



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ**

**Институт физической химии и электрохимии
им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук
(ИФХЭ РАН)**

ПРИНЯТО

Ученым советом ИФХЭ РАН
Протокол № 3 от 20 марта 2012 г.
Председатель Ученого совета

академик

А.Ю. Цивадзе



Рабочая программа дисциплины

Теоретические основы микротечений в электрическом поле

Специальность 01.04.07 - Физика конденсированного состояния

Москва

2011 год

1. Цели и задачи освоения дисциплины

Цели дисциплины Подготовить аспирантов к научно-исследовательской деятельности в области, связанной с гидродинамикой в тонких каналах, микрофлюидикой и использованием технологий "лаборатория на чипе".

Задачи дисциплины: Создание углубленного междисциплинарного представления о микро- и нанофлюидике, основных принципах течений жидкости в тонких каналах под действием внешнего воздействия, в первую очередь электрического поля. Освоение аспирантами математического аппарата, необходимого для решения гидродинамических и электрохимических задач, встающих при теоретическом анализе микротечений. Формирование глубокого понимания физических процессов, позволяющих управлять микротечениями и лежащих в основе современных нанотехнологических приложений. Обучение навыкам систематизирования и обобщения как уже имеющейся в литературе, так и самостоятельно полученной в ходе исследований информации.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Данная дисциплина относится к группе специальных дисциплин отрасли науки «Физико-математические науки» и научной специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния (Приказ Министерства образования и науки РФ от 25 февраля 2009 г. N 59 "Об утверждении Номенклатуры специальностей научных работников")». Настоящая дисциплина «Теоретические основы микротечений в электрическом поле» - модуль основной образовательной программы послевузовского профессионального образования (ООП ППО) по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» - дисциплина по выбору аспиранта.

Обучающийся по данной дисциплине должен иметь фундаментальные представления о физике конденсированного состояния. Для обучения по данной дисциплине необходимо высшее образование с освоением программы по физике конденсированного состояния в объеме для физических специальностей.

3 Требования к результатам освоения дисциплины

В рамках данной дисциплины углубляются и развиваются следующие компетенции:

а) общекультурные компетенции: способность к самостоятельному освоению новых методов теоретического исследования в области физики конденсированного состояния, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; способность самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения; способность к проведению самостоятельной научно-исследовательской работы;

б) профессиональные компетенции: способность грамотно поставить задачи при теоретическом исследовании, выбрать оптимальный метод, необходимых для их решения, способность правильно использовать полученные навыки и умения; способность систематизировать и обобщать как уже имеющуюся в литературе, так и самостоятельно полученную в ходе исследований информацию; способность проводить анализ полученных решений; способность к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; способность самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения; способность к проведению самостоятельной научно-исследовательской работы.

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы 72 часа.

4.1 Структура дисциплины

№ п/п	Наименование дисциплины	Объем учебной работы (в часах)						Вид итогового контроля	
		Всего	Всего аудит.	Из аудиторных					Сам. работа
				Лекц.	Лаб.	Прак.	КСР.		
1	Теоретические основы микротечений в электрическом поле	108	72	24	48			36	зачет

4.2 Содержание дисциплины

4.2.1 Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел Дисциплины	Виды учебной работы, и трудоемкость (в часах)				Самостоятельная работа
		Лек.	Лаб.	Пр.	КСР	
1	Теоретические основы микрофлюидики	12	24			20
2	Течения вблизи мембран, заряженных и селективных поверхностей	4	4			4
3	Электрокинетические явления в микрофлюидике	8	20			12

4.2.2 Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела (темы)	Форма проведения занятий
1	Теоретические основы микрофлюидики	<p>1. Введение. Приложения микрофлюидики. Управление течениями в тонком канале.</p> <p>2. Основные феноменологические уравнения микрофлюидики. Гипотеза сплошности. Феноменологические соотношения Фика, Фурье и Ньютона.</p> <p>3. Уравнения движения: уравнения неразрывности, уравнения Навье-Стокса. Модели OLDROYD и FENE для полимеров</p> <p>4. Уравнение Пуассона для электрического поля как предельный случай системы Максвелла. Замкнутая система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Навье-Стокса.</p> <p>5. Краевые условия задач микрофлюидики. Модели двойного электрического слоя Гельмгольца, Гуи-Чепмена, коррекция Штерна и Грэма.</p> <p>6. Гидродинамические условия непротекания, прилипания и проскальзывания на твердой стенке. Кинематическое и динамическое условия на межфазных границах.</p> <p>7. Математический аппарат задач микрофлюидики. Теория подобия и размерности. Автомодельность первого и</p>	Лекции, семинары.

		<p>второго рода.</p> <p>8. Математический анализ векторных полей. Теоремы Остроградского-Гауса и Стокса. Уравнения математической физики в инвариантном векторном виде.</p> <p>9. Асимптотические методы. Пример Фридриха. Составное разложение. Метод многих масштабов. Быстрые и медленные переменные.</p> <p>10. Задачи математической физики и корректность их постановки. Условия Гурса. Корректность задач по Адамару.</p> <p>11. Основные идеи теории бифуркаций. Неизбежность бифуркаций в микрофлюидике.</p> <p>12. Вопросы устойчивости. Устойчивость по Ляпунову, спектральной неустойчивость. Структурная неустойчивость.</p>	
2	Течения вблизи мембран, заряженных и селективных поверхностей	<p>1. Система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса в одномерном случае. Поведение электролита около заряженных стенок.</p> <p>2. Приближение Дебая и решение Гуи-Чепмена. Концентрационная поляризация и экранирование электрического поля.</p> <p>3. Концентрационная поляризация около селективных поверхностей. Диффузионный слой, слой Нернста.</p> <p>4. Подход Рубинштейна-Штильмана и уравнение Пенлеве.</p>	Лекции, семинары.
3	Электрокинетические и электрохимические явления в микрофлюидике	<p>1. Понятие электроосмоса и электрофореза первого рода. Принцип микронасоса.</p> <p>2. Заряженные макромолекулы и частицы. Электрофорез второго рода. "Турбулентность" на микрочастицах.</p> <p>3. Электрокинетическая неустойчивость. Система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса в двумерном случае.</p> <p>4. Физические механизмы сверхпредельного перехода. Электрокинетический механизм как сверхкритическая бифуркация.</p> <p>5. Скорость скольжения Рубинштейна-Зальцмана. Потеря устойчивости вблизи модифицированных поверхностей.</p> <p>6. Межфазные границы в электрическом поле. Капли и струи в электрическом поле. Конуса</p>	Лекции, семинары.

	Тейлора. 7. Движение пленок жидкости под действием внешних сил. Эффект Марангони.	
--	--------------------------------------------------------------------------------------	--

5. Образовательные технологии

1. Активные образовательные технологии: лекции и семинары.
2. Сопровождение лекций визуальным материалом в виде слайдов, проецируемых на экран с помощью видеопроектора.
3. Участие обучаемых в научной работе и выполнении исследовательских проектов.
4. Использование специального программного обеспечения и интернет-ресурсов для обучения в ходе практических и самостоятельных работ.

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Виды самостоятельной работы: в домашних условиях, в читальном зале библиотеки, на компьютерах с доступом к базам данных и ресурсам Интернет, в лабораториях с доступом к лабораторному оборудованию и приборам.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций, учебное и научное программное обеспечение, ресурсы Интернет.

Форма контроля знаний – зачет в конце курса, включающий теоретические вопросы и задачу.

Контрольные вопросы к зачету:

Теоретические основы микрофлюидики.

Междисциплинарность микрофлюидики и слом старых технологий. Характерные объекты микрофлюидики. Примеры практических применений микрофлюидике в медицине: адресная доставка лекарств, хим. анализы,

медицинская диагностика, анализ ДНК. Другие приложения микрофлюидики: микронасосы, нанодиоды. Способы управления движением жидкости в малых масштабах.

Границы гипотезы сплошности. Понятие элементарного объёма. Предположения о сплошности в микрофлюидике. Фундаментальные законы сохранения массы, импульса и энергии. Феноменологические соотношения Фика, Фурье и Ньютона. Учёт электромиграции в уравнении Фика. Уравнения движения: уравнения неразрывности, уравнения Навье-Стокса (связь тензора деформаций, скоростей деформации и тензора напряжений). Обобщение второго закона Ньютона на сплошные среды. Понятие неньютоновской (вязко-упругой) жидкости. Модели OLDROYD и FENE для полимеров. Уравнение Пуассона для электрического поля как предельный случай системы Максвелла. Необходимость учета магнитных полей. Замкнутая система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Навье-Стокса.

Понятие проводника, диэлектрика и электролита и краевые условия для них. Модели двойного электрического слоя Гельмгольца, Гуи-Чепмена и коррекция Штерна и Грэма. Электрокинетические явления. Условия на электроде. Гидродинамические условия непротекания, прилипания и проскальзывания на твердой стенке. Уточненное краевое условие для температуры. Условия на поверхности раздела фаз: кинематическое и динамические условия.

Три вида законов в природе. Размерные и безразмерные величины. Формула размерности. Структура функциональных связей между физическими величинами. Как и зачем приводить уравнения к безразмерному виду. Пи - теорема. Доказательство теоремы Пифагора с помощью теории размерности. Параметры, определяющие класс явлений. Скейлинг. Автомодельность первого и второго рода.

Скалярные и векторные поля. Градиент — вектор, порожденный скалярным полем. Оператор ∇ и операции с ним. Градиент, дивергенция и ротор как примеры применения ∇ . Более сложные комбинации с ∇ . Интегральное применение оператора ∇ : теоремы Остроградского-Гауса и Стокса. Уравнения математической физики в инвариантном векторном виде.

Неизбежность применения асимптотических и специальных численных методов в микрофлюидике. Алгебраические уравнения: регулярные и сингулярные возмущения. Понятие малого параметра и сингулярных задач. Пограничные слои и метод сращиваемых асимптотических разложений. Пример Фридриха. Составное разложение. Метод многих масштабов. Быстрые и медленные переменные. Усреднение и медленный дрейф в высокочастотном поле.

Классификация уравнений математической физики. Замыкание задачи добавлением начальных и краевых условий. Соответствие этих условий типу уравнения (условия Гурса). Корректность задач по Адамару. Примеры постановок и некорректности, возникающей по разным причинам. Регуляризация некорректных задач.

Понятия режима, его устойчивости и бифуркационных переходов. Неизбежность бифуркаций в микрофлюидике, примеры. Различные определения устойчивости, устойчивость по Ляпунову, плодотворность использования спектральной неустойчивости. К чему ведет каскад бифуркаций? Структурная неустойчивость.

Течения вблизи мембран, заряженных и селективных поверхностей.

Система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса в одномерном случае. Дзета-потенциал. Числа Дебая как малый параметр. Равновесие Доннана. Приближение Дебая и решение Гуи-Чепмена. Структура решения в пространстве. Концентрационная поляризация и экранирование электрического поля.

Концентрационная поляризация при наличии потока ионов к поверхности. Система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса в одномерном случае. Гипотеза электронейтральности. Причина изменения концентрации электролита около селективной границы. Диффузионный слой, слой Нернста, полная толщина диффузионного слоя. Омические режимы. Предельный ток, явление запирающего тока и его физическая причина. Подход Рубинштейна-Штильмана и уравнение Пенлеве. Разложение по малому параметру. Численное решение. Структура решения в пространстве и электрическая проводимость различных участков.

Электрокинетические и электрохимические явления в микрофлюидике.

Приведение системы уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Навье-Стокса к безразмерному виду. Неоднозначность выбора базиса. Безразмерные параметры задачи. Малость чисел Рейнольдса, пренебрежение силами инерции - типичное приближение микрофлюидики. Два типичных размера - микро-наноразмер - длина Дебая и макро-размер - типичный геометрический размер. Условия на стенке: теоретические представления Гельмгольца, Гуи-Чепмена и Штерна о двойном электрическом слое. Решение системы Нернста-Планка-Пуассона в простейших случаях.

Концентрационная поляризация при наличии потока ионов к поверхности. Система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса в одномерном случае. Неоднородное поле и появление ненулевой кулоновской силы и движения жидкости. Приложение асимптотического метода многих масштабов. Понятие электроосмоса и электрофореза первого рода (электрокинетические

явления). Скорость скольжения Смолуховского и Рубинштейна-Зальцмана. Принцип микронасоса.

Заряженные макромолекулы и частицы. Электрофорез первого рода. Формулы Дебая-Хюккеля и Гельмгольца-Смолуховского. Разделение частиц. Электрофорез второго рода ("сверхбыстрый" электрофорез. Возможность разделения белков по их размерам. "Турбулентность" на микрочастицах.

Система уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса в двумерном случае. Физические механизмы сверхпредельного перехода: эффекты экзальтации (увеличение новых носителей тока) и конвекции Рэлея-Бенара (разрушение сопротивления диффузионного слоя). Электрокинетический механизм как сверхкритическая бифуркация. Скорость скольжения Рубинштейна-Зальцмана. Потеря устойчивости одномерного решения. Некорректность простого асимптотического решения задачи на устойчивость и необходимость регуляризации задачи. Потеря устойчивости вблизи модифицированных поверхностей.

Капли и струи в электрическом поле. Конуса Тейлора. Инжектирование микро-и наноструй из конусов. Задача об устойчивости струи в электрическом поле. Движение пленок жидкости под действием внешних сил: эффекта Марангони и электрических полей.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Bruus H. Theoretical microfluidics. Oxford University Press, 2008, 346 p.
2. Probstein R. F. Physicochemical hydrodynamics. Wiley-Interscience Publication, 1978. 590 p.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1967, т. 5, т. 7.
4. Chang H-C, Yeo L.Y. Electrokinetically driven microfluidics and nanofluidics. Cambridge University Press , 2010.

б) дополнительная литература:

5. Nguyen N.T., Wereley S.T. Fundamentals and applications of microfluidics. Artech House, 2006, 520 p.
6. Bird R.B, Armstrong R. C., Hassager O. Dynamics of polymeric liquids. New York, Wiley, 1977.
7. Y.-C. Chang, Demekhin E.A. Complex wave dynamics on thin film. Elsevier, 2002.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Сайт лаборатории физико-химии модифицированных поверхностей ИФХЭ им. А. Н. Фрумкина РАН и Микро- и нанофлюидики Физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова <http://nanofluidics.phys.msu.ru>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

НОК располагает материально-технической базой, обеспечивающей проведение всех видов теоретической и практической подготовки, предусмотренных учебным планом, а также эффективное выполнение диссертационной работы:

Аудитория для проведения лекций, оснащенная компьютером и проектором для показа слайдов компьютерных презентаций. Компьютеры, объединенные в локальную сеть с выходом в Интернет и подключенные к международным и российским научным базам данных и электронной библиотеке с основными международными научными журналами.

Лаборатории ИФХЭ РАН оснащены мощными компьютерами с современным программным обеспечением, позволяющим производить теоретические расчеты и выполнять задачи по моделированию физико-химических процессов, связанных с коллоидными системами.

Программа составлена в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 16.03.2011 № 1365 «Федеральные государственные требования к структуре основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура)» лабораторией физикохимии модифицированных поверхностей.

Программа рассмотрена и утверждена секцией Ученого Совета ИФХЭ РАН «Физикохимия нано- и супрамолекулярных систем» (протокол №3 от 10 сентября 2011 г.)