

Курс предназначен для студентов 4 курса специалитета химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В курсе 7 семестра (1 часть) рассматриваются теоретические основы учения о равновесии: феноменологическая и статистическая термодинамика, в 8-м семестре (2 часть) – формальная химическая кинетика, теории кинетики, катализ и электрохимия. В курсе лекций обсуждаются основные теоретические положения, закономерности протекания химических и фазовых превращений. Семинары посвящены расчетам, необходимым для решения различных химических задач с привлечением физического и математического аппарата, способам обработки результатов измерений. Практические занятия направлены на ознакомление студентов с техникой физико-химического эксперимента, получение ими экспериментальных навыков работы на современном физико-химическом оборудовании, знакомству с современными расчетными методами химической термодинамики и кинетики.

**Цели:** показать роль физической химии как теоретического фундамента современной химии, научить основам химической термодинамики, теории растворов и фазовых равновесий, элементам статистической термодинамики, основам химической кинетики и катализа, электрохимии, дать представления о механизмах химических реакций.

**Задачи:** привить учащимся навыки систематического подхода к решению химических задач фундаментального и прикладного характера.

**Ожидаемые результаты изучения дисциплины:** В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

**Знать:** основные законы и закономерности, определяющие направление и результат протекания процессов в гомогенных и гетерогенных системах, способы аналитического представления этих закономерностей.

**Уметь:** формулировать конкретные химические задачи на основе законов и закономерностей, освоенных в курсе физической химии; получать физико-химические данные, проводить их математическую обработку, обобщать полученные результаты.

**Владеть:** простейшими расчетными методами решения физико-химических задач, навыками поиска физико-химических данных в открытых источниках (в том числе, в информационных базах данных) и применения их при решении практических химических задач

**Приобрести опыт деятельности:** в анализе, формулировке и решении конкретных химических задач, интересующих фундаментальную науку и практику

### Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 720 часа, из них 432 ч. – курс физической химии (144 ч. - лекции, 72 ч. – семинары, 144 ч. – самостоятельная работа), 288 ч. - лабораторные работы (144 ч. - аудиторная нагрузка и 144 ч. - самостоятельная работа); 72 часа отведено на выполнение курсовой работы.

Вид работы	Семестр		Всего
	7	8	
<b>Общая трудоёмкость, акад. часов</b>	<b>360</b>	<b>360</b>	<b>720</b>
<b>Аудиторная работа:</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>360</b>
Лекции, акад. часов	72	72	144
Семинары, акад. часов	36	36	72

Сам. работа	108	36	144
Лабораторные работы, акад. часов	72	72	144
Сам. работа	72	72	144
Курсовая работа	-	72	72
<b>Самостоятельная работа, акад. часов</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>360</b>
<b>Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)</b>	<b>Зачет, экз.</b>	<b>Зачет, экз.</b>	

### Лекции осеннего семестра 4-го курса

**Лекция 1.** Основные понятия термодинамики. Уравнения состояния. Уравнение состояния идеального газа, уравнение Ван-дер-Ваальса, закон соответственных состояний.

**Лекция 2.** Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия, тепло, работа, потерянная работа, теплоемкость.

**Лекция 3.** Первый закон в химии. Энтальпии реакций, энтальпии образования, закон Гесса и закон Кирхгоффа.

**Лекция 4.** Второй закон термодинамики. Энтропия. Аксиоматика первого и второго законов термодинамики.

**Лекция 5.** Второй закон, термодинамические потенциалы. Условия термодинамического равновесия. Уравнения Гиббса-Дюгема, Гиббса - Гельмгольца, уравнения Максвелла.

**Лекция 6.** Химический потенциал. Химический потенциал для идеальных и реальных газов. Фугитивность. Условия химического равновесия. Химическое сродство. Константа равновесия равновесия реакций с участием газов. Изотерма и изобара химической реакции.

**Лекция 7.** Условия фазового равновесия. Правило фаз. Уравнение Клаузиуса - Клапейрона. Условия мембранного равновесия.

**Лекция 8.** Диаграммы состояния однокомпонентных систем (вода, сера, фосфор). Фазовые переходы первого и второго рода. Уравнение Эрнфеста.

**Лекция 9.** Основные понятия термодинамики растворов. Химический потенциал компонента в растворе. Закон Рауля и закон Генри. Выбор стандартных состояний для химического потенциала. Термодинамическая активность. Идеальный, регулярный и атермальный растворы.

**Лекция 10.** Парциальные мольные и средне-мольные величины. Фазовые равновесия в двухкомпонентных системах (уравнение Шредера, осмос, криоскопия). Равновесие жидкость - пар, определение термодинамической активности, использование уравнения Гиббса-Дюгема.

**Лекция 11.** Равновесие жидкость - пар в двухкомпонентной системе. Законы Коновалова. Диаграммы состояния двухкомпонентных систем.

**Лекция 12.** Расслаивание. Химические равновесия в растворах. Константы равновесия для реакций в растворах при разных стандартных состояниях.

**Лекция 13.** Третий закон термодинамики. Расчет фазовых и химических равновесий, приведенные термодинамические потенциалы. Как по энергии Гиббса судить о возможности протекания химических реакций? Расчет равновесного состава.

**Лекция 14.** Химическая термодинамика. Итоги.

**Лекция 15.** Термодинамика адсорбции. Изотермы Ленгмюра и БЭТ.

**Лекция 16.** Термодинамика необратимых процессов. Производство энтропии. Линейные законы. Связь между сродством и скоростью химической реакции. Теорема Пригожина. Перекрестные явления. Принцип Кюри, соотношения Онсагера.

**Лекция 17.** Основные понятия статистической термодинамики. Метод ячеек Больцмана.

**Лекция 18.** Фазовые пространства. Плотность вероятности в фазовом пространстве. Мик-

роканонический и канонический ансамбль. Связь между энтропией и плотностью вероятности. Суммы по состояниям  $Z$  и  $Q$ .

**Лекция 19.** Канонический ансамбль. Сумма по состояниям и термодинамические функции. Расчет сумм по состояниям для различных видов движения. Поступательная сумма по состояниям. Формула Закура - Тетроде.

**Лекция 20.** Поступательная сумма по состояниям. Распределение молекул по скоростям и по энергиям в идеальном газе.

**Лекция 21.** Колебательная и электронная суммы по состояниям.

**Лекция 22.** Вращательная сумма по состояниям. Теорема равнораспределения. Расчет константы равновесия химической реакции методом статистической термодинамики.

**Лекция 23.** Расчет конфигурационного интеграла. Реальные газы. Метод Урселла-Майера. Статистическое рассмотрение вириального уравнения.

**Лекция 24.** Метод ячеек в статистической термодинамике жидкостей. Расчет энтропии смешения в рамках решеточной модели раствора.

**Лекция 25.** Теории теплоемкости Эйнштейна и Дебая

### Лекции весеннего семестра 4-го курса

**Лекция 1.** Скорость химической реакции. Закон действия масс. Константа скорости. Простые и сложные реакции. Молекулярность и порядок. Способы экспериментального определения порядка. Прямая и обратная кинетические задачи. Кинетика необратимой реакции первого порядка. Время полупревращения, среднее время жизни.

**Лекция 2.** Кинетика необратимой реакции нулевого порядка и порядка  $n$ . Кинетика реакций второго порядка. Автокатализ.

**Лекция 3.** Сложные реакции. Параллельные реакции первого и второго порядка. Принцип независимости протекания. Обратимая реакция первого порядка. Принцип детального равновесия. Скорость и сродство химической реакции. Константы скорости и константы равновесия.

**Лекция 4.** Последовательные реакции первого порядка. Принцип Боденштейна.

**Лекция 5.** Квазистационарность и квазиравновесие. Схемы Михаэлиса – Ментон и Ленгмюра – Хиншельвуда. Обратные координаты в уравнении М-М. Конкурентное ингибирование.

**Лекция 6.** Цепные реакции. Основные стадии. Неразветвленные цепные реакции ( $H_2 + Br_2 = 2HBr$ ). Уравнение Боденштейна-Линда. Разветвленные цепные реакции ( $H_2 + 1/2 O_2 = H_2O$ ). Принцип Семенова. Пределы воспламенения.

**Лекция 7.** Химические реакции в потоке. Реакторы идеального смешения и идеального вытеснения. Колебательные реакции (начало обсуждения).

**Лекция 8.** Колебательные реакции (продолжение). Схема Лотки-Вольтерра. Устойчивые и неустойчивые стационарные состояния. Точка бифуркации. Схема Франка.

**Лекция 9.** Зависимость константы скорости от температуры. Уравнение Аррениуса. Теория активных столкновений. Вывод основного уравнения.

**Лекция 10.** Обсуждение основного уравнения ТАС. Стерический фактор. Основные положения теории активированного комплекса. Поверхность потенциальной энергии.

**Лекция 11.** Вывод основного уравнения ТАК (два варианта). Трансмиссионный коэффициент. Физический смысл энергии активации ТАК.

**Лекция 12.** Термодинамический взгляд на уравнение ТАК. Энтропия активации. Сравнение результатов ТАС и ТАК. Оценка стерического множителя ТАС с помощью ТАК. Температурная зависимость предэкспоненциального множителя.

**Лекция 13.** Сравнение результатов ТАС и ТАК (продолжение). Мономолекулярные реакции в ТАС. Схема Линдемана, ее достоинства и недостатки.

**Лекция 14.** Поправка Хиншельвуда. Мономолекулярные реакции в ТАК. Тримолекулярные реакции в ТАС и ТАК.

**Лекция 15.** ТАС в растворах. Вывод уравнения Смолуховского. ТАК в растворах. Уравнение Брэнстеда-Бьеррума. Сравнение констант скорости в растворах и в газовой фазе.

**Лекция 16.** Фотохимические реакции. Принцип Франка-Кондона. Судьба возбужденной частицы. Эксимер и Эксиплекс. Закон Буге-Ламберта-Бэра. Схема Штерна-Фолмера. Первичный и вторичный квантовые выходы. Фотохимические реакции в растворах, клеточный эффект. Реакция Боденштейна-Линда (фотохимическая и темновая).

**Лекция 17.** Катализ – основные положения. Гомогенный катализ. Общий и специфический кислотный и основной катализ. Кинетические схемы. Функция Гамметы.

**Лекция 18.** Гомогенный катализ (продолжение). Сверхкислоты. Соотношения Бренстеда. Гетерогенный катализ. Возможные лимитирующие стадии. Внешняя диффузия. Реакции на поверхности. Эффективные константы скорости. Схема Ленгмюра –Хиншельвуда. Размерность константы скорости. Сравнение со схемой Михаэлиса-Ментен.

**Лекция 19.** Внутренняя кинетика и внутренняя диффузия. Задача Тиле и ее решение для цилиндрической поры. Фактор Тиле. Энергии активации для различных лимитирующих стадий.

**Лекция 20.** Теории катализа. Теория Баландина. Геометрическое соответствие. Энергетическое соответствие. Теория Кобозева. Активные ансамбли.

### **Программа лекций по электрохимии (весенний семестр 4-го курса)**

(Г.А.Цирлина) Общая характеристика электрохимических систем и явлений. Строение полярных растворителей, растворов и расплавов электролитов по данным спектральных методов. Диэлектрическая проницаемость и ее частотная зависимость. Молекулярная ассоциация в смешанных растворителях. Представления об электролитической диссоциации: ранние экспериментальные свидетельства. Числа сольватации ионов, методы их определения и расчета. Равновесные свойства растворов электролитов: сольватация ионов, ион-ионные и ион-дипольные взаимодействия. Модель Борна для энергии сольватации и энергии кристаллической решетки. Модель ионной атмосферы, теория Дебая-Хюккеля для описания коэффициентов активности. Неоднозначность выбора модельных параметров для реальных растворов электролитов. Пределы применимости и ограничения моде-

лей, возможности их усовершенствования.

(Г.А.Цирлина) Неравновесные явления в растворах электролитов. Диффузия и миграция ионов. Транспортные характеристики ионов и молекул (эквивалентная электропроводность, подвижность, коэффициент диффузии, число переноса). Отклонения от стоковского поведения ионов, их причины. Сольводинамические радиусы ионов. Модели ион-ионных взаимодействий, описывающие транспорт ионов и их ассоциацию - экспериментальная проверка и ограничения. Нарушение равновесий в растворах вследствие протекания химических реакций. Особенности кинетики реакций с участием протонов, реакций лигандного обмена. Эмпирическое соотношение Брэнстеда. Диффузионные ограничения при протекании химических реакций в растворах, смешанная кинетика.

(Г.А.Цирлина) Электрохимические цепи и равновесия в них. Данные измерений ЭДС как источник термодинамической информации. Равновесные потенциалы, уравнение Нернста для окислительно-восстановительных равновесий, осложненных химическими равновесиями. Диаграммы Пурбэ. Электродный потенциал - понятие и особенности измерений. Электрохимические ячейки. Важнейшие электроды сравнения. Диффузионный скачок потенциала на границе двух растворов и его элиминирование. Проблема сопоставления равновесных потенциалов в системах на основе разных растворителей и при различных температурах. Окислительно-восстановительные реакции в растворах, условность определений "сильный окислитель/восстановитель" и "слабый окислитель/восстановитель". Первичные и вторичные источники тока.

(В.И.Фельдман) Локализация избыточных электронов в конденсированных средах. Поляроны. Экспериментальное обнаружение сольватированного электрона в полярных жидкостях и стеклообразных средах. Спектроскопические проявления (оптические и магнитные отклики). Континуальные и конфигурационные модели сольватированного электрона. Динамика сольватации, связь с релаксационным спектром жидкости. Термодинамические свойства гидратированного электрона (стандартный потенциал, энтальпия и энтропия гидратации электрона). Подвижность и коэффициент диффузии. Сопоставление свойств сольватированного электрона и молекулярных анионов.

(Г.А.Цирлина) Строение заряженных межфазных границ идеально поляризуемый электрод/раствор. Пространственное разделение заряда. Обратимая адсорбция: специфическая и электростатическая. Электрокапиллярные явления. Потенциал нулевого заряда. Экспериментальные методы исследования термодинамики межфазных границ. Изотермы адсорбции. Модельные представления о распределении потенциала на границе электрод/раствор (теория Гуи-Чапмена). Экспериментальная проверка теории путем измерения дифференциальной емкости. Использование заряженных межфазных границ в "двойнослойных" конденсаторах.

(Г.А.Цирлина) Совершенно поляризуемые электроды. Адсорбция с переносом заряда. Соадсорбция ионов и атомов. Полный и свободный заряд электрода, соответствующие потенциалы нулевого заряда. Экспериментальное определение величин Гиббсовской адсорбции. Кулонометрические методы определения истинной поверхности электродов. Кристаллографическая ориентация поверхности и ее влияние на строение адсорбционных слоев. Необратимая адсорбция. Функционализация поверхности. In situ спектроскопические методы исследования заряженных межфазных границ, ограничения на конфигурацию электрохимической ячейки. In situ зондовые микроскопические методы для визуализации межфазных границ с атомарным разрешением.

(Г.А.Цирлина) Кинетика электродных процессов в условиях медленного массопереноса. Стационарная диффузия к плоскому электроду. Предельный диффузионный ток и потенциал полуволны. Конвективная диффузия, вращающийся дисковый электрод и вращающийся дисковый электрод с кольцом. Нестационарная диффузия к растущей сфере - конфигурация полярографии на каплюющем электроде. Уравнение Ильковича. Диффузионная кинетика в условиях естественной конвекции - вольтамперометрия. Уравнение Рэндлса-

Шевчика. Микроэлектроды. Электроанализ. Материалы электрохимических сенсоров. (Г.А.Цирлина) Кинетика стадии переноса заряда. Экспериментальное определение скорости переноса заряда при сравнимой скорости диффузии (смешанный ток). Эмпирическое уравнение Тафеля и его феноменологическое обоснование. Уравнение Батлера-Фольмера. Ток обмена. Перенапряжение. Коэффициент переноса. Зависимость скорости переноса заряда от концентрации электролита фона и природы материала электрода (теория замедленного разряда А.Н.Фрумкина). Исправленные Тафелевские зависимости. Немонотонные поляризационные кривые при восстановлении анионов на отрицательно заряженной поверхности - аналогии с анион-анионной ассоциацией. Возможности уточнения параметров теории замедленного разряда с учетом молекулярного строения реагентов.

(В.И.Фельдман) Гидратированный электрон как уникальный химический реагент. Особенности кинетики и механизма реакций сольватированного электрона. Быстрые (диффузионно-контролируемые), "сверхбыстрые" и медленные реакции. Кинетический радиус гидратированного электрона. Примеры реакций сольватированного электрона. Молекулярные ион-радикалы. Особенности кинетики реакций с участием ион-радикалов. Роль спинового фактора. Влияние локальных и внешних полей, принципы управления реакциями ион-радикалов. Сольватированные электроны и ион-радикалы в различных областях химии, возможности приложений.

(Г.А.Цирлина) Кинетика стадии переноса заряда - теория и ее экспериментальная проверка. Теория Маркуса для гомогенных и гетерогенных реакций переноса электрона. Энергии реорганизации растворителя и внутрисферной реорганизации. Смысл параметров феноменологических уравнений в терминах параметров теории Маркуса. Процессы при высоких перенапряжениях, безактивационный разряд. Предэкспоненциальный множитель для адиабатических и неадиабатических процессов. Перенос электрона в зазоре *in situ* сканирующего туннельного микроскопа. Молекулярная проводимость и устройства молекулярной электроники.

(Г.А.Цирлина) Кинетика многостадийных электрохимических реакций. Коррозия и защита от коррозии. Бестоковый потенциал. Пассивация и перепассивация. Ингибиторы и методы их подбора. Анодная и катодная защита. Электрохимическая размерная обработка, электрополировка. Электрокатализ, процессы в топливных элементах. Адсорбированные интермедиаты при окислении органических топлив, самоингибирование. Электроды-катализаторы, их получение и важнейшие характеристики. Мембранно-электродные блоки. Индустриальный электролиз растворов и расплавов.

(Г.А.Цирлина) Электродные реакции, осложненные образованием новой фазы. Процессы гальваники. Осаждение низкоразмерных объектов для наноэлектроники. Темплатирование при электроосаждении. Литография в конфигурации электрохимического туннельного микроскопа. Электрохимическая интеркаляция. Изменение кислородной стехиометрии оксидов. Металлогидридные и литиевые аккумуляторы: электролиты, растворители, способы тестирования.

### Семинары (практические занятия)

1	1	Уравнения состояния
	2	Первый закон термодинамики
	3	Термохимия
	4	Второй и третий законы термодинамики. Энтропия
	5	Термодинамические потенциалы
2	6	Термодинамические свойства растворов неэлектролитов.
	7	Коллигативные свойства
	8	Термодинамические свойства растворов электролитов

	9	Фазовые равновесия в однокомпонентных системах
	10	Фазовые равновесия в двухкомпонентных системах
3	11	Химические равновесия, расчет равновесных составов
	12	Химические равновесия, влияние условий на протекание процессов. Сложные равновесия
	13	Адсорбция
4	14	Статистические суммы
	15	Расчет молекулярных сумм по состояниям идеального газа
	16	Расчет термодинамических свойств идеального газа
	17	Расчет термодинамических свойств неидеальных систем
I.	1.	Скорость реакции. Порядок, молекулярность, константа скорости реакции.
	2.	Методы определения порядка и константы скорости реакции. Температурная зависимость константы скорости. Уравнение Аррениуса. Энергия активации.
	3.	Сложные реакции: обратимые, параллельные и последовательные реакции первого порядка.
	4.	Приближённые методы решения кинетических задач – квазистационарное и квазиравновесное приближения.
	5.	Контрольная работа № 1.
II.	6.	Теория активных столкновений. Бимолекулярные реакции.
	7.	Теория активных столкновений. Мономолекулярные реакции. Схема Линдемана. Поправка Хиншельвуда.
	8.	Теория активированного комплекса, статистический аспект.
	9.	Теория активированного комплекса, термодинамический аспект.
III.	11.	Гомогенный и гетерогенный катализ.
	12.	Ферментативный катализ. Уравнение Михаэлиса–Ментен.
IV.	13.	Активность электролитов, коэффициенты активности. Теория Дебая–Хюккеля.
	14.	Электропроводность растворов электролитов. Числа переноса.
V.	15.	Гальванический элемент. ЭДС, электродные потенциалы. Связь ЭДС с термодинамическими функциями.
	16.	Контрольная работа № 3.
VI.	17.	Кинетика электродных процессов.

### Лабораторные работы

№ раздела	№ ЛР	Наименование лабораторных работ
1	1	Определение энергии сгорания органического вещества. Расчет энтальпии образования
	2	Определение энтальпии растворения соли в воде в открытом калориметре
	3	Адиабатическая калориметрия
2	4	Определение энтальпии испарения и нормальной температуры кипения индивидуальных жидкостей
	5	Равновесие жидкость-пар в двухкомпонентных системах
	6	Равновесие конденсированных фаз в двухкомпонентных системах
3	7	Определение констант равновесия и других термодинамических характеристик реакций по спектральным данным
	8	Определение изотермы адсорбции по хроматографическим данным

	9	Определение теплоты адсорбции по хроматографическим данным
6	10	Гомогенно-каталитический гидролиз сложного эфира
	11	Математическое моделирование кинетики сложных реакций
7	12	Определение термодинамических и кинетических характеристик элементарных реакций на основании квантовомеханических расчетов
8	13	Ферментативное окисление иодид-ионов
	14	Гомогенно-каталитическое иодирование ацетона
	15	Гетерогенно-каталитическое разложение пероксида водорода
9	16	Электропроводность растворов электролитов
	17	Определение термодинамических характеристик химических реакций методом ЭДС
	18	Кинетические закономерности процессов электрохимической коррозии

### Вопросы и задания текущего, промежуточного и итогового контроля

#### **Первый закон термодинамики**

Предмет и метод термодинамики. Термодинамическая система, контрольная поверхность, среда. Термодинамические переменные и их классификации (внутренние, внешние, интенсивные, экстенсивные, обобщенные силы и обобщенные координаты и т. п.). Термодинамические процессы (обратимые, необратимые, самопроизвольные, несамопроизвольные). Теплота и работа. Функции состояния и функционалы. Постулат равновесия. Постулат существования температуры. Абсолютная температура. МПТШ. Уравнения состояния идеальных и реальных газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ. Критическая точка и критические параметры. Уравнение Бертелло. Теорема о соответственных состояниях и проблема индивидуальных постоянных в уравнениях состояния. Виральные уравнения состояния.

Первый закон термодинамики. Его формулировка и запись в дифференциальной и интегральной формах. Внутренняя энергия как термодинамическая функция и ее молекулярная интерпретация. Зависимость внутренней энергии от температуры и объема. Энтальпия как функция состояния. Вычисление работы для различных процессов в газах. Изохора, изотерма, изобара и адиабата. Взаимные превращения теплоты и работы. Калорические коэффициенты. Их определение и вычисление. Теплоты различных процессов. Теплоемкости. Их определение в общей физике и термодинамике. Эмпирические уравнения для зависимости теплоемкостей от температуры и их недостатки. Теплоемкости газов и кристаллических тел.

Термохимия. Теплоты химических реакций. Термохимические уравнения. Закон Гесса. Его формулировки и вывод из первого начала термодинамики для закрытых систем. Связь  $Q_P$  и  $Q_V$ . Теплоты сгорания и теплоты образования. Их использование для расчета теплот химических реакций. Расчеты теплот путем комбинирования термохимических уравнений. Расчеты теплот химических реакций с использованием таблиц термодинамических свойств индивидуальных веществ. Стандартное состояние и стандартные теплоты химических реакций. Зависимость теплот реакций от температуры. Уравнение Кирхгоффа в дифференциальной и интегральной формах.

#### **Второй закон термодинамики**

Второй закон термодинамики, его различные формулировки и их взаимосвязь. Энтропия как тепловая координата состояния и физическая величина. Уравнение Больцмана. Изменение энтропии при различных обратимых процессах и вычисление энтропии из опытных данных. Вычисление энтропии идеальных газов. Изменение энтропии при необратимых процессах. Неравенство Клаузиуса. Некомпенсированная теплота и «потерянная

работа».

Обоснования второго закона термодинамики. Коэффициент полезного действия тепловой машины. Лемма Карно. Цикл Карно в  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$  диаграммах. Теорема Карно–Клаузиуса и ее следствия. Определение энтропии по Клаузиусу. Абсолютная температура и термодинамическая шкала температур. Понятие о методе Каратеодори и сравнение двух способов обоснования второго закона термодинамики.

Тепловая теорема Нернста. Постулат Планка и область его применимости. Свойства тел вблизи абсолютного нуля. Абсолютные значения энтропии. Статистическое определение энтропии (качественное обсуждение без выводов).

Математический аппарат термодинамики. Фундаментальное уравнение Гиббса. Определение функций состояния  $F$ ,  $G$ ,  $\Phi$ . Запись для них фундаментальных уравнений. Соотношения Максвелла и вывод с их помощью уравнения Клапейрона–Клаузиуса. Вычисление calorических коэффициентов из уравнений состояния. Определение  $CP - CV$ : в Характеристические функции, их определение и свойства. Энергии Гельмгольца и Гиббса как характеристические функции. Условия равновесия и экстремумы характеристических функций. Уравнение Гиббса–Гельмгольца и его различные формы.

Химический потенциал. Его определение через производные от различных термодинамических функций и вычисление для идеального газа. Летучесть и ее вычисление для реальных газов. Использование летучести для определения химического потенциала реальных газов. Равновесие в поле внешних сил.

### **Растворы и фазовые равновесия**

Растворы в различных агрегатных состояниях. Единицы концентрации. Смеси идеальных газов и свойства идеальных газовых растворов. Энтропия и энергия Гиббса для смеси идеальных газов. Различные выражения для химических потенциалов компонентов в смеси идеальных газов.

Общее определение идеальных растворов в любых агрегатных состояниях. Коллигативные свойства растворов. Эмпирические законы Рауля для давления пара, криоскопических и эбуллиоскопических эффектов и Вант-Гоффа для осмотического давления. Их термодинамический вывод.

Неидеальные растворы и их термодинамическое описание. Метод активностей Льюиса. Вычисление коэффициентов активностей по давлению пара компонентов раствора, по данным криоскопии и осмотическому давлению (для растворов неэлектролитов). Осмотический коэффициент растворителя и его опытное определение. Стандартные состояния для химического потенциала. Симметричная и несимметричная системы отсчета.

Функции смешения. Энтропия смешения идеальных растворов и использование решеточной модели для ее вычисления в статистической термодинамике. Избыточные функции.

Зависимость коэффициентов активности от температуры и давления.

Термодинамическая классификация растворов. Атермальные, регулярные, строго регулярные растворы и их свойства. Предельно разбавленные растворы. Эмпирические закономерности для коэффициентов активности.

Парциальные мольные величины и их определение из опытных данных. Уравнения Гиббса–Дюгема. Взаимосвязи парциальных мольных величин, вытекающие из уравнения Гиббса–Дюгема (на примере парциальных мольных объемов бинарного раствора  $H_2O$ – $C_2H_5OH$ ).

Правило фаз Гиббса. Определение фазы, компонента, числа степеней свободы. Вывод правила фаз и его применение для описания однокомпонентных систем на примере диаграмм состояния фосфора и воды в широком диапазоне давлений. Монотропия и энантиотропия. Бинарные системы с образованием эвтектики с твердыми растворами, с конгруэнтной и инконгруэнтной температурами плавления. Трехкомпонентные системы. Треугольник Гиббса.

Уравнение Клапейрона–Клаузиуса и фазовые переходы первого рода. Его применение к

процессам плавления, испарения и сублимации в однокомпонентных системах. Фазовые переходы второго рода. Уравнение Эренфеста.

Равновесие жидкость – пар в двухкомпонентных системах. Взаимосвязь составов пара и жидкости для идеальных и неидеальных растворов. Различные виды диаграмм состояния в координатах:  $P(x_i, y_i) - T_k(x_i, y_i) - x_i(y_i)$ . Азеотропные смеси и их свойства. Законы Гиббса–Коновалова.

### **Химические и адсорбционные равновесия**

Химическая переменная. Условия химического равновесия. Химическое равновесие при протекании одной реакции при постоянной температуре. Вывод закона действующих масс и его различных частных форм. Связь между разными константами равновесия. Изотерма химической реакции. Термодинамическое определение химического сродства. Термодинамические расчеты выхода продуктов реакции при протекании одной и нескольких химических реакций (образование NO из  $N_2$  и  $O_2$  без вывода).

Зависимость константы равновесия от температуры. Уравнение изобары Вант-Гоффа и его интегрирование. Расчеты констант химических равновесий с использованием таблиц стандартных значений термодинамических функций. Приведенная энергия Гиббса и ее использование при расчетах химических равновесий. Нетермохимическое определение теплот реакций. Принцип Ле Шателье–Брауна.

Расчеты выходов продуктов для неидеальных систем. Зависимость выхода от природы инертного растворителя.

Химические равновесия в гетерогенных системах с образованием и без образования твердых растворов (запись констант равновесия, примеры).

Адсорбционное равновесие. Определение адсорбции. Метод избытков. Адсорбционное уравнение Гиббса. Изотерма, изобара, изостера адсорбции, эмпирические уравнения изотерм адсорбции. Уравнение Лэнгмюра, его вывод и область применения. Вычисление параметров уравнения Лэнгмюра из опытных данных. Адсорбция смеси газов. Полимолекулярная адсорбция. Изотермы полимолекулярной адсорбции. Уравнение Бруннауэра–Эммета–Теллера и область его применимости. Использование метода БЭТ для оценки поверхности твердых тел. Газовая хроматография.

### **Статистическая термодинамика**

Термодинамические переменные как статистические средние величины. Основные понятия статистической физики. Фаза. Фазовые  $m$ - и  $G$ -пространства. Ансамбли систем. Среднее по времени и среднее по ансамблю. Функции распределения в  $G$ -пространстве.

Закон распределения Максвелла–Больцмана. Каноническое распределение Гиббса. Сумма по состояниям. Выражение для статистических аналогов термодинамических величин с помощью сумм по состояниям. Общие свойства канонической суммы по состояниям как статистической характеристической функции. Вычисление внутренней энергии, энергии Гельмгольца, энергии Гиббса и энтропии с помощью сумм по состояниям. Сумма по состояниям в целом и ее составляющие. Метод наибольшего слагаемого в сумме по состояниям. Формула Больцмана для энтропии.

Поступательная сумма по состояниям. Поступательная сумма по состояниям в классической и квантовой механике. Теорема равномерного распределения и ее применение в теории теплоемкостей. Энтропия одноатомного идеального газа. Формула Закура–Тетроде. Поступательные вклады в термодинамические функции идеальных газов. Парадокс Гиббса и его трактовка в статистической физике.

Колебательная сумма по состояниям. Модель «гармонический осциллятор» – «жесткий ротатор». Сумма по состояниям для гармонического осциллятора. Колебательные вклады в термодинамические функции газов и «замороженные» степени свободы. Статистические теории теплоемкостей кристаллических тел (качественное рассмотрение).

Вращательные функции по состояниям. Сумма по состояниям для жесткого ротатора.

Вращательные составляющие термодинамических функций идеальных газов.

Электронная сумма по состояниям и ее свойства. Электронная составляющая теплоемкости (на примере атома хлора).

Статистический расчет химического равновесия в идеальных газах. Статистическое выражение для констант химического равновесия. Обсуждение особенностей применимости статистических расчетов констант равновесия в идеальных газах.

Межмолекулярное взаимодействие и конфигурационный интеграл. Статистическая теория реальных газов и проблема уравнения состояния. Метод Урселла–Майер. Уравнение состояния в вириальной форме. Статистические расчеты вириальных коэффициентов. Теорема о соответственных состояниях и ее анализ в статистической термодинамике

### **Феноменологическая кинетика.**

Основные понятия и методы формальной кинетики. Экспериментальное определение скорости химической реакции в закрытой и открытой системах. Кинетический эксперимент и его описание. Кинетические уравнения и методы их изучения. Молекулярность и порядок реакции. Реакции постоянного и переменного порядков по различным компонентам (привести примеры). Методы определения порядка реакции. Исследование вида кинетического уравнения. Причины непостоянства порядка реакции и несовпадение порядков при их определении различными методами.

Постулаты формальной кинетики. Кинетический закон действующих масс и принцип независимости реакций, прямая и обратная кинетические задачи. Использование кинетического закона действующих масс при решении прямой кинетической задачи (привести примеры). Лимитирующие стадии сложных (последовательных) химических реакций. Зависимость константы скорости химической реакции от температуры. Уравнение Аррениуса, его опытная проверка и теоретическая трактовка. Энергия активации.

Скорости реакций первого порядка. Необратимая реакция первого порядка в закрытой системе. Методы определения константы скорости. Время полупревращения и среднее время жизни исходных молекул. Обратимая реакция первого порядка и определение ее кинетических параметров. Параллельные реакции первого порядка.

Необратимые реакции второго и третьего порядка и определение констант скорости из опытных данных. Время полупревращения. Реакции нулевого порядка и их механизмы. Сравнение скоростей реакций различных порядков.

Необратимые последовательные реакции первого порядка. Кинетическая задача о двухстадийной необратимой последовательной реакции первого порядка и ее решение. Точное и приближенное решения для концентрации промежуточного продукта. Метод стационарных, квазистационарных концентраций и область соответствия точного и приближенного решений. Метод квазиравновесных концентраций (привести примеры).

Неразветвленные цепные реакции. Атомы, свободные радикалы и их роль в качестве промежуточных продуктов реакции. Элементарные стадии цепных реакций и их общие кинетические схемы. Основные понятия кинетики цепных реакций. Длина цепи. Скорость темновой реакции образования  $\text{HBr}$ .

Разветвленные цепные реакции на примере взаимодействия кислорода с водородом. Особенности кинетики этой реакции, общее объяснение пределов воспламенения. Открытие радикала  $\text{HO}_2$ . Условия стационарного и нестационарного горения водорода. Метод квазистационарности Семенова. Кинетическая схема реакции окисления водорода. Положение первого предела воспламенения для  $\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Особенности реакции на первом пределе. Окисление водорода на втором пределе воспламенения. Положение двух пределов воспламенения и определение элементарных констант скорости. Третий предел воспламенения и тепловой взрыв.

Колебательные реакции. Качественное рассмотрение реакции Белоусова - Жаботинского.

Скорости реакций в открытых системах. Типы реакторов и их свойства. Скорость реакций в реакторе идеального вытеснения. Общее уравнение для стационарной скорости реакции

в реакторе идеального смешения. Определение порядка реакции. Скорости реакции первого порядка в реакторе идеального смешения (необратимая, обратимая и последовательная реакция ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ )). Определение констант скорости по стационарным концентрациям исходного вещества и продукта реакции.

### Теории химической кинетики. Фотохимия

Поверхности потенциальной энергии (ППЭ) для элементарных актов химических превращений, например, для трех атомов водорода. Определение пути реакции, энергетического барьера. Понятие активированного комплекса (или переходного состояния). Координата реакции. Энергии активации при центральном и нецентральном ударе взаимодействия атома и молекулы водорода. Динамика элементарного акта реакции как перемещение по ППЭ. История квантово-механических расчетов ППЭ: методы ЛЭП, ЛЭПС, «порядок связи – энергия связи».

Теория активированного комплекса (переходного состояния) – ТАК. Понятие активированного комплекса и его свойства. Истинная энергия активации элементарной реакции, энергия активации на ППЭ. Допущения, используемые при построении теории. Статистический вывод основного уравнения ТАК. Интерпретация стерического множителя. Опытная и истинная энергии активации и их взаимосвязь.

Термодинамический аспект основного уравнения теории активированного комплекса (переходного состояния). Определение скорости реакции в общем виде и запись основного соотношения. Свободная энергия и энтропия активации. Опытная и истинная энергии активации и их взаимосвязь. Интерпретация стерического множителя для газовых и жидкофазных реакций.

Теория активных соударений для бимолекулярных реакций. Уравнение Траутца - Льюиса. Элементарная и более строгая формулировки задачи. Фактор соударений. Стерический множитель. Сечение соударения. Энергия активации. Достоинства и недостатки теории активных соударений.

Константы скорости бимолекулярных процессов. Расчеты константы скорости по теории активированного комплекса и теории активных соударений. «Медленные» реакции и расчеты стерического множителя. Неадиабатические реакции. Гарпунные реакции. Бимолекулярные реакции в растворах, их стерические множители и энергии активации. Диффузия в растворах. Формула Смолуховского и диффузионная кинетика. Клеточный эффект и проблема зависимости скорости реакции от вязкости растворителя. Электростатические эффекты в растворах. Применение теории активированного комплекса и формула Бренстеда - Бьеррума.

Мономолекулярные реакции. Примеры реакций и определение понятия «мономолекулярный процесс». Кинетические параметры мономолекулярных реакций ( $\Delta S^\ddagger, E^\ddagger$ ). «Компенсационный эффект». Применение теории активированного комплекса к мономолекулярным реакциям. Области соответствия и несоответствия опытным данным. Применение теории активных соударений к описанию мономолекулярных реакций. Кинетические особенности мономолекулярных реакций и их описание схемой Линдемана. Недостаточность схемы Линдемана и ее современное изложение. Поправка Хиншельвуда и ее недостаточность. Поправка Касселя. Понятие о теории РРKM (качественно).

Тримолекулярные реакции. «Истинные» тримолекулярные процессы и реакции третьего порядка. Тримолекулярные реакции и их свойства. Реакции третьего порядка без тримолекулярных стадий. Отрицательный температурный коэффициент и его различные объяснения. Вычисление фактора соударений для тримолекулярных реакций.

Фотохимические процессы. Фотохимические реакции и их свойства. Потенциальные кривые и свойства молекул в электронно-возбужденных состояниях. Роль триплетных состояний. Эксимеры и эксиплексы. Кинетические постоянные элементарных процессов фотохимии (термализации, пересольватации, флуоресценции, фосфоресценции, фотосенсибилизации и т. п.).

Кинетика фотохимических реакций. Фотохимические реакции и параметры элементарных первичных процессов. Законы фотохимической эквивалентности. «Двухквантовые процессы». Кинетическая схема Штерна - Фольмера как пример определения элементарных констант из опытных фотохимических данных

### **Катализ**

Основные понятия и применения катализа, определения и классификации. Основные механизмы каталитических реакций: переносный, активационный, координационный. Вакер-процесс; механизм Косси для реакции Циглера - Натта. Каталитические реакции основных процессов химической технологии и нефтехимии.

Ферментативный катализ. Общие определения и понятия. Активность ферментов. Уравнение Михаэлиса - Ментен и определение кинетических параметров из опытных данных. Кинетика каталитических реакций с конкурентным ингибированием. Эффективная константа Михаэлиса. Определение константы ингибирования из опытных кинетических данных.

Кислотно-основной катализ. Классификация реакций кислотно-основного катализа. Твердые кислоты как катализаторы. Свойства цеолитов как кислотно-основных катализаторов. Кинетика реакций общего кислотного и общего основного катализа. Механизмы реакций и лимитирующие стадии. Кинетические уравнения и определение элементарных констант из опытных данных. Уравнение Бренстеда и его следствия.

Корреляционные соотношения между теплотами и энергиями активации, между свободными энергиями реакций и свободными энергиями активации различных процессов.

Кинетика реакций специфического кислотного катализа. Механизмы реакций и лимитирующие стадии процесса. Функция кислотности Гаммета и ее применение в кинетике. Кинетические уравнения для реакций кислотного катализа. Сверхкислоты, супероснования и их свойства. Свойства «жестких» и «мягких» кислот Льюиса.

Гетерогенный катализ. Кинетический закон действующих масс для гетерогенных процессов и особенности записи константы равновесия для реакции на поверхности раздела фаз. Кинетика Лэнгмюра - Хиншельвуда для реакции на однородной поверхности катализатора. Эффективные энергии активации гетерогенных процессов. Сравнение уравнений Михаэлиса - Ментен и Лэнгмюра - Хиншельвуда.

Кинетика гетерогенно-каталитических реакций с диффузионными ограничениями. Различные макрокинетические режимы реакции. Внешняя диффузия. Метод равнодоступной поверхности. Внутренняя диффузия и диффузионное торможение. Влияние размера гранул и диаметра пор катализатора (без вывода).

Кинетика реакций во внутренней диффузионной области. Кинетическая задача Зельдовича - Тиле и ее решение для реакции первого порядка. Параметр Тиле и оценка кинетического режима реакций. Фактор диффузионного торможения. Энергия активации и порядок реакции в кинетической и внутридиффузионной области.

Теория мультиплетов Баландина. Принцип геометрического соответствия. Принцип энергетического соответствия. Современные представления о механизмах гетерогенных реакций гидрирования.

Нанесенные катализаторы и понятие о теории ансамблей Кобозева

### **Теория растворов электролитов. Электропроводность. Диффузия**

Основные положения теории Аррениуса. Закон разведения Оствальда. Ион-дипольное взаимодействие в растворах электролитов. Энергии кристаллической решетки и сольватации ионов. Уравнения Борна и Борна - Бьеррума.

Ион-ионное взаимодействие в растворах электролитов. Теория Дебая - Хюккеля: понятие

ионной атмосферы, вывод формулы для потенциала ионной атмосферы в растворе 1,1-валентного электролита, ограничения теории Дебая - Хюккеля. Первое и второе приближения теории Дебая - Хюккеля для расчета коэффициентов активности. Связь среднего коэффициента активности с коэффициентами активности отдельных ионов. Современные представления о теории растворов сильных электролитов.

Электропроводность растворов электролитов: удельная, эквивалентная и молярная электропроводности, определение подвижности отдельных ионов, первоначальная и современная формулировки закона Кольрауша.

Числа переноса, их зависимость от концентрации раствора. Методы определения чисел переноса.

Теория электропроводности растворов сильных электролитов: электрофоретический и релаксационный эффекты; эффекты Вина и Дебая - Фалькенгагена; зависимость эквивалентной электропроводности раствора от концентрации. Уравнение Дебая - Хюккеля - Онзагера.

Процессы диффузии и миграции в растворах электролитов: основные законы и уравнения диффузии; диффузионный потенциал. Вывод формулы для диффузионного потенциала на границе двух растворов одного и того же 1,1-валентного электролита.

Кондуктометрический метод и его возможности: методика измерения электропроводности растворов электролитов; кондуктометрическое определение константы диссоциации и произведения растворимости; кондуктометрия в химическом анализе.

### **ЭДС и термодинамика электрохимических цепей**

Разности потенциалов в электрохимических системах: понятия внешнего, внутреннего и поверхностных потенциалов; разности потенциалов Вольта и Гальвани; потенциал нулевого заряда и методы его определения.

Электрохимический потенциал. Условия равновесия на границе электрода с раствором и в электрохимической цепи. Уравнение Нернста.

Относительные и стандартные электродные потенциалы. Расчет ЭДС с помощью таблиц стандартных потенциалов.

Классификация электродов и электрохимических цепей: электроды 1-го, 2-го и 3-го рода; окислительно-восстановительные и ион-селективные электроды; физические, химические и концентрационные цепи.

Термодинамика гальванического элемента. Применение уравнения Гиббса - Гельмгольца к электрохимическим системам. Определение методом ЭДС энергии Гиббса, энтальпии и энтропии химической реакции; коэффициентов активности и чисел переноса.

### **Двойной электрический слой. Кинетика электродных процессов**

Электрокапиллярные явления. Основное уравнение электрокапиллярности – уравнение Липпмана. Методы изучения двойного электрического слоя: электрокапиллярный метод, его возможности и ограничения; определение потенциала нулевого заряда и заряда электрода методом измерения емкости двойного слоя; сущность адсорбционного метода изучения двойного слоя. Модельные представления о двойном электрическом слое: вывод уравнения для заряда электрода в теории Гуи - Чапмена; модели Штерна и Грэма.

Стадийный характер электродных процессов. Лимитирующие стадии в электрохимических реакциях. Понятия поляризации электрода и тока обмена.

Диффузионная кинетика электродных процессов: три основных уравнения диффузионной кинетики, вывод уравнения поляризационной кривой для реакции типа  $O + ne = R$ . Сущность полярографического метода. Вывод уравнения полярографической волны. Уравне-

ние Ильковича.

Основы теории замедленного разряда: вывод основного уравнения теории Батлера - Фольмера; уравнение Тафеля; соотношения Бренстеда в электрохимической кинетике и его обоснование.

Экспериментальная проверка теории замедленного разряда: влияние двойного электрического слоя на скорость электровосстановления ионов  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ; влияние природы металла на скорость стадии разряда - ионизации.

Электрохимическая теория коррозии: сопряженные электрохимические реакции; стационарный (коррозионный) потенциал и ток саморастворения металла; методы заш

**Задачи по курсу «Электрохимия»** представлены на сайте  
<http://www.elch.chem.msu.ru/rus/prg4.htm>

### Основная литература

1. Полтораки О.М. "Термодинамика в физической химии" Высшая школа, 1991
2. Еремин Е.Н. "Основы химической термодинамики" Высшая школа, 1974
3. Эткинс П., де Паула Дж. "Физическая химия", Мир, 2007
4. Еремин Е.Н. «Основы химической кинетики в газах и растворах»
5. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. «Курс химической кинетики»
6. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия. М.: Колосс-Химия, 2006.
7. Экспериментальные методы химии высоких энергий / Под ред. М.Я. Мельникова М.: МГУ, 2009

### Полезные книги. Термодинамика

1. Мюнстер А. «Химическая термодинамика» 1971 (Есть более позднее издание). Только равновесная феноменологическая термодинамика (первые 14 лекций). Довольно трудная книга, многие разделы не входят в нашу программу, но некоторые места полезно прочесть: Глава 1, параграфы 3,4; Глава 3, параграфы 19-21; Глава 5, параграфы 37, 38. Особенно важна Глава 3. Здесь последовательно описано построение аппарата химической термодинамики. Поможет разобраться в лекции 5, а это ключевая лекция!
2. Герасимов Я.И. и другие. «Курс Физической химии» т.1,2  
Толстая, подробная книга! Можно использовать для справок, можно взять и в качестве основной. Для этого семестра нужен первый том. Здесь нет термодинамики необратимых процессов (одна лекция) и статистической термодинамики (девять-десять лекций). Впрочем, во втором томе есть раздел "Основы молекулярно-кинетической теории", где выведены формулы Максвелла-Больцмана (одна лекция по статистической термодинамике).
3. Смирнова Н.А. «Методы статистической термодинамики в физической химии». 1982.  
Здесь можно посмотреть всю статистическую термодинамику. Целиком книгу читать необязательно. Нужны главы 3 (особенно параграфы 9,10,11), глава 4 (особенно параграфы 1-3, 6,8), глава 9, 11,12,14.

4. Лопаткин А.А. "Теоретические основы физической адсорбции", изд. МГУ, 1983. В курсе всего одна лекция по термодинамике адсорбции. Посмотрите главы 1 (особенно параграф 1) и главу 3 (особенно параграф 13).

5. Пригожин И., Кондепуди Д. "Современная термодинамика", изд. Мир, 2002. Эффектная книжка. Изложена вся феноменологическая термодинамика + термодинамика необратимых процессов. Статистики нет. Рекомендую главу 4, разделы 15 (прочитать!), 16 (особенно 16.1., 16.2), 17 (особенно 17.2). Там речь идет о неравновесной термодинамике. Осторожно! Есть ошибки в формулах.

#### **Полезные книги. Кинетика**

1. Герасимов Я.И. и другие. «Курс Физической химии» т. 2  
Книгу можно использовать для справок, можно взять и в качестве основной.
2. Глестон С., Лейдлер К., Эйринг Г. Теория абсолютных скоростей реакций.  
В книге прекрасно изложены теории химической кинетики, в особенности Теория Активированного Комплекса. Для начала можно прочесть раздел «Введение» и параграфы «Теория абсолютных скоростей реакций» и «Термодинамика скоростей реакций» в главе 4.
3. Эткинс П. «Физическая химия».  
См. комментарий в разделе Осенний семестр/Книги.
4. Пригожин И., Кондепуди Д. «Современная термодинамика».  
Для нас интересны главы 9, 19, раздел 16.5.
5. Новаковская Ю.В. Теория скорости химического превращения. Части I,II.  
Трудная книжка! В части I полезно посмотреть вывод уравнения Траутца-Льюиса (разделы 2.1 и 2.2 главы II). В части II описаны модели Линдемана и Хиншельвуда (разделы 2,3 главы III).

#### **Интернет-ресурсы**

ИВТАНТЕРМО <http://www.ihed.ras.ru>, <http://www.chem.msu.su/rus/handbook/ivtan/> .  
NIST <http://www.nist.gov>

Ссылка, по которой можно скачать некоторые учебные пособия по физической химии  
<http://review3d.ru/klassicheskij-universitetskij-uchebnik-eremin-v-v-kargov-s-i-uspenskaya-i-a-kuzmenko-n-e-lunin-v-v-osnovy-fizicheskoy-ximii-teoriya-i-zadachi>

#### **Сетевой ресурс поддержки образовательного процесса**

Методические указания к практическим занятиям расположены на сайте  
<http://www.chem.msu.su/rus/teaching/phys.html>

Методические указания к курсовым работам и самостоятельной работе расположены на сайте <http://www.chem.msu.su/rus/teaching/korobov/kursova.html>

Для поддержки курса создан сайт «Курс физической химии» на портале professorjournal.ru <http://korobov.professorjournal.ru>. На сайте находятся программы курса и коллоквиумов, полный набор конспектов лекций, лекционные презентации, вопросы к экзаменам, допол-

нительный материал для подготовки к семинарам, коллоквиумам и экзаменам, размещаются объявления, работает форум.

Учебно-методический материал по электрохимии представлен на сайте кафедры электрохимии по адресу  
[www.elch.chem.msu.ru](http://www.elch.chem.msu.ru)