

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Исполнительный директор
программы развития,
руководитель научно-
исследовательской политики
Г.Н. Суворов
« 25 » мая 2026 г.



ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ФИЗИЧЕСКАЯ АДСОРБЦИЯ И ТЕКСТУРА КАТАЛИЗАТОРОВ
Научная специальность 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

1. Паспорт оценочных материалов по дисциплине

<i>№ n/n</i>	<i>Темы дисциплины (модуля) / Разделы (этапы) практики* в ходе текущего контроля, вид промежуточной аттестации (зачет, с указанием семестра)</i>	<i>Код и содержание компетенции</i>	<i>Оценочные материалы (виды и количество)</i>
1	2	3	4
1.	Введение в физическую адсорбцию и текстуру катализаторов	ПК-1 - способность к использованию профильно - специализированных знаний в области физической химии, катализа, тепло- и массопереноса, теории каталитических реакторов для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов, и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности; ПК-2 - применять фундаментальные знания в области физической адсорбции для решения научных и практических задач, возникающих при создании ресурсо- и энергосберегающих технологий и аппаратов на основе адсорбционных процессов; ПК-3 - способность к использованию профильно-специализированных знаний в области приготовления катализаторов, адсорбентов и носителей для решения задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов, и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности	Устный опрос
2.	Основные модели и теории физической адсорбции		Расчетная работа № 1
3.	Пористая структура катализаторов и адсорбентов: классификация и характеристика		Расчетная работа № 2
4.	Методы исследования текстуры и площади поверхности		Аналитическая справка
5.	Адсорбция на плоской и искривленной поверхности		Устный опрос
6.	Капиллярные явления в пористых материалах		Расчетная работа № 3
7.	Механизмы формирования пористой структуры катализаторов и адсорбентов		Кейс-задание
8.	Практические аспекты лабораторных исследований физической адсорбции и текстуры катализаторов		Исследовательский проект
9.	Дифференцированный зачет (4 семестр)		Вопросы к зачету

2. Виды и характеристика оценочных средств

Устный опрос – классический метод текущего или итогового контроля знаний, при котором аспирант отвечает на вопросы преподавателя, демонстрируя глубину понимания предмета, умение логически мыслить и аргументировать свою позицию

Аналитическая справка – структурированный документ, в котором систематизированы данные по определённой теме или проблеме, сделаны выводы и даны рекомендации на основе анализа собранной информации.

Расчетная работа – это совокупность нескольких задач по определенной тематике, решение которых покажет полноту усвоения теоретического материала того раздела рабочей программы, по которому выполняется расчетная работа. Это может быть также и одна задача комплексного характера, так и сочетание расчетных задач и заданий.

Кейс-задание (англ. case – случай, ситуация) – это детальное описание проблемной ситуации, которая требует анализа, исследования и поиска решения. Обычно оно строится на реальных фактах или максимально приближено к реальным обстоятельствам.

Исследовательский проект – особый тип учебной деятельности, направленный на развитие исследовательских и аналитических компетенций аспирантов, критического и теоретического мышления, навыков работы с информацией, академического письма.

Дифференцированный зачет - зачет проводится в форме собеседования по заранее определенным вопросам. Собеседование имеет целью выявление уровня освоения дисциплины, характеризующего знания обучающегося в соответствии с определенными компетенциями.

3. Оценочные средства

Тема 1. Введение в физическую адсорбцию и текстуру катализаторов.

Вопросы для самоконтроля:

1. Определите понятие «адсорбция по Гиббсу».
2. Почему адсорбционное уравнение Гиббса имеет универсальный характер и не зависит от индивидуальности контактирующих фаз?
3. Почему формы изотерм различны для различных систем?
4. В каких случаях адсорбция по Гиббсу совпадает с полным содержанием адсорбата в адсорбционном слое?
5. Принципы классификации катализаторов
6. Текстуальные свойства носителей и массивных катализаторов, их зависимость от условий приготовления. Представления об оптимальной пористой структуре катализатора.
7. Основные проблемы катализа. Цели и задачи научных основ приготовления катализаторов.
8. Современные тенденции в области развития методов синтеза нанесенных катализаторов.

Тема 2. Основные модели и теории физической адсорбции.

Расчетная работа № 1 (пример)

По экспериментальным данным рассчитать удельную поверхность адсорбента по изотерме адсорбции бензола на его поверхности. Построить изотерму адсорбции в координатах линейной формы уравнения БЭТ. Площадь, занимаемая молекулой бензола, $S_0 = 49 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$.

Экспериментальные данные выдает преподаватель.

Тема 3. Пористая структура катализаторов и адсорбентов: классификация и характеристика.

Расчетная работа № 2 (пример)

По экспериментальным данным адсорбции бензола на графитированной термической саже (ГТС) построить три изотермы адсорбции при $T = 293 \text{ К}$, $T = 303 \text{ К}$, $T = 313 \text{ К}$. Рассчитать константы уравнения Лэнгмюра и удельную поверхность адсорбента, интегральную теплоту адсорбции, дифференциальную теплоту адсорбции (для $A = 0,005 \text{ моль/кг}$; $A = 0,01 \text{ моль/кг}$; $A = 0,015 \text{ моль/кг}$).

Экспериментальные данные выдает преподаватель.

Вопросы для самоконтроля:

1. Классификация пористых адсорбентов по значениям диаметра пор. Основные свойства пористых адсорбентов.
2. Почему в мезопористых адсорбентах, заполненных жидким адсорбатом, образуются мениски?
3. Оксид алюминия в катализе. Физико-химические свойства. Получение различных оксидов алюминия дегидратацией гидрата, байерита и псевдобемита. Способы регулирования текстурных свойств и химического состояния поверхности.

4. Углеродные носители в катализе. Их физико-химические свойства, основные методы получения и регулирования химического состояния поверхности.

5. Силикагель и его физико-химические свойства.

6. Почему решетчатая модель адсорбента применима к описанию адсорбции газов на цеолитах?

7. Основные этапы получения массивных катализаторов методом осаждения. Химические подходы и технологические приёмы осаждения.

8. Основные характеристики нанесенных катализаторов, их зависимость от условий приготовления.

Тема 4. Методы исследования текстуры и площади поверхности.

Аналитическая справка должна содержать систематизированные данные по основным лабораторным и инструментальным методам анализа текстуры катализаторов, является непосредственной подготовкой к исследовательскому проекту см. тема 8.

Тема 5. Адсорбция на плоской и искривленной поверхности.

Вопросы для самоконтроля:

1. Механизмы адсорбции соединений металлов на поверхности оксидных и углеродных носителей. Прогнозирование адсорбционных свойств носителей в отношении растворённых предшественников катализаторов.

2. Основные механизмы изменения удельной поверхности при приготовлении катализаторов (по В.Б. Фенелонову).

3. Опишите простейший подход к описанию адсорбции на неоднородных поверхностях.

4. При каких условиях адсорбция на неоднородной поверхности может быть описана уравнением Темкина и уравнением Фрейндлиха?

Тема 6. Капиллярные явления в пористых материалах.

Расчетная работа № 3 (пример)

По экспериментальным данным сорбции адсорбата «А» на адсорбенте «В» при $T = 293\text{ К}$ построить кривую капиллярной конденсации. Показать наличие гистерезиса и, используя ветвь десорбции, построить интегральную и дифференциальную кривые распределения пор по радиусам.

А – вода, гексан, метиловый спирт, гептан и пр.

В – силикагель, активированный уголь, оксид алюминия и пр.

Экспериментальные данные выдает преподаватель.

Тема 7. Механизмы формирования пористой структуры катализаторов и адсорбентов.

Кейсы для решения (примеры)

Кейс № 1

Приготовление катализатора состоит в пропитке гранул носителя по влагоёмкости раствором соли с последующей “быстрой” сушкой и восстановлением до металла. Принцип “быстрой” сушки заключается в настолько быстром испарении растворителя, что перераспределение жидкости в порах носителя, вызываемое капиллярными силами, практически отсутствует (например, когда раствор достаточно вязкий). При этом кристаллизация соли происходит непосредственно во фронте испарения, и её диффузионным переносом внутрь пор, заполненных менее концентрированным раствором, можно пренебречь. В порах кристаллизация соли из пересыщенного раствора протекает преимущественно на её преадасорбированных молекулах, т.е. на поверхности носителя.

В рамках указанной методики готовили палладиевый катализатор гидрирования нитроароматических соединений. Эта реакция структурно-чувствительная, и наиболее активные катализаторы содержат частицы металла размером 3.5 нм. Экспериментатор приготовил катализатор с содержанием палладия 20%(вес.), но размер его частиц оказался 5 нм. Каково должно быть весовое содержание металла, чтобы получить оптимальный катализатор?

Носитель считать однородно-пористым, эффектом спекания активного компонента на стадии восстановления пренебречь.

Кейс № 2

При получении Al_2O_3 осаждают гиббсит $\text{Al}(\text{OH})_3$ в присутствии низкоструктурной сажи, а полученный композиционный материал промывают и сушат, получая образец с объёмом мезопор $0,2 \text{ см}^3/\text{г}$.

Затем его прокаливают на воздухе, постепенно доводя температуру до 600°C , в результате чего формируется мезопористый $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, а частицы сажи на заключительном этапе выгорают, образуя систему макропор в Al_2O_3 .

Каково должно быть весовое соотношение взятых сажи и нитрата алюминия $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$, если требуется получить Al_2O_3 , в котором объёмы крупных и мелких пор равны? Каков при этом суммарный объём пор на единицу массы Al_2O_3 ?

Считать сажевые глобулы непористыми с истинной плотностью $\rho_c = 2,0 \text{ г/см}^3$, а их удельная поверхность $S = 10 \text{ м}^2/\text{г}$. Истинная плотность частиц гиббсита равна $2,38 \text{ г/см}^3$, а у частиц $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ равна $3,33 \text{ г/см}^3$.

Усадкой или набуханием композита при термообработке пренебречь.

Кейс № 3

На поверхность частиц никеля в катализаторе 30%(вес) Ni/SiO_2 необходимо адсорбировать модификатор – Bi – исходя из атомного отношения $\text{Bi/Ni}_s = 1/5$ (Ni_s – поверхностный атом никеля, доступный для хемосорбции).

Сколько граммов ацетата висмута $\text{Bi}(\text{OAc})_3$ (содержание основного компонента – 94,9%) необходимо взять, чтобы модифицировать висмутом 5 г катализатора, при условии, что некоторая часть $\text{Bi}(\text{OAc})_3$ необратимо сорбируется на носителе?

Поверхность SiO_2 составляет $100 \text{ м}^2/\text{г}$, а её ёмкость по $\text{Bi}(\text{OAc})_3$ – $0,44 \text{ мг/м}^2$.

Нанесённый никель представляет собой полусферические частицы размером 6 нм, его дисперсность равна 0,18 (доля атомов, доступных для хемосорбции реагентов), плотность никеля $8,91 \text{ г/см}^3$, атомный вес Ni – 58,7, Bi – 209.

Кейс № 4

При осаждении на поверхность инертной пористой матрицы каталитически активного компонента (сокращённо – АК) происходит рост его частиц на некоторых поверхностных центрах, причём их количество не изменяется с увеличением массы наносимого АК. При каком процентном содержании АК будет получен катализатор с максимальной активной поверхностью на единицу веса катализатора?

Частицы АК считать кубическими, а блокировкой их поверхности в порах и стерическими затруднениями для их роста пренебречь.

Кейс № 5

Оценить, как и во сколько раз может измениться прочность на раздавливание пористого тела корпускулярной структуры при уменьшении размеров составляющих его частиц в N раз (согласно теории Ребиндера-Щукина).

Считать, что упаковка этих частиц – плотная, а поверхность контакта между соседними частицами мало зависит от их размеров.

Вопросы для самоконтроля:

1. Механизмы дезактивации катализаторов. Основные подходы к увеличению срока службы катализаторов.

2. Типы распределения активного компонента по зерну носителя в нанесённых катализаторах. Причины возникновения его неравномерного распределения при получении адсорбционно-пропиточных катализаторов.

3. Получение многокомпонентных катализаторов методом механического смешения. Способы интенсификации процесса смешения. Механохимический синтез.

4. Основные синтетические пористые оксидные материалы. Сравнение их физико-химических свойств. Сферы их применения в катализе.

5. Закономерности формирования активного компонента в катализаторах, получаемых методом пропитки. Однократная и многократная пропитки

Тема 8. Практические аспекты лабораторных исследований физической адсорбции и текстуры катализаторов.

Исследовательский проект

Цель: развитие способности прогнозировать, проектировать, моделировать.

Требования к выполнению задания:

1) Первый этап – поиск научной литературы о природе (фазовом и химическом составе, морфологии частиц) катализаторов, использующихся в интересующем каталитическом процессе, методах их приготовления, физико-химических закономерностях формирования активного компонента (или носителей), состоянии активного компонента (структура активных центров, её взаимосвязь с фазовым и химическим составом, кристаллохимией поверхности, с функциональными группами поверхности катализатора, распределение этих центров в порах или по зерну катализатора и др.) в конечном катализаторе, способам модификации свойств и активации катализаторов, причинам дезактивации в процессе эксплуатации и борьбе с ней.

2) Второй этап – оформление научно-технического отчета (систематизация и обобщение полученных литературных и экспериментальных данных).

Научно-технический отчет должен состоять из следующих частей: введение, объект исследования, цель работы, методы или методология проведения работы, литературный обзор, результаты работы, область применения результатов, значимость работы, прогнозные предположения о развитии объекта исследования.

Объем работы рекомендуется ограничивать 15-20 страницами машинописного текста (шрифт – 12 ppr, интервал – 1.5 ppr). Работа должна быть оформлена с использованием ПК в текстовом редакторе Word и набором химических формул в любом из графических редакторов – ISIS Draw, ChemDraw, ChemSketch и др., графики оформляются с использованием программного обеспечения OriginLab или аналог.

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Физическая и химическая адсорбция, количественные способы выражения величины адсорбции.

2. Влияние взаимодействия «адсорбат/адсорбент» и «адсорбат/адсорбат» на форму изотермы адсорбции. Простейшие уравнения изотермы адсорбции, учитывающие вклад «адсорбат/адсорбат».

3. Влияние формы изотермы адсорбции на профиль фронта в динамике адсорбции.

4. Основные положения теории мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра. Уравнение мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра.

5. Эмпирическое уравнение адсорбции Фрейндлиха. Расчет констант в уравнении Фрейндлиха.

6. Основные положения теории полимолекулярной адсорбции Поляни. Адсорбционный потенциал.

7. Суть сравнительного метода анализа изотерм адсорбции. Три основных типа сравнительных графиков.

8. Основные положения теории полимолекулярной адсорбции БЭТ, ограничения. Уравнение полимолекулярной адсорбции БЭТ.

9. Адсорбция на пористых сорбентах. Классификация пористых сорбентов.

10. Методы измерения активной (парциальной) поверхности компонентов катализатора.

11. Обосновать главные стадии в приготовлении нанесенных катализаторов с адсорбцией и без адсорбции наносимого компонента.

12. В чём заключается роль пористой структуры катализаторов в катализе?

13. Теория объемного заполнения микропор.

14. Установите взаимосвязь между средними размерами пор и частиц.

15. Как пористость плотной случайной упаковки монодисперсных шаров зависит от их размера и истинной плотности материала?

16. Какие геометрические факторы влияют на размер пор в корпускулярных системах?
17. Капиллярная конденсация на пористых сорбентах, гистерезис и причины проявления.
18. Понятие о кривизне поверхности. Физический смысл эффектов и основные соотношения.
19. Виды массопереноса при сушке пористых тел.
20. Основные механизмы спекания активных частиц нанесенных катализаторов.
21. Основные типы радиального распределения активных компонентов нанесенных катализаторов и способы управления ими
22. Принципиальные механизмы формирования пироуглерода и сажи.
23. Объемные изменения при твердофазных превращениях. Следствия эффекта изменения объема твердой фазы при твердофазных превращениях
24. Приготовление нанесенных катализаторов. Стадия высокотемпературной обработки и механизмы спекания.
25. Механизмы формирования структуры каталитического волокнистого углерода.
26. Получение пористых углеродных материалов традиционными методами.