то во второй половине работы – как u . При этом обозначение U также использовалось, но, как правило, уже как частное скорости и квадрата напряженности поля. Так, на основном рисунке 4.30 U это явно U/E^2 , на вставке А рисунка u это U и только на вставке В рисунка обозначение U используется в исходном смысле, определяемом списком обозначений. Это все, конечно, затрудняет изучение работы.

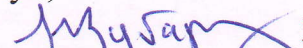
4. Одним из наиболее важных результатов работы является найденная зависимость $U \sim E^{4/3}$ для электрофореза в пределе сильного поля, отличная от формулы Духина $U \sim E^2$ (стр. 92). Эта зависимость получена, видимо, в результате аппроксимации формулы (3.54) степенной функцией. Однако процедура аппроксимации в работе не описана и, как следствие, не вполне ясна область применимости такой зависимости.

5. Текст содержит неточности и опечатки, характерные для подобного рода работ. В частности, на стр. 7 некорректно оформлены ссылки на литературу; на стр. 15 имеется лишнее слово “характеристики”; в формуле (1.3) и выше указано, что концентрация зависит только от координат, но при этом осуществляется ее дифференцирование по времени; на стр. 21 и 22 повсюду пропущен индекс “ i ” у потоков ионов различного сорта; на стр. 27 при описании формулы (1.31) следует говорить об отсутствии потока анионов, а не ионов через поверхность частицы; на стр. 35 имеется отсылка к несуществующему рисунку 2.1(б).

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Общее заключение. Диссертация «Неравновесный электрофорез ионоселективной микрочастицы», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на достаточно высоком профессиональном уровне и вносящей заметный вклад в понимание электрокинетических явлений около искривленной ионоселективной

поверхности. Достоверность полученных результатов, их научная новизна, фундаментальная и практическая ценность не вызывают сомнений. Таким образом, представленная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Елизавета Александровна Франц, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”.

Официальный оппонент,
член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук,
главный научный сотрудник ИЭФ УрО РАН,  Зубарев Н.М.

« 02 » ноября 2020 г.

Подпись Зубарева Н.М. заверяю,
Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,
кандидат физ.-мат. наук



Кокорина Е.Е.

Сведения об оппоненте:

Зубарев Николай Михайлович,
член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук,
главный научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук
(ИЭФ УрО РАН),
Адрес: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106,
Тел.: +7 (343) 2678660,
E-mail: nick@iep.uran.ru