

“СОГЛАСОВАНО”

Ректор *УрГУ*

_____ /Бугров Д.В. /

“СОГЛАСОВАНО”

Директор ГИНФО

_____ /Алексеев К.П./

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников
высшей школы по направлению
“ Нанотехнологии”
на базе учебного курса
«Сорбционный метод исследования удельной поверхности
и пористой структуры наноразмерных систем»

Цель: изучение теоретических основ и получение навыков экспериментального исследования на современном оборудовании применения адсорбционных методов для определения удельной поверхности и пористости наноразмерных материалов.

Категория слушателей: научные и научно-педагогические кадры высшей школы

Примерный срок обучения: 36 часов

Форма обучения: с частичным отрывом от работы, дистанционно - очная

Режим занятий: 8 часов в день

Целью курса является овладение теоретическими основами применения адсорбционных методов для определения удельной поверхности и пористости наноразмерных, высокодисперсных материалов и пористых твердых тел, и получение навыков экспериментального исследования адсорбционных процессов на современном оборудовании с целью определения параметров пористой структуры и удельной поверхности наноразмерных материалов.

Требования к уровню освоения учебного курса

Преподаватели должны:

- Знать: современные теоретические представления в области адсорбционных явлений и процессов, возможности использования методов изучения адсорбции на границе твердое тело – газ для определения дисперсности, параметров пористой структуры и удельной поверхности наноразмерных материалов.
- Иметь навыки экспериментального исследования адсорбционных процессов на современном оборудовании.
- Иметь представление о возможностях, ограничениях и недостатках современных теоретических подходов к оценке величин дисперсности, удельной поверхности и пористости и способов экспериментального измерения этих параметров.

Научные работники должны

- Знать: теоретические основы явлений адсорбции на границе твердое тело – газ, возможности использования адсорбционных методов для определения удельной поверхности, дисперсности и пористости наноразмерных материалов.

- Иметь навыки экспериментального исследования адсорбционных процессов на современном оборудовании: автоматическом газо-адсорбционном анализаторе поверхности и пористости TriStar 3020».
- Иметь представление о возможностях, ограничениях и недостатках современных теоретических подходов и способов измерения величин дисперсности, удельной поверхности и пористости.

1. Задачи изучения дистанционных и очных частей курса.

Задачами изучения дистанционной части курса являются: рассмотрение явления физической адсорбции на различных системах в зависимости от их химической природы и характера пористой структуры; анализ характерных типов изотерм адсорбции; описание существующих теоретических подходов к явлению адсорбции; изложение методов, позволяющих надежно и достаточно просто определить характеристики пористой структуры и поверхности наноразмерных систем.

Дистанционная часть курса включает в себя 5 лекций по следующим темам:

Лекция №1. Введение. Физическая адсорбция. Адсорбционные силы. Классификация твердых тел.

Лекция №2. Определение удельной поверхности твердых тел.

Лекция №3. Анализ изотерм сорбции. Стандартные изотермы. Сравнительные графики.

Лекция №4. Адсорбция в мезопорах. Оценка распределения пор по размерам.

Лекция №5. Оценка микропористости. Использование адсорбции газов для определения удельной поверхности и распределения пор по размерам.

Задачей очной части курса является получение навыков экспериментального исследования адсорбционных процессов на современном оборудовании. С этой целью будет выполняться лабораторная работа «Измерение удельной поверхности и параметров пористой структуры наноразмерных материалов с помощью автоматического газо-адсорбционного анализатора TriStar 3020» Лабораторная работа ставит своей целью обучение слушателей работе на автоматическом анализаторе поверхности и пористости TriStar 3020 производства Micromeritics (США) и получение характеристик пористости и поверхности наноматериалов.

2. Реферативное описание содержания лекций.

Лекция 1. Введение. Физическая адсорбция. Адсорбционные силы. Классификация твердых тел.

Основные понятия и определения.. Весовой и объемный методы определения количества адсорбированного (сорбированного) вещества на поверхности твердого тела. Изотермы, изобары, изостеры, изопикны адсорбции. Типы изотерм адсорбции по классификации С. Брунауэра, Л.Деминга, У. Деминга. Адсорбционные силы. Специфическая и неспецифическая адсорбция. Реальные твердые тела. Энергетическая и геометрическая неоднородность твердой поверхности. Пористые и непористые тела с большой удельной поверхностью. Внешняя и внутренняя поверхности твердого тела. Типы адсорбентов и адсорбатов по классификации Киселева. Пористая структура твердого тела и механизм сорбции.

Лекция 2. Определение удельной поверхности твердых тел

Удельная поверхность твердого тела ($S_{уд}$). Соотношения между удельной поверхностью и размером частиц твердых тел разной структуры. Связь величины $S_{уд}$ с емкостью монослоя. Теория мономолекулярной адсорбции Лангмюра. Предпосылки теории. Вывод уравнения адсорбции. Линейная форма уравнения Лангмюра. Определение констант уравнения. Расчет величины удельной поверхности из адсорбционных данных с помощью уравнения Лангмюра. Теория полимолекулярной адсорбции Брунауэра, Эмметта, Теллера (БЭТ). Предпосылки теории. Математическая основа теории БЭТ.

Вывод уравнения адсорбции. Физический смысл константы C . Уравнение БЭТ в линейной форме. Приложение уравнения к экспериментальным данным. Определение удельной поверхности твердого тела методом БЭТ. Требования к адсорбатам для определения величины удельной поверхности методом БЭТ. Проверка надежности определения емкости монослоя по ур.БЭТ. Условия, необходимые для успешного применения метода БЭТ. Точка Б на изотерме адсорбции. Метод определения величины $S_{уд}$ по одной точке.

Лекция 3. Анализ изотерм адсорбции. Стандартные изотермы. Сравнительные графики.

Стандартные изотермы адсорбции. Критерии выбора стандартных изотерм. Анализ изотерм адсорбции с помощью t -графиков: кривые зависимости величины адсорбции от толщины адсорбционной пленки. Расчет величины удельной поверхности по t -граммам. Влияние микро - и мезопористости на форму t -графиков. Анализ изотерм адсорбции с помощью a_s -графиков. Нормализованная величина адсорбции. Отклонения от линейности a_s -графиков. Преимущества a_s -графиков. Оценка величины удельной поверхности по a_s -граммам. Анализ изотерм адсорбции с помощью сравнительных графиков. Сравнение изотерм адсорбции на данном твердом теле и эталоне с помощью f -графиков. Источники погрешностей в определении удельной поверхности из адсорбционных данных. Точность определения удельной поверхности по адсорбционным данным. Требования к определению удельной поверхности из адсорбционных данных по методу БЭТ. Значения константы C , необходимые для получения корректных результатов по методу БЭТ. Причины широкого использования адсорбции азота для определения удельной поверхности. Возможности применения других адсорбатов.

Лекция 4. Адсорбция в мезопорах. Оценка распределения пор по размерам.

Классификация пор по размерам, предложенная Дубининым. Классификация сорбентов по виду изотерм сорбции, предложенная Киселевым. Взаимосвязь механизма заполнения пор с видом изотерм сорбции. Анализ изотерм сорбции IV типа. Капиллярная конденсация в мезопорах. Уравнение Томсона (Кельвина), связывающее давление пара жидкости с радиусом кривизны ее поверхности. Его вывод. Соотношение между радиусом кривизны и размером пор. Радиусы пор и радиусы «кор». Адсорбционная пленка на стенках пор. Использование уравнения Кельвина для расчета распределения пор по размерам. Интервал применимости уравнения Кельвина. Правило Гурвича о предельном объеме адсорбированного вещества. Сорбционный гистерезис, его причины. Причины использования десорбционной ветви изотермы для расчета распределения пор по размерам. Учет двоякой природы десорбируемого адсорбата. при расчете распределения пор по размерам. Методы вычисления распределения пор по размерам, учитывающие толщину адсорбционной пленки на стенках пор.

Лекция 5. Оценка мезопористости материала по адсорбционным данным. Практические рекомендации по использованию адсорбции газов для определения удельной поверхности и распределения пор по размерам

Механизм адсорбции в микропорах. Анализ вида изотерм на микропористых адсорбентах. Влияние развитой внешней поверхности и наличия мезопор на форму изотерм адсорбции. Оценка мезопористости из изотермы адсорбции. Оценка объема микропор с помощью a_s -графиков. Использование t -графиков для определения объема микропор. Теория адсорбции в микропорах Дубинина-Радушкевича. Уравнение Дубинина-Радушкевича. Линейная форма уравнения. Его графическая зависимость. Расчет суммарного объема микропор по уравнению Дубинина-Радушкевича.

Выбор адсорбтива для изучения адсорбции. Выбор экспериментального метода. Откачка адсорбента. Условия измерения изотермы адсорбции. Обратимость и воспроизводимость изотерм. Тип изотермы и тип петли гистерезиса. Анализ с помощью метода БЭТ. Оценка распределения мезопор по размерам. Оценка мезопористости.

3. Количество часов, отводимых на дистанционные и очные части курса

Учебный курс «Сорбционный метод исследования удельной поверхности и пористой структуры наноразмерных систем» включает в себя:

а) дистанционную часть –

- освоение лекционного курса в дистанционном режиме – 10 часов
- самостоятельная работа – 6 часов
- подготовка к выполнению лабораторной работы – 2 часа

б) очную часть –

- лабораторная работа «Измерение удельной поверхности и параметров пористой структуры наноразмерных материалов с помощью автоматического газо-адсорбционного анализатора TriStar 3020» с написанием отчета – 18 часов.

4. Методические рекомендации по реализации учебной программы

Для понимания важности изучаемого курса следует иметь в виду, что одной из важнейших характеристик наноразмерных систем является степень дисперсности, то есть характерный размер структур, образующих данный материал. Со степенью дисперсности связана величина удельной поверхности наноматериала – межфазной поверхности всех образующих наноматериал структурных элементов в единице массы образца. Величина доступной поверхности составляет определенную долю общей удельной поверхности и зависит от пористости материала. Удельная поверхность и параметры пористой структуры – радиусы пор и распределение пор по размерам - определяют целевые свойства материалов. Поэтому экспериментальные методы измерения степени дисперсности наноматериала, оценки размеров составляющих его отдельных частиц и характера пористой структуры занимают центральное место при характеристике любого наноматериала как в исследовательской практике, так и в нанотехнологии.

Необходимо подчеркнуть, что изучение адсорбции газов твердыми телами может дать ценную информацию об их удельной поверхности и пористой структуре. Существуют теоретические подходы к явлению адсорбции и методы, позволяющие надежно и достаточно просто определить характеристики пористой структуры и поверхности наноразмерных и других высокодисперсных материалов. Они будут рассмотрены в материале лекций. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте www.nanoobr.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются вопросы для самопроверки и контрольные вопросы.

Для получения навыков экспериментального исследования адсорбционных процессов будет выполняться лабораторная работа «Измерение удельной поверхности и параметров пористой структуры наноразмерных материалов с помощью автоматического газо-адсорбционного анализатора поверхности и пористости TriStar 3020» Лабораторная работа ставит своей целью обучение слушателей работе и получение характеристик пористости и поверхности наноматериалов. Для успешного выполнения лабораторного практикума необходимо детальное изучение описания лабораторной работы.

4.1. Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится 18 и 18 часа. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте www.nanoobr.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы для самопроверки части учебного курса «Сорбционный метод исследования удельной поверхности и пористой структуры наноразмерных систем

Вопросы к лекции 1.

1. Изотерма адсорбции - это
- А. Зависимость объема адсорбата от давления.
 - Б. Зависимость количества адсорбированного вещества от его давления.
 - В. Зависимость количества адсорбированного вещества от температуры.
 - Г. Зависимость давления адсорбата от температуры.

Ответ

2. Неспецифическая адсорбция обусловлена следующими силами притяжения между адсорбентом и адсорбатом
- А. Водородные связи
 - Б. Кулоновские силы.
 - В. Дисперсионное взаимодействие.
 - Г. Отсутствие сил притяжения

Ответ

3. Удельная поверхность твердого тела
- А. Является суммой размеров составляющих его частиц
 - Б. Обратно пропорциональна размеру составляющих его части.
 - В. Прямо пропорциональна размеру составляющих его частиц
 - Г. Не связана с размером составляющих его частиц.

Ответ

4. Какую форму имеют изотермы физической адсорбции на поверхности активированного угля, имеющего поры радиусом 1.5 нм
- | | |
|---------------|-------------------|
| А. S-образную | Б. Параболическую |
| В. Линейную | Г. Г-образную |

Ответ

5. Для каких сорбентов наблюдается сорбционный гистерезис
- | | |
|------------------|-----------------|
| А. Микропористые | Б. Мезопористые |
| В. Макропористые | Г. Для всех |
| Д. Ни для каких | |

Ответ

Вопросы к лекции 2

1. Физический смысл константы a_{∞} в уравнении Лангмюра
- А. Адсорбционный потенциал
 - Б. Адсорбционный объем
 - В. Предельное количество адсорбированного вещества

Г. Площадь одной молекулы
Д. . Нет среди перечисленных

Ответ

2. Какие предпосылки лежат в основе теории БЭТ

- А. Мономолекулярная адсорбция Б.. Полималекулярная адсорбция
В.. Наличие капиллярной конденсации Г.. Наличие микропор
Д.. Химические силы между адсорбентом и адсорбатом

Ответ

3. Изотерма адсорбции в координатах уравнения БЭТ имеет вид

- А. S – образный Б. Г – образный
В. Линейный Г.Параболический

Ответ

4.. Физический смысл константы a_{∞} в уравнении БЭТ

- А. Адсорбционный потенциал Б. Адсорбционный объем
В. Емкость монослоя. Г. Площадь одной молекулы.

Ответ

5. Как можно рассчитать удельную поверхность адсорбента сорбционным методом

- А.. По ур. Дубинина – Радужкевича Б.. По ур. БЭТ
В.. По теории Поляни Г.. По ур. Томсона-Кельвина

Ответ

Вопросы к лекции 3.

1. Отклонение t-графика от прямолинейности имеет следующую причину:

- А. Наличие пор в структуре твердого тела
Б. Увеличение энергии взаимодействия адсорбент – адсорбат.
В, Полималекулярный характер адсорбции.
Г. Увеличение толщины адсорбционного слоя.

Ответ

2. t-график представляет собой зависимость

- А. $a = f(p / p_s)$ Б. $a = f\left(\frac{a}{a_{\infty}} d\right)$
В. $\frac{a}{a_{\infty}} = f(p / p_s)$ Г. $S_{уд} = f(a_{\infty})$

Ответ

3. Преимуществом использования a_s -графика для определения $S_{уд}$ образцов является

- А. Отсутствие необходимости измерять $S_{уд}$ эталона.
Б. Возможность использовать разные адсорбаты.
В. Возможность определять $S_{уд}$ по 1 точке изотермы.
Г. Возможность определять $S_{уд}$ без проведения эксперимента.

Ответ

4.Причина широкого использования азота в качестве адсорбата для определения $S_{уд}$ это

- А. Возможность образования поверхностных соединений.
Б. Большой размер молекулы N_2 .
В. Непостоянство величины ω для разных адсорбентов.
Г. Оптимальная величина константы С.

Ответ

5. Источником погрешности при определении $S_{уд}$ не является
- А. Разные условия обезгаживания адсорбентов.
 - Б. Колебания температуры в процессе адсорбции.
 - В. Нестабильная величина внешнего давления.
 - Г. Нестабильная величина давления насыщенного пара адсорбата.

Ответ

Вопросы к лекции 4.

1. В соответствии с ур. Томсона (Кельвина) давление пара над вогнутым мениском p связано с давлением насыщенного пара p_s соотношением

А. $p > p_s$ Б. $p < p_s$ В. $p = p_s$ Г. $p = p_s = 0$

Ответ

2. Как влияет увеличение давления на заполнение пор при капиллярной конденсации
- А. Приводит к заполнению более тонких пор
 - Б. Приводит к заполнению более крупных пор
 - В. По разному в зависимости от интервала давлений
 - Г. Не влияет

Ответ

3. Адсорбционный гистерезис – это
- А. Отставание изотермы адсорбции от изотермы десорбции.
 - Б. Отставание изотермы десорбции от изотермы адсорбции.
 - В. Различие в величинах $S_{уд}$, определенных по изотермам адсорбции и десорбции.
 - Г. Различие в величинах a_{∞} , определенных по изотермам адсорбции и десорбции.

Ответ

При каких условиях происходит капиллярная конденсация в мезопорах

- А. При условии смачивания поверхности адсорбатом
- Б. При условии несмачивания поверхности адсорбатом
- В. По разному в зависимости от интервала давлений
- Г. Не зависит от смачивания

Ответ

5. Кора – это

- А. То же, что пора.
- Б. Часть поры, незанятая молекулами адсорбата.
- В. Пора, заполненная сконденсированным адсорбатом.
- Г. Пора, стенки которой покрыты адсорбционной пленкой.

Ответ

Вопросы к лекции 5.

1. Механизм адсорбции в микропорах – это
- А. Капиллярная конденсация.
 - Б. Объемное заполнение пор.
 - В. Мономолекулярная адсорбция.
 - Г. Полимолекулярная адсорбция.

Ответ

2. Заполнение микропор происходит преимущественно
- А. При низких давлениях пара адсорбата
 - Б. При высоких давлениях пара адсорбата.
 - В. Не заполняются ни при каких давлениях.
 - Г. Заполнение микропор не зависит от давления.

Ответ

3. Для каких сорбентов можно определять суммарный объем пор, используя ур. Дубинина – Радушкевича
- А. Микропористые
 - Б. Мезопористые
 - В. Макропористые
 - Г. Для всех
 - Д. Ни для каких

Ответ

4. Теория адсорбции в микропорах Дубинина-Радушкевича описывает изотерму, имеющую следующий вид
- А. Кривая с сорбционным гистерезисом.
 - Б. Кривая с насыщением.
 - В. S –образная кривая.
 - Г. Прямолинейная зависимость.

Ответ

5. Для определения микропор молекулярных размеров следует использовать
- А. Адсорбцию бензола.
 - Б. Расчет по ур. Лангмюра.
 - В. Расчет по ур. Томсона (Кельвина).
 - Г. Метод молекулярных щупов.

Ответ

Контрольные вопросы

Лекция 1.

1. Дайте определение понятий «адсорбция», «адсорбат», «адсорбтив», «адсорбент».
2. Укажите принципы весового и объемного методов определения количества адсорбированного (сорбированного) вещества.
3. Опишите типы изотерм адсорбции по классификации С. Брунауэра, Л. Деминга, У. Деминга.
4. Охарактеризуйте адсорбционные силы, действующие на границе твердое тело – газ.
5. Назовите различия специфической и неспецифической адсорбции.
6. Охарактеризуйте реальные твердые тела с точки зрения энергетической и геометрической неоднородности твердой поверхности.
7. Охарактеризуйте типы адсорбентов и адсорбатов по классификации Киселева.
8. Рассмотрите соотношения между удельной поверхностью $S_{уд}$ и размером частиц твердых тел разной структуры.

Лекция 2

1. Рассмотрите связь величины $S_{уд}$ с емкостью монослоя.
2. Охарактеризуйте предпосылки теории мономолекулярной адсорбции Лангмюра.
3. Выведите уравнение адсорбции Лангмюра. Преобразуйте уравнение в линейную форму. Укажите способ определения константы уравнения.

4. Рассмотрите способ расчета величины удельной поверхности из адсорбционных данных с помощью уравнения Лангмюра.
5. Выведите уравнение адсорбции теории Брунауэра, Эмметта, Теллера (БЭТ).
6. Преобразуйте уравнение БЭТ в линейную форму. Покажите приложение уравнения к экспериментальным данным.
7. Опишите определение удельной поверхности твердого тела методом БЭТ.
8. Каковы требования к адсорбатам для определения величины удельной поверхности методом БЭТ.
9. Охарактеризуйте условия, необходимые для успешного применения метода БЭТ.
10. Опишите метод определения величины $S_{уд}$ по одной точке изотермы адсорбции.

Лекция 3

1. Дайте описание стандартных изотерм адсорбции. Укажите критерии выбора стандартных изотерм.
2. Проанализируйте t -графики как кривые зависимости величины адсорбции от толщины адсорбционной пленки.
3. Опишите расчет величины удельной поверхности по t -граммам.
4. Рассмотрите влияние микро- и мезопористости на форму t -графиков.
5. Проанализируйте a_s -графики, способы оценки величины удельной поверхности по a_s -граммам, преимущества a_s -графиков.
6. Опишите анализ изотерм адсорбции с помощью сравнительных графиков.
7. Проведите сравнение изотерм адсорбции на данном твердом теле и эталоне с помощью f -графиков.
8. Укажите источники погрешностей в определении удельной поверхности из адсорбционных данных.
9. Назовите требования к определению удельной поверхности из адсорбционных данных по методу БЭТ.
10. Рассмотрите причины широкого использования адсорбции азота для определения удельной поверхности. Возможности применения других адсорбатов.

Лекция 4

1. Рассмотрите взаимосвязь механизма заполнения пор с видом изотерм сорбции.
2. Проведите анализ изотерм сорбции IV типа.
3. Укажите причины капиллярной конденсации в мезопорах.
4. Проанализируйте уравнение Томсона (Кельвина), связывающее давление пара жидкости с радиусом кривизны ее поверхности, применительно к процессу адсорбции.
5. Покажите связь радиусов пор и радиусов «кор» и роль адсорбционной пленки на стенках пор.
6. Опишите возможность использования уравнения Кельвина для расчета распределения пор по размерам. Оцените интервал применимости уравнения Кельвина.
7. Охарактеризуйте причины сорбционного гистерезиса и использования десорбционной ветви изотермы для расчета распределения пор по размерам.
8. Охарактеризуйте методы вычисления распределения пор по размерам, учитывающие толщину адсорбционной пленки на стенках пор.

Лекция 5

1. Рассмотрите механизм адсорбции в микропорах и вид изотерм на микропористых адсорбентах.
2. Охарактеризуйте влияние развитой внешней поверхности и наличия мезопор на форму изотерм.
3. Оцените возможность определения микропористости из изотермы адсорбции.

4. рассмотрите способ оценки объема микропор с помощью a_s -графиков.
5. Покажите возможность использования t -графиков для определения объема микропор.
6. Рассмотрите теорию адсорбции в микропорах Дубинина-Радушкевича и расчет суммарного объема микропор по этой теории.
7. Проанализируйте условия выбора адсорбтива для оценки параметров пористой структуры и удельной поверхности.
8. Рассмотрите потенциальную возможность различных ошибок при получении изотермы адсорбции.
9. Охарактеризуйте условия анализа изотермы адсорбции с помощью метода БЭТ, возможности оценки распределения мезопор по размерам и оценки микропористости образца по изотерме адсорбции.

Контрольные вопросы к курсу «Сорбционный метод исследования удельной поверхности пористой структуры наноразмерных систем»

1. Особенности ультрадисперсных (наноразмерных) систем. Роль поверхности в таких системах.
2. Адсорбция в границе раздела твердое тело – газ. Особенности процесса. Методы определения количества адсорбированного вещества.
3. Принципы весового и объемного методов определения количества адсорбированного (сорбированного) вещества. Единицы измерения количества адсорбированного газа или пара на твердой поверхности.
4. Изотермы, изобары, изостеры, изопикны адсорбции. Виды графических зависимостей.
5. Типы изотерм адсорбции по классификации С. Брунауэра, Л.Деминга, У. Деминга.
6. Адсорбционные силы. Специфическая и неспецифическая адсорбция. Типы адсорбентов и адсорбатов по классификации Киселева.
7. Реальные твердые тела. Энергетическая и геометрическая неоднородность твердой поверхности.
8. Внешняя и внутренняя поверхности твердого тела. Пористые и непористые тела с большой удельной поверхностью.
9. Удельная поверхность твердого тела ($S_{уд}$). Соотношения между удельной поверхностью и размером частиц твердых тел разной структуры. Связь величины $S_{уд}$ с емкостью монослоя.
10. Теория мономолекулярной адсорбции Лангмюра. Предпосылки теории. Вывод уравнения адсорбции. Линейная форма уравнения Лангмюра. Определение констант уравнения. Расчет величины удельной поверхности из адсорбционных данных с помощью уравнения Лангмюра.
11. Теория мономолекулярной адсорбции Ленгмюра. Возможности и недостатки теории.
12. Теория полимолекулярной адсорбции Брунауэра, Эмметта, Теллера (БЭТ). Вывод уравнения адсорбции.
13. Теория полимолекулярной адсорбции Брунауэра, Эмметта, Теллера (БЭТ). Уравнение БЭТ в линейной форме. Приложение уравнения к экспериментальным данным. Определение удельной поверхности твердого тела методом БЭТ.
14. Определение величины удельной поверхности методом БЭТ. Требования к адсорбатам.
15. Определение величины удельной поверхности методом БЭТ Проверка надежности определения емкости монослоя по ур. БЭТ.
16. Условия, применения метода БЭТ для определения величины удельной поверхности твердых тел.

17. Метод определения величины удельной поверхности по одной точке на изотерме адсорбции.
18. Использование стандартных изотерм адсорбции для анализа адсорбционных данных. Критерии выбора стандартных изотерм.
19. Анализ изотерм адсорбции с помощью t -графиков: кривые зависимости величины адсорбции от толщины адсорбционной пленки. Расчет величины удельной поверхности по t -графикам. Влияние микро - и мезопористости на форму t -графиков.
20. Анализ изотерм адсорбции с помощью a_s -графиков. Нормализованная величина адсорбции. Отклонения от линейности a_s -графиков. Преимущества a_s -графиков.
21. Оценка величины удельной поверхности по a_s -графикам. Преимущества a_s -графиков.
22. Анализ изотерм адсорбции с помощью сравнительных графиков. Сравнение изотерм адсорбции на данном твердом теле и эталоне с помощью f -графиков.
23. Точность определения удельной поверхности по адсорбционным данным. Источники погрешностей.
24. Требования к определению удельной поверхности из адсорбционных данных по методу БЭТ. Выбор адсорбтивов в соответствии со значениями константы C уравнения БЭТ.
25. Требования к определению удельной поверхности из адсорбционных данных по методу БЭТ. Выбор адсорбата. Азот как наиболее широко используемый адсорбат для определения удельной поверхности. Возможности применения других адсорбатов.
26. Классификация пор по размерам, предложенная Дубининым. Механизмы сорбции газов и паров пористыми твердыми телами. Влияние размера пор.
27. Классификация пор по размерам Дубинина. Взаимосвязь механизма заполнения пор с видом изотерм сорбции.
28. Классификация сорбентов по виду изотерм сорбции, предложенная Киселевым. Анализ изотерм сорбции IV типа.
29. Изотермы сорбции мезопористых сорбентов. Механизм процесса адсорбции в мезопорах. Капиллярная конденсация в мезопорах.
30. Уравнение Томсона (Кельвина), связывающее давление пара жидкости с радиусом кривизны ее поверхности. Вывод уравнения.
31. Расчет распределения пор по размерам с помощью уравнения Кельвина. Соотношение между радиусом кривизны мениска и размером пор. Радиусы пор и радиусы «кор». Адсорбционная пленка на стенках пор.
32. Использование уравнения Кельвина для расчета распределения пор по размерам. Интервал применимости уравнения Кельвина.
33. Адсорбция в мезопорах. Механизм процесса. Предельный объем адсорбированного вещества. Правило Гурвича.
34. Сорбционно-десорбционный гистерезис, его причины. Использование десорбционной ветви изотермы для расчета распределения пор по размерам.
35. Адсорбция в мезопорах. Расчет распределения пор по размерам по изотерме десорбции. Учет двойственной природы десорбируемого адсорбата и толщины адсорбционной пленки на стенках пор.
36. Методы вычисления распределения пор по размерам, учитывающие толщину адсорбционной пленки на стенках пор.
37. Анализ вида изотерм на микропористых адсорбентах. Механизм адсорбции в микропорах. Оценка объема микропор из адсорбционных данных.
38. Изотермы адсорбции на микропористых адсорбентах. Влияние развитой внешней поверхности и наличия мезопор на форму изотерм. Оценка микропористости из изотермы адсорбции.

39. Адсорбция на микропористых адсорбентах Вид изотерм. Оценка объема микропор с помощью a_s -графиков.
40. Адсорбция на микропористых адсорбентах Влияние микро- и мезопористости на форму t -графиков.
41. Адсорбция на микропористых адсорбентах Использование t -графиков для определения объема микропор.
42. Теория адсорбции в микропорах Дубинина-Радушкевича. Уравнение Дубинина-Радушкевича и его анализ.
43. Адсорбция на микропористых адсорбентах Использование уравнения Дубинина-Радушкевича для расчета суммарного объема микропор.
44. Условия применения адсорбции газов для оценки параметров пористой структуры и удельной поверхности. Выбор адсорбтива. Способы подготовки адсорбента.
45. Условия применения адсорбции газов для оценки параметров пористой структуры и удельной поверхности. Весовой и объемный методы получения изотермы адсорбции.
46. Условия измерения изотермы адсорбции. Источники экспериментальных погрешностей. Необходимость проверки воспроизводимости изотерм.
47. Условия применения адсорбции газов для оценки параметров пористой структуры и удельной поверхности. Анализ типа изотермы и петли гистерезиса.
48. Условия анализа изотермы адсорбции с помощью метода БЭТ.
49. Условия применения адсорбции газов для оценки параметров пористой структуры и удельной поверхности. Определение возможности оценки распределения мезопор по размерам.
50. Условия применения адсорбции газов для оценки параметров пористой структуры и удельной поверхности. Оценка микропористости образца по изотерме адсорбции.

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса на базе экспериментальных результатов и их обработки с применением знаний из дистанционной части курса.

Темы контрольных рефератов по курсу
«Сорбционный метод исследования удельной поверхности и пористой структуры наноразмерных систем»

1. Экспериментальные методы изучения адсорбции газов и паров на твердых поверхностях. Виды изотерм. Связь формы изотермы сорбции со структурой адсорбента.
2. Размерные эффекты в ультрадисперсных системах. Влияние дисперсности на свойства наноразмерных систем.
3. Применение сорбционного метода к изучению полимерных наноразмерных систем.
4. Физическая адсорбция мезопористыми твердыми телами. Теоретические основы применения уравнения Кельвина для описания адсорбции.
5. Физическая адсорбция микропористыми твердыми телами. Анализ изотерм. Возможности оценки параметров пористой структуры.

4.2. Учебно-тематический план курса

«Сорбционный метод исследования удельной поверхности и пористой структуры наноразмерных систем»

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час	В том числе			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы.	Очный практикум.	
1.	Сорбционный метод исследования удельной поверхности и пористой структуры наноразмерных систем	36	10	6	Подготовка к лабораторной работе – 2 ч.	1. Вопросы для самоподготовки 2. Контрольные вопросы
1.	Лекция №1. Введение. Физическая адсорбция. Адсорбционные силы. Классификация твердых тел.		2 ч.	1.2	Лабораторная работа «Оценка удельной поверхности и параметров пористой структуры наноразмерных материалов с помощью автоматического газоадсорбционного анализатора TriStar 3020» – 18 часов.	
2.	Лекция №2. Определение удельной поверхности твердых тел.		2 ч.	1.2		
3.	Лекция №3. Анализ изотерм сорбции. Стандартные изо-термы. Сравнительные графики.		2 ч.	1.2		
4.	Лекция №4. Адсорбция в мезопорах. Оценка распределения пор по размерам		2 ч.	1.2		
5.	Лекция №5. Оценка микропористости материала по адсорбционным данным. Практические рекомендации по использованию адсорбции газов для определения удельной поверхности и распределения пор по размерам.	2 ч.	1.2			
Итоговый контроль			1. Вопросы для самоподготовки	2. Контрольные вопросы (электронная зачетка)	Отчет о лабораторной работе	Реферат

4.3. Литература

Основная

1. С.Грег.К.Синг Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М., Мир,1984.

2. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М., Мир, 1979.
3. Сергеев Г.Б. Нанохимия. Учебное пособие. М., КДУ. 2006.
4. Сергеев Г.Б. Нанохимия. М., изд. МГУ, 2003
5. А.А.Малыгин. Химия поверхности и нанотехнология: взаимосвязь и перспективы. СОЖ. 2004г. Т.8, N 1, С.32.
6. Экспериментальные методы в адсорбции и газовой хроматографии. Под. ред. А.В.Киселева, В.П.Древинга. М., изд-во МГУ, 1983.
7. Брунауэр С. Адсорбция газов и паров. М., ИЛ, 1948.
8. Межфазная граница газ – твердое тело. Под. Ред. Э.Флада. М., «Мир». 1970.

Дополнительная.

1. Гусев А.И. Нанометриалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М: ФИЗМТЛИТ, 2005. – 416 с.
2. В.М.Смирнов. Химия наноструктур. Синтез, строение, свойства. СПб, СПбГУ, 1996.
3. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. М., Наука. 1978.
4. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М., Наука. 1985.
5. Современные физические методы исследования полимеров.//Под.ред. Г.Л.Слонимского.М.: химия.1982.

Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса на сайте www.nanoobr.ru