

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.



**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
АДСОРБЕНТОВ И КАТАЛИЗАТОРОВ**

Рабочая программа
для обучающихся по научной специальности
2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий
форма обучения (очная)

Загоруйко А.Н., Григорьев М.В., Тиссен Е.А. Физико-химические основы приготовления адсорбентов и катализаторов. Рабочая программа для обучающихся по научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий, форма обучения (очная). Тюмень, 2026.

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями ФГТ к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, утверждены приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 20 октября 2021 г., № 951.

Рабочая программа дисциплины (модуля) «Физико-химические основы приготовления адсорбентов и катализаторов» опубликована на сайте ТюмГУ: [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

1. Цели и задачи освоения дисциплины

Цель изучения дисциплины «Физико-химические основы приготовления адсорбентов и катализаторов» – формирование у обучающихся углубленных профессиональных знаний в области современных и классических методов синтеза, модификации и термической обработки катализаторов и адсорбентов, и готовности к самостоятельной научно-исследовательской и технологической деятельности. Задачей изучения данной дисциплины является систематизация знаний об этапах и методах приготовления катализаторов, физико-химических свойствах исходных веществ, типах и роли носителей, принципах осаждения, механического смешения и нанесения активных компонентов, а также о термической обработке и нетрадиционных подходах к синтезу, необходимых для решения задач в профессиональной сфере.

2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

ПК-1 - способность к использованию профильно-специализированных знаний в области этапов и методов приготовления катализаторов, включая современные и классические подходы к синтезу, модификации, подготовке исходных веществ, для решения научных и практических задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов в химической и смежных отраслях промышленности;

ПК-2 - применять фундаментальные знания о типах и свойствах носителей катализаторов, методах их получения и модификации, а также физико-химические принципы процессов осаждения, термической обработки и механического смешения для решения задач, возникающих при создании ресурсо- и энергосберегающих технологий на основе каталитических и адсорбционных процессов;

ПК-3 - способность к использованию профильно-специализированных знаний в области методов нанесения активных компонентов, нетрадиционных (инновационных) подходов к синтезу катализаторов и адсорбентов, а также физико-химических процессов, протекающих при их получении, для решения задач, возникающих при изучении и создании ресурсо- и энергосберегающих процессов в химической и смежных отраслях промышленности.

В результате освоения дисциплины «Процессы и аппараты химических технологий» обучающихся по направлениям подготовки 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий обучающийся должен:

Знать:

- Этапы и методы приготовления катализаторов: последовательность этапов получения катализаторов, современные и классические методы их синтеза и модификации.
- Подготовка и синтез исходных веществ: физико-химические свойства исходных компонентов, методы их очистки, смешения и подготовки к синтезу катализаторов и адсорбентов.
- Носители для катализаторов: типы и свойства носителей, роль носителя в катализе, методы получения и модификации носителей для катализаторов и адсорбентов.
- Методы осаждения: принципы получения катализаторов и адсорбентов методом осаждения, влияние параметров процесса на структурно-фазовые характеристики продукта.
- Термическая обработка катализаторов: физико-химические основы термических процессов, влияние температуры и режимов обработки на формирование структуры и активности катализаторов.
- Механическое смешение: подходы и технологии приготовления катализаторов методом механического смешения, влияние дисперсности и однородности на конечные свойства материала.
- Методы нанесения активных компонентов: основы физико-химии процессов нанесения, выбор условий для получения однородных покрытий, формирование активной поверхности.
- Нетрадиционные подходы к приготовлению катализаторов: современные инновационные методы синтеза и модификации катализаторов и адсорбентов, оценка их эффективности и применимости.

Уметь:

- Проводить подготовку и синтез исходных веществ для приготовления катализаторов и адсорбентов;
- Применять различные методы приготовления катализаторов, включая осаждение, механическое смешение и нанесение активных компонентов;

- Оценивать качества и характеристики носителей для катализаторов, анализировать их влияние на свойства конечного продукта;
- Осуществлять термическую обработку катализаторов, подбирать оптимальные режимы для формирования требуемых структур;
- Анализировать физико-химические процессы, протекающие при получении катализаторов и адсорбентов;
- Применять фундаментальные знания по физической адсорбции для решения научных и практических задач

Таблица 1

4. Система оценивания

Оценка «отлично» выставляется обучающемуся, который дает полный, развернутый ответ на все поставленные вопросы, раскрывает основные положения темы. Обучающийся показывает умение выделить существенные и несущественные признаки, причинно-следственные связи в процессах приготовления катализаторов и адсорбентов. В ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий, методов и физико-химических явлений. Ответ излагается литературным языком с использованием научных терминов.

В ответе должна быть отражена физико-химическая картина описываемых процессов: аспирант должен знать этапы и методы приготовления катализаторов (осаждение, пропитка, механическое смешение, нанесение активных компонентов), физико-химические основы термической обработки, типы и свойства носителей, методы анализа пористой структуры и текстурных характеристик, а также нетрадиционные (инновационные) методы синтеза. Обучающийся должен уметь анализировать влияние параметров процесса на структурно-фазовые характеристики продукта, подбирать оптимальные режимы термической обработки, обосновывать выбор метода приготовления для получения катализатора с заданными свойствами, а также

демонстрировать способность к масштабированию лабораторных процессов и оценке их технологической эффективности. Обучающийся свободно владеет навыками интерпретации экспериментальных данных и может предложить пути внедрения инновационных методов в существующие технологические схемы.

Оценка «хорошо» выставляется обучающемуся, который дает верный ответ на поставленные вопросы, раскрывает основные положения темы; показывает умение выделить существенные и несущественные признаки, причинно-следственные связи в процессах приготовления катализаторов и адсорбентов. Однако в ответе не прослеживается четкая структура, логическая последовательность, ответ излагается недостаточно грамотно. Обучающийся демонстрирует знание основных этапов и методов приготовления катализаторов, но испытывает затруднения при анализе влияния параметров процесса на структурно-фазовые характеристики или при обосновании выбора оптимальных режимов обработки. Допускает незначительные ошибки в терминологии, которые исправляет при дополнительных вопросах преподавателя.

Оценка «удовлетворительно» выставляется обучающемуся, который дает неполный ответ на поставленные вопросы, раскрывает не все основные положения темы. Обучающийся показывает недостаточное умение выделять существенные признаки и причинно-следственные связи в процессах приготовления катализаторов и адсорбентов. В ответе не прослеживается четкая структура, логическая последовательность, ответ излагается недостаточно грамотно. Обучающийся знает отдельные методы приготовления катализаторов и типы носителей, но не может проанализировать их влияние на свойства конечного продукта. Затрудняется в подборе оптимальных режимов термической обработки и не демонстрирует способности к масштабированию процессов. Допускает существенные ошибки в терминологии и физико-химической интерпретации процессов.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется обучающемуся, который дает неполный ответ, представляющий собой разрозненные знания по теме вопроса с существенными ошибками в определениях. В ответе присутствует фрагментарность, нелогичность изложения; обучающийся не осознает связь между методами приготовления, свойствами носителей и активностью катализатора. Отсутствуют выводы, конкретизация и доказательность изложения. Речь неграмотная, научная терминология не используется или используется некорректно. Дополнительные и уточняющие вопросы преподавателя не приводят к коррекции ответа обучаемого не только на поставленный вопрос, но и на другие вопросы дисциплины, либо обучающийся отказывается от ответа. Обучающийся не демонстрирует понимания физико-химических основ приготовления катализаторов и адсорбентов, не владеет методами анализа свойств и не способен применять полученные знания для решения научных и практических задач.

5. Содержание дисциплины

5.1. Тематический план дисциплины

Таблица 2

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины (модуля), час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Иные виды контактной работы
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1	Введение в физико- химические основы приготовления катализаторов и адсорбентов. Классификация	2	2	0	0	0

	и основные характеристик и					
2	Подготовка и синтез исходных веществ. Носители катализаторов: свойства, методы получения и модификации	2	2	0	0	0
3	Методы нанесения активных компонентов на носители: физико-химические подходы	2	2	0	0	0
4	Термическая обработка и нетрадиционные методы приготовления катализаторов и адсорбентов	2	2	0	0	0
5	Аналитические методы исследования свойств катализаторов и адсорбентов	2	2	0	0	0
6	Масштабирование процессов приготовления. Практические аспекты внедрения катализаторов и адсорбентов	2	2	0	0	0
7	Анализ примеров классификации и характеристик катализаторов/адсорбентов	2	0	2	0	0
8	Расчётные задачи по подготовке исходных веществ и	2	0	2	0	0

	получению носителей					
9	Моделирование процессов нанесения активных компонентов на носители	2	0	2	0	0
10	Оценка влияния термической обработки и нетрадиционных методов на свойства	2	0	2	0	0
11	Исследование свойств методами анализа, вопросы масштабирования и внедрения. Представление результатов	2	0	2	0	0
12	Дифференцированный зачет	36	0	0	0	36
	Итого (часов)	58	12	10	0	36

5.2. Содержание дисциплины по темам

Тема 1. Введение в физико-химические основы приготовления катализаторов и адсорбентов. Классификация и основные характеристики

Рассматриваются цели, задачи и междисциплинарные связи дисциплины, актуальность катализаторов и адсорбентов в химической технологии, исторические этапы развития подходов к их получению. Анализируются критерии классификации по происхождению, строению, механизму действия и функциональному назначению. Изучаются ключевые физико-химические характеристики, определяющие активность, селективность, стабильность и регенерируемость, а также методы оценки пористой структуры, поверхности и кислотно-основных свойств.

Тема 2. Подготовка и синтез исходных веществ. Носители катализаторов: свойства, методы получения и модификации

Освещаются этапы подготовки исходных компонентов, методы очистки и активации, влияние чистоты и дисперсности на свойства конечного материала. Рассматриваются стратегии синтеза прекурсоров. Изучаются современные подходы к выбору и получению носителей катализаторов: их структурные, текстурные и поверхностные характеристики. Обсуждаются методы модификации носителей для повышения механической прочности, термической устойчивости и химической инертности, а также примеры создания носителей с заданными свойствами.

Тема 3. Методы нанесения активных компонентов на носители: физико-химические подходы

Анализируются современные методы нанесения активных компонентов: пропитка, ионный обмен, адсорбция, химическое осаждение. Рассматриваются физико-химические основы взаимодействия между компонентами, способы формирования однородных и высокодисперсных покрытий, влияние условий нанесения на активность и стабильность катализаторов.

Тема 4. Термическая обработка и нетрадиционные методы приготовления катализаторов и адсорбентов

Изучаются физико-химические процессы при термической обработке: дегидратация, структурные превращения, формирование активных центров; влияние температуры, времени и атмосферы на фазовый состав, пористость, прочность и свойства. Рассматриваются инновационные подходы: сверхкритические флюиды, плазменные и микроволновые методы, золь-гель технологии, нанотехнологии. Оценивается эффективность нетрадиционных методов по сравнению с классическими, приводятся примеры промышленного внедрения.

Тема 5. Аналитические методы исследования свойств катализаторов и адсорбентов

Рассматриваются современные физико-химические методы анализа: электронная микроскопия, рентгеновская дифракция, спектроскопия, адсорбционные методы оценки текстуры и площади поверхности. Изучаются подходы к комплексной характеристике материалов и интерпретации экспериментальных данных для оптимизации процессов приготовления.

Тема 6. Масштабирование процессов приготовления. Практические аспекты внедрения катализаторов и адсорбентов

Анализируются принципы и проблемы масштабирования синтеза от лабораторных до пилотных и промышленных условий, методы переноса технологий, оценка технологической и экономической эффективности. Рассматриваются вопросы интеграции новых материалов в действующие технологические схемы, требования к эксплуатационным характеристикам, методы оценки эффективности внедрения, примеры успешного промышленного применения и пути оптимизации.

Тема 7. Анализ примеров классификации и характеристик катализаторов и адсорбентов

На основе реальных образцов и литературных данных изучается определение принадлежности катализаторов и адсорбентов к различным классам, анализ их основных характеристик (активность, селективность, стабильность, текстура). Проводится разбор конкретных промышленных и лабораторных материалов с обоснованием выбора метода их синтеза. Формируются навыки сопоставления свойств с областью применения.

Тема 8. Расчётные задачи по подготовке исходных веществ и получению носителей

Выполняются расчёты, связанные с очисткой и активацией прекурсоров, выбором растворителей и реагентов для синтеза. Решаются задачи по синтезу носителей с заданной пористой структурой и поверхностными свойствами (расчёт количества поровытеснителя, условий золь-гель перехода). Отрабатывается контроль параметров на стадии подготовки и получения носителей.

Тема 9. Моделирование процессов нанесения активных компонентов на носители

С использованием расчётных и графических методов моделируются процессы пропитки, ионного обмена и адсорбции. Рассчитываются концентрации растворов, степень заполнения пор, равномерность распределения активного компонента. Анализируется влияние технологических параметров (рН, температура, время) на конечные свойства катализаторов. Проводится сравнительная оценка эффективности разных методов нанесения для заданной системы.

Тема 10. Оценка влияния термической обработки и нетрадиционных методов на свойства

Анализируются термограммы, рентгенограммы и данные по изменению пористости образцов после отжига в различных условиях. Решаются задачи по выбору режимов сушки, прокаливания и активации. Рассматриваются примеры использования сверхкритических, микроволновых и плазменных методов; проводится сравнение характеристик материалов, полученных классическими и нетрадиционными способами.

Тема 11. Исследование свойств методами анализа, вопросы масштабирования и внедрения. Представление результатов

Обрабатываются реальные экспериментальные данные (изотермы адсорбции, дифрактограммы, микрофотографии), интерпретируются для оценки качества синтезированных материалов. Решаются задачи по масштабированию (расчёт коэффициентов перехода, оценка тепловых и массообменных ограничений). Разбираются кейсы внедрения катализаторов и адсорбентов в производство. Отрабатываются навыки оформления научных отчётов, подготовки презентаций и публичного представления результатов исследований.

6. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 3

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1.	Введение в физико-химические основы приготовления катализаторов и адсорбентов. Классификация и основные характеристики	Работа с литературой, источниками. Подготовка конспекта по основным понятиям и классификациям. Составление таблицы «Классификация катализаторов и адсорбентов» с примерами.
2.	Подготовка и синтез исходных веществ. Носители катализаторов: свойства, методы получения и модификации	Работа с литературой, источниками. Решение расчётных задач на определение количества прекурсоров, выбор условий очистки. Подготовка к устному опросу по методам получения носителей.
3.	Методы нанесения активных компонентов на носители: физико-химические подходы	Работа с литературой, источниками. Выполнение расчётных заданий по пропитке (объём пор, концентрация раствора, степень заполнения). Подготовка сравнительной таблицы методов нанесения.
4.	Термическая обработка и нетрадиционные методы приготовления катализаторов и адсорбентов	Работа с литературой, источниками. Анализ заданных режимов термической обработки (температура, атмосфера, время). Подготовка доклада/презентации по одному из нетрадиционных методов (сверхкритический, плазменный, микроволновой, золь-гель).
5.	Аналитические методы исследования свойств катализаторов и адсорбентов	Работа с литературой, источниками. Подготовка протоколов анализа для конкретных методов (БЭТ, РФА, СЭМ, ТПД). Изучение принципов работы приборов.
6.	Масштабирование процессов приготовления. Практические аспекты внедрения катализаторов и адсорбентов	Работа с литературой, источниками. Выполнение расчётно-графической работы (оценка коэффициентов масштабирования, тепловых и диффузионных ограничений). Подготовка кейса внедрения (на примере промышленного процесса).
7.	Анализ примеров классификации и характеристик катализаторов и адсорбентов	Работа с литературой, источниками. Подбор из научных статей 3–5 примеров катализаторов/адсорбентов с их характеристикой. Заполнение таблицы «Материал – класс – свойства – область применения».
8.	Расчётные задачи по подготовке исходных веществ и получению носителей	Работа с литературой, источниками. Решение домашних задач: расчёт чистоты реагентов, выбор соотношения компонентов для синтеза носителя с заданной пористостью. Подготовка к контрольной работе.
9.	Моделирование процессов нанесения активных компонентов на носители	Работа с литературой, источниками. Выполнение расчётов параметров пропитки и ионного обмена. Построение графиков зависимости распределения активного компонента от времени и pH. Подготовка отчёта по моделированию.

10.	Оценка влияния термической обработки и нетрадиционных методов на свойства	Работа с литературой, источниками. Анализ предоставленных термограмм и рентгенограмм (определение фазовых переходов). Сравнительная таблица свойств материалов, полученных классическим и нетрадиционным методами.
11.	Исследование свойств методами анализа, вопросы масштабирования и внедрения. Представление результатов	Работа с литературой, источниками. Обработка экспериментальных данных (изотермы адсорбции, дифрактограммы). Решение задач по масштабированию. Подготовка краткого научного отчёта или презентации для публичного выступления.
12.	Дифференцированный зачет	Вопросы к зачету

7. Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю)

7.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

Оценочное средство 1. Работа с литературой, источниками

Проводится в форме самостоятельной работы аспиранта с обязательным последующим обсуждением на практическом занятии. Может быть организована как индивидуальная работа или работа в малых группах. Цель – формирование навыков поиска, анализа, систематизации и критической оценки научно-технической информации по тематике приготовления катализаторов и адсорбентов.

Для подготовки необходимо изучить рекомендованную основную и дополнительную литературу, а также материалы периодических научных изданий (журналы «Катализ в промышленности», «Кинетика и катализ», «Журнал физической химии» и др.). Аспирант должен составить краткий конспект (тезисы) по ключевым вопросам темы, выделить основные физико-химические закономерности, подготовить не менее 2-3 вопросов для обсуждения.

Контроль осуществляется в форме устного собеседования на практическом занятии, где аспирант демонстрирует понимание материала, способность аргументированно излагать позицию и отвечать на уточняющие вопросы преподавателя.

Пример

Тема: Носители катализаторов: свойства, методы получения и модификации

Вопросы для обсуждения после работы с литературой:

1. Какие основные типы носителей катализаторов вам известны? Приведите примеры оксидных, углеродных и цеолитных носителей.
2. Как удельная поверхность и пористая структура носителя влияют на дисперсность активного компонента?
3. Какие методы модификации поверхности носителей позволяют повысить термическую стабильность катализатора?
4. В чём различие между инертным и активным носителем? Приведите примеры.
5. Какие требования предъявляются к носителям для катализаторов процессов гидроочистки?

Оценочное средство 2. Практические задания (расчёт параметров нанесения)

Проводится на практических занятиях в форме индивидуального или группового решения расчетно-аналитических задач. Цель – формирование умений применять теоретические знания для расчёта технологических параметров процессов приготовления катализаторов.

Объём задания – 1-2 задачи на занятие. Время выполнения – 15-30 минут. Допускается использование справочных материалов и калькуляторов. Результатом является письменное решение с указанием формул, подстановкой значений и выводом.

Контроль осуществляется путём проверки правильности расчётов, обоснованности выбора формул и корректности интерпретации полученных результатов.

Пример

Тема: Методы нанесения активных компонентов на носители

Задача 1. Рассчитайте необходимое количество раствора нитрата никеля ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$) с концентрацией 0,5 моль/л для пропитки 100 г оксида алюминия ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) с влагоёмкостью 0,8 мл/г методом начальной влагоёмкости (пропитка по влагоёмкости). Определите массовую долю NiO (в масс. %) в полученном катализаторе после прокаливания. Молярная масса $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 = 182,7$ г/моль, $\text{NiO} = 74,7$ г/моль.

Задача 2. Для приготовления катализатора $\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ методом соосаждения из смеси нитратов меди, цинка и алюминия используется 10%-ный раствор Na_2CO_3 в качестве осадителя. Объём раствора солей – 500 мл, суммарная концентрация катионов $\text{Me}^{2+} = 1,2$ моль/л. Рассчитайте теоретический объём раствора осадителя (в мл), необходимый для полного осаждения гидроксидов (стехиометрическое соотношение).

Оценочное средство 3. Анализ режимов обработки

Проводится на практических занятиях в форме кейс-анализа или сравнительной оценки. Аспиранту предлагается описание конкретного технологического режима термической обработки, который необходимо проанализировать, оценить его влияние на структуру и свойства катализатора, выявить возможные недостатки и предложить оптимальные параметры.

Форма выполнения – письменный анализ (объём 1-2 стр.) или устное обсуждение с презентацией выводов. Время подготовки – 15-20 минут.

Контроль осуществляется по критериям: полнота анализа, аргументированность выводов, учёт физико-химических основ процесса.

Пример

Тема: Термическая обработка катализаторов и адсорбентов: влияние на структуру и свойства

Кейс 1. При приготовлении $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора методом пропитки образец после сушки (120°C , 12 ч) подвергают прокаливанию на воздухе при 450°C в течение 4 ч. Затем катализатор восстанавливают в токе водорода при 500°C в течение 3 ч. Проанализируйте:

- Какие физико-химические процессы (дегидратация, разложение, фазовые превращения) происходят на каждом этапе термической обработки?
- Как изменение температуры прокаливании до 600°C может повлиять на дисперсность NiO и последующую активность восстановленного катализатора?
- Предложите альтернативный режим термической обработки для получения более высокой дисперсности активного компонента.

Кейс 2. Адсорбент на основе цеолита NaX прокаливают при 550°C для удаления темплата и воды. При этом наблюдается частичная деструкция кристаллической решётки и снижение адсорбционной ёмкости. Предложите оптимальные условия термической обработки (температура, скорость нагрева, атмосфера), которые позволят сохранить структуру цеолита и обеспечить высокую адсорбционную способность.

Оценочное средство 4. Подготовка протоколов анализа

Проводится после выполнения лабораторных или практических работ по исследованию физико-химических свойств катализаторов и адсорбентов. Цель – формирование навыков документирования, обработки и представления экспериментальных данных в формате, принятом в научно-исследовательской практике.

Протокол должен включать: цель работы, характеристику образца, описание метода анализа, полученные экспериментальные данные (таблицы, графики, спектры, дифрактограммы), расчёты (удельная поверхность, объём пор, размер кристаллитов), интерпретацию результатов и выводы.

Объём протокола – 3-5 страниц. Время выполнения – до 1 недели.

Контроль осуществляется преподавателем по критериям: полнота и корректность обработки данных, правильность расчётов, обоснованность интерпретации, соответствие требованиям к оформлению научно-технической документации.

Пример

Тема: Аналитические методы исследования свойств катализаторов и адсорбентов

Примерная структура протокола анализа пористой структуры методом низкотемпературной адсорбции азота:

Объект исследования: образец катализатора $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (0,5% Pt).

Метод анализа: статическая volumетрическая адсорбция азота при 77 К на анализаторе ASAP 2020.

Экспериментальные данные:

- Изотерма адсорбции-десорбции (привести график);
- Данные в табличной форме (P/P_0 , V_{ads} , $\text{см}^3/\text{г}$).

Расчёты:

1. Удельная поверхность по БЭТ (с указанием диапазона P/P_0);
2. Удельный объём пор по методу БДХ (ВН);
3. Распределение пор по размерам (привести гистограмму);
4. Микропористый объём (t-plot метод).
5. Интерпретация результатов:
6. Тип изотермы и петли гистерезиса (по классификации IUPAC);
7. Характер пористости (микро-, мезо-, макропоры);
8. Влияние пористой структуры на каталитическую активность.
9. Выводы: заключение о текстурных характеристиках образца.

Оценочное средство 5. Расчётно-графические работы (оценка эффективности масштабирования)

Проводится в форме самостоятельной работы, включающей расчёты технологических и экономических показателей при масштабировании процесса приготовления катализатора от лабораторного до пилотного уровня.

Объём работы – 5-10 страниц расчётно-пояснительной записки, включая таблицы и графики. Время выполнения – 2-3 недели. Работа выполняется индивидуально или в малых группах (2-3 человека).

Контроль осуществляется путём проверки расчётов, обоснованности выбора масштабного перехода, анализа возможных искажений свойств при масштабировании и экономической оценки.

Пример

Тема: Масштабирование процессов приготовления от лабораторных к пилотным и промышленным условиям

Задание. Лабораторный метод приготовления катализатора Fe-ZSM-5 для селективного каталитического восстановления (SCR) NO_x аммиаком включает:

1. гидротермальный синтез цеолита (автоклав 0,5 л);
2. ионный обмен с раствором $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$;
3. фильтрацию, промывку, сушку (110°C);
4. прокаливание (550°C , 4 ч).

Требуется разработать пилотную установку с масштабным коэффициентом 100 (объём реактора синтеза 50 л).

В расчётно-графической работе необходимо:

- Рассчитать пересчёт параметров синтеза (концентрации, температуры, времени) с учётом тепломассообменных ограничений при масштабировании.
- Предложить тип оборудования для каждой стадии (реактор синтеза, фильтр-пресс, сушилка, муфельная печь) с обоснованием выбора.
- Оценить, как изменятся характеристики катализатора (степень обмена железа, размер кристаллитов, пористость) при масштабировании.
- Выполнить укрупнённый расчёт капитальных и эксплуатационных затрат на пилотную установку.
- Сделать вывод о технологической и экономической целесообразности масштабирования.

Оценочное средство 6. Доклад на семинаре

Проводится в форме публичного выступления с обязательной презентацией на 5-10 минут по результатам самостоятельного научно-исследовательского обзора. Аспирант выбирает тему из примерного перечня или формулирует самостоятельно (при согласовании с преподавателем). Подготовка включает анализ не менее 5-7 научных статей из рецензируемых журналов (желательно Scopus/WoS или РИНЦ).

Структура доклада: актуальность, цель обзора, основные методы/подходы, сравнительная характеристика, примеры, выводы, перспективы. Презентация должна содержать 8-12 слайдов.

Контроль осуществляется преподавателем и аудиторией по критериям: глубина проработки материала, критический анализ источников, логичность изложения, качество визуального сопровождения, ответы на вопросы.

Примерная тематика докладов на семинар

1. Нетрадиционные методы приготовления катализаторов и адсорбентов: инновации и перспективы
2. Применение сверхкритических флюидов (CO_2 , вода) для синтеза наноразмерных катализаторов: преимущества и ограничения.
3. Микроволновая активация при приготовлении цеолитных адсорбентов: влияние на скорость кристаллизации и текстуру.
4. Плазмохимический синтез металлосодержащих катализаторов: формирование высокодисперсных активных центров.
5. Золь-гель метод получения оксидных носителей с контролируемой пористой структурой.
6. Гидротермальный и сольвотермальный синтез металл-органических каркасных структур (MOF) для адсорбционных приложений.
7. Механохимическая активация как экологичная альтернатива классическому осаждению при синтезе катализаторов.

Оценочное средство 7. Презентация результатов исследования

Проводится на заключительном занятии (Тема 11) как итоговая работа по курсу. Аспирант представляет результаты собственного научного исследования (экспериментального или теоретического), выполненного в рамках дисциплины. Исследование может включать анализ литературных данных, расчёты, обработку экспериментальных данных (в том числе полученных на лабораторном оборудовании), предложение нового метода или оптимизацию существующего.

Формат выступления – 10-12 минут, презентация 10-15 слайдов, обязательно наличие научного аппарата (цель, задачи, методы, результаты, обсуждение, выводы). Возможно представление результатов в формате стендового доклада.

Контроль осуществляется комиссией преподавателей и аспирантов с оценкой научной новизны, достоверности, практической значимости, качества оформления и защиты.

Примерная структура презентации

Название работы – актуальная проблема приготовления катализатора/адсорбента.

- Цель и задачи исследования.
- Объекты и методы (исходные вещества, методы синтеза, аналитическое оборудование).
- Экспериментальная часть – дизайн эксперимента, условия синтеза.
- Результаты – графики, таблицы, спектры, микрофотографии, дифрактограммы.
- Обсуждение – интерпретация полученных данных, сравнение с литературными.
- Выводы – основные научные и прикладные результаты.
- Перспективы – дальнейшие исследования или рекомендации по внедрению.

Оценочное средство 8. Дифференцированный зачет (4 семестр)

Проводится в форме устного собеседования по вопросам, охватывающим все темы дисциплины. Форма проведения – индивидуальное собеседование с преподавателем. Аспирант получает 2-3 вопроса из утверждённого перечня (примерный перечень приведён ниже). Время подготовки ответа – до 20 минут. Ответ должен быть развёрнутым, демонстрировать понимание физико-химической сущности процессов, знание методов приготовления и анализа, способность применять знания для решения практических задач.

Критерии оценки: полнота и глубина ответа, владение терминологией, способность приводить примеры, аргументированность, ответы на дополнительные вопросы.

Примерный перечень вопросов к дифференцированному зачету:

1. Перечислите основные этапы приготовления катализаторов методом пропитки. От каких параметров зависит распределение активного компонента по зерну носителя?
2. Классификация методов приготовления катализаторов и адсорбентов. Преимущества и недостатки осаждения, пропитки, механического смешения, ионного обмена.
3. Какие факторы определяют выбор носителя для конкретного каталитического процесса? Приведите примеры.
4. Физико-химические основы метода соосаждения. Влияние pH, температуры, скорости добавления осадителя и перемешивания на свойства осадка.
5. Процессы, протекающие при термической обработке катализаторов (сушка, прокаливание, восстановление, сульфидирование). Их влияние на фазовый состав и текстуру.
6. Метод начальной влажёмкости (пропитка по влажёмкости): сущность, достоинства, ограничения. Как рассчитать необходимый объём раствора?
7. Нетрадиционные методы синтеза катализаторов: золь-гель метод, гидротермальный синтез, микроволновой синтез, механохимическая активация. Примеры.
8. Основные методы контроля пористой структуры адсорбентов: БЭТ, БДХ, t-plot, ртутная порометрия. Какую информацию даёт каждый метод?
9. Принципы масштабирования процессов приготовления катализаторов. Какие параметры сохраняют постоянными (критерии подобия) при масштабном переходе?
10. Что такое «эффективность масштабирования»? Какие технологические и экономические факторы необходимо оценивать?
11. Физико-химические основы ионного обмена как метода приготовления катализаторов. Примеры (цеолиты, синтез металлосодержащих материалов).
12. Требования к исходным веществам для синтеза катализаторов. Методы очистки прекурсоров. Влияние примесей на свойства конечного продукта.
13. Современные методы исследования морфологии и элементного состава катализаторов: СЭМ, ПЭМ, ЭДС, РФА. Что можно определить?
14. Экологические аспекты приготовления катализаторов. Снижение отходов, использование безопасных растворителей, рециклинг промывных вод.
15. Роль дисперсности и однородности смешения при приготовлении катализаторов методом механического смешения. Примеры промышленных технологий.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

8.1. Основная литература:

1. Комаров, В. С. Научные основы синтеза адсорбентов / В. С. Комаров. — Минск : Белорусская наука, 2013. — 182 с. — ISBN 978-985-08-1635-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/29482.html> (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

8.2. Дополнительная литература:

1. Ильин, А. П. Научные основы приготовления катализаторов. Творческое наследие и дальнейшее развитие работ профессора И.П.Кириллова : монография / А. П. Ильин ; под редакцией А. П. Ильина. — Иваново : ИГХТУ, 2008. — 156 с. — ISBN 978-6-9616-0269-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/4474> (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Комаров, В. С. Адсорбенты и носители катализаторов. Научные основы регулирования пористой структуры : монография / В.С. Комаров, С.В. Бесараб. — Москва : ИНФРА-М, 2023. — 203 с. — (Научная мысль). — DOI 10.12737/2371. - ISBN 978-5-16-009581-3. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1878344> (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: по подписке.

8.3. Интернет-ресурсы:

1. Научная электронная библиотека www.elibrary.ru.
2. Образовательные ресурсы «Единое окно» <http://window.edu.ru/window/library>
3. ЭБС «Юрайт» <https://urait.ru/book>
4. ЭБС «Лань» <https://e.lanbook.com/>

5. Платформа «Знаниум» <https://znanium.com/>

9. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю) (при необходимости):

При реализации дисциплины используется лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства: Яндекс.Мессенджер, Яндекс.Телемост и Яндекс.Диск, антивирусное ПО Kaspersky; FAR Manager, офисный пакет Р7-Офис.

10. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для реализации дисциплины используются учебные аудитории, в которых обеспечены проводное подключение ПК к локальной сети и сети Интернет, а также доступ к электронно-библиотечным системам, электронной информационно-образовательной среде, современным профессиональным базам данных и информационно-справочным системам:

Мультимедийная учебная аудитория для проведения лекционных занятий.

Основное оборудование:

- Столы – 76 шт.
- Стулья – 123 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 4 шт.
- Двухсторонняя мобильная стеклянная маркерная доска на металлических ножках – 1 шт.
- Двухсторонняя мобильная доска на металлическом основании – 1 шт.
- Технические средства обучения: Интерактивная панель – 1 шт.
- Лазерный проектор – 2 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 2 шт.
- ТВ-панель настенная – 2 шт.
- Потолочный микрофонный массив – 2 шт.
- РТЗ-камера с автотрекингом – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК в комплекте с монитором – 1 шт.
- Мультимедийная трибуна – 1 шт.
- Сенсорный монитор – 1 шт.
- Настольный микрофон – 1 шт.
- Панель управления аудиторией – 1 шт.
- Система коммутация аудио и видеосигнала – 1 шт.

Мультимедийная учебная аудитория для проведения практических и семинарских занятий.

Основное оборудование:

- Столы – 15 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя - 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 1 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 1 шт.

Компьютерный класс (используется для практических занятий, численного моделирования, обработки и визуализации данных, подготовки научных материалов).

Основное оборудование:

- Столы – 30 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.

- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 2 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 31 шт.

Помещение для самостоятельной работы.

Основное оборудование:

- Столы – 15 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 2 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 1 шт.

Помещение для самостоятельной работы (коворкинг используется как помещение для самостоятельной работы аспирантов, подготовки публикаций, докладов, отчетов, презентаций и материалов диссертации).

Основное оборудование:

- Столы – 22 шт.
- Кресла – 22 шт.
- Технические средства обучения: ПК типа «моноблок» – 10 шт.

Кабинет для проведения групповых и индивидуальных консультаций.

Основное оборудование:

- Столы – 15 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 2 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 1 шт.

Кабинет для проведения промежуточной и итоговой аттестации.

Основное оборудование:

- Столы – 15 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 1 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 1 шт.

11. Средства адаптации преподавания дисциплины (модуля) к потребностям лиц с ограниченными возможностями

В случае необходимости, обучающимся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья (по заявлению обучающегося) могут предлагаться одни из следующих вариантов восприятия информации с учетом их индивидуальных психофизических особенностей, в том числе с применением электронного обучения и дистанционных технологий:

- для лиц с нарушениями зрения: в печатной форме увеличенным шрифтом; в форме электронного документа; в форме аудиофайла (перевод учебных материалов в аудиоформат); индивидуальные задания и консультации.
- для лиц с нарушениями слуха: в печатной форме; в форме электронного документа; индивидуальные задания и консультации.
- для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата: в печатной форме; в форме электронного документа; в форме аудиофайла; индивидуальные задания и консультации.

12. Методические рекомендации обучающимся по выполнению самостоятельной работы

Регулярное чтение выпусков научных журналов (Катализ в промышленности; Кинетика и катализ; Журнал физической химии; Журнал прикладной химии и т.д.).

Изучение методических материалов по основным курсам «Физическая химия», «Коллоидная химия», «Химическая технология», «Физико-химические методы анализа», «Поверхностные явления и дисперсные системы» по направлению подготовки, спецкурсам «Гетерогенный катализ», «Химия и технология катализаторов», «Адсорбционные процессы», а также лабораторным практикумам по синтезу и физико-химическим методам исследования катализаторов и адсорбентов (методы БЭТ, РФА, СЭМ, ТПД, ТПВ и др.).