

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»  
Химический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Декан химического факультета,  
Акад. РАН, профессор



/В.В. Лунин/

«27» февраля 2017 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Основы гетерогенного катализа и приготовления катализаторов**

**Уровень высшего образования:**

Специалитет

---

**Направление подготовки (специальность):**

04.05.01 Фундаментальная и прикладная химия

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Физическая химия

**Форма обучения:**

очная

---

Рабочая программа рассмотрена и одобрена  
Учебно-методической комиссией факультета  
(протокол №1 от 27.01.2017)

Москва 2017

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки / специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия» (программа специалитета), утвержденного приказом МГУ от 22 июля 2011 года № 729 (в редакции приказов МГУ от 22 ноября 2011 года № 1066, от 21 декабря 2011 года № 1228, от 30 декабря 2011 года № 1289, от 27 апреля 2012 года № 303, от 30 декабря 2016 года № 1671).

Год (годы) приема на обучение

2014/2015, 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019

---

1. Наименование дисциплины (модуля) **Основы гетерогенного катализа и приготовления катализаторов**
2. Уровень высшего образования – **специалитет.**
3. Направление подготовки: **04.05.01 Фундаментальная и прикладная химия.**
4. Место дисциплины (модуля) в структуре ООП: вариативная часть ООП, блок ПД.
5. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Компетенция	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
<p><b>ОПК-1.С.</b> Способность решать современные проблемы фундаментальной и прикладной химии, используя методологию научного подхода и систему фундаментальных химических понятий и законов</p>	<p><b>Уметь</b> анализировать научную литературу с целью выбора направления и методов, применяемых в исследовании по теме выпускной квалификационной работы,  <b>Уметь:</b> самостоятельно составлять план исследования  <b>Владеть</b> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации, постановки целей исследования и выбора оптимальных путей и методов их достижения</p>
<p><b>СПК-1.С.</b> Способность использовать теоретические основы современных физико-химических методов исследования и анализа систем различной природы при решении практических задач</p>	<p><b>Знать:</b> теоретические основы физико-химических методов исследования, применяемых для описания свойств  <b>Знать:</b> особенности и ограничения применения физико-химических методов для исследования катализаторов с малым содержанием металла  <b>Знать:</b> методики расчета кинетических параметров химических реакций  <b>Уметь:</b> подбирать методики исследования в зависимости от типа гетерогенно-каталитической системы  <b>Владеть:</b> методиками проведения каталитических испытаний и анализа результатов</p>
<p><b>СПК-2.С.</b> Способность проводить экспериментальные исследования в избранной области физической химии (кинетика и катализ, химическая термодинамика, молекулярная спектроскопия, химия поверхности)</p>	<p><b>Уметь:</b> квалифицированно анализировать экспериментальные кинетические кривые для реакционных систем различного типа  <b>Уметь:</b> грамотно спланировать физико-химический эксперимент  <b>Владеть:</b> навыками расчета кинетических параметров и характеристик химического реактора  <b>Владеть:</b> навыками выбора методики приготовления гетерогенных катализаторов различного типа</p>
<p><b>СПК-3.С.</b> Способность использовать серийные и оригинальные установки (приборы, комплексы) для определения</p>	<p><b>Знать:</b> основные подходы к методикам синтеза гетерогенных катализаторов  <b>Знать:</b> способы, применяемые для оптимизации каталитических установок  <b>Уметь:</b> рассчитывать кинетические параметры по экспериментальным результатам</p>

физико-химических свойств веществ	<p><b>Владеть:</b> теоретическими основами методик проведения каталитических испытаний в реакторах различных типов</p> <p><b>Владеть:</b> практическими навыками расчета величин константы скорости, конверсии и энергии активации</p>
<p><b>СПК-4.С.</b> Способность использовать физические и математические модели с учетом их возможностей и ограничений при обработке и интерпретации экспериментальных данных в избранной области физической химии</p>	<p><b>Знать:</b> область применения и ограничения применимости физико-химических методов при определении свойств гетерогенных катализаторов</p> <p><b>Знать:</b> способы математической обработки результатов каталитических испытаний</p> <p><b>Уметь:</b> обрабатывать экспериментальные результаты каталитических испытаний гетерогенных катализаторов</p> <p><b>Уметь:</b> выбирать модель и оценивать ошибку при расчетах с использованием различных математических моделей</p> <p><b>Владеть:</b> математическим аппаратом, необходимым для проведения расчетов кинетических параметров и обработки результатов физико-химических исследований</p>
<p><b>СПК-5.С.</b> Способность проводить квантовохимические, термодинамические и кинетические расчеты с использованием современных программных комплексов и баз данных</p>	<p><b>Знать:</b> возможности физико-химических методов для определения свойств гетерогенных катализаторов</p> <p><b>Знать:</b> ограничения и возможные ошибки при исследовании свойств гетерогенных катализаторов с малым содержанием нанесенного металла</p> <p><b>Уметь:</b> квалифицированно выбирать модель для описания механизмов каталитических реакций</p> <p><b>Владеть:</b> методиками и способами выбора оптимальной и адекватной модели для описания свойств гетерогенных катализаторов</p> <p><b>Владеть:</b> математическим аппаратом анализа экспериментальных данных, полученных с использованием различных методов кинетического исследования, методикой расчета кинетических параметров по основным теориям химической кинетики</p>

6. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

*Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часа, из которых 64 часов составляет контактная работа студента с преподавателем (28 часов занятия лекционного типа, 28 часа – занятия семинарского типа, 4 часа – групповые консультации, 4 часа – промежуточный контроль успеваемости), 44 часа составляет самостоятельная работа студента.*

7. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Обучающийся должен

**Знать:** основные законы в области неорганической, аналитической и физической химии; фундаментальные основы физико-химических методов исследования.

**Уметь:** обсуждать результаты научного исследования; применять законы химической кинетики для основных типов химических реакций.

**Владеть:** основными химическими теориями, концепциями, законами, описывающими физико-химические явления, применять основные законы химии при обсуждении полученных результатов.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.:	Всего
Тема 1. Общие принципы катализа. Основные характеристики катализаторов: активность, селективность, стабильность. Каталитический цикл	5	2	2				4	1		1

Тема 2. Реакционная способность поверхности. Теории гетерогенного катализа. Основные подходы для предсказания каталитических свойств металлов. Перестройка поверхности под действием реакционной среды. Эффект структурной чувствительности в гетерогенном катализе. Зависимость каталитической активности от размера и формы частиц.	10	4	4				8	2		2
Тема 3. Методы приготовления гетерогенных катализаторов. Общие подходы и принципы приготовления катализаторов. Планирование методики и выбор критериев для оптимизации. Методы синтеза гетерогенных катализаторов. Особенности экспериментального проведения синтеза в каждом методе. Способы синтеза дисперсных частиц на поверхности носителя. Влияние условий приготовления на форму, размер и распределение частиц. Влияние условий приготовления на физико-химические свойства получаемых катализаторов.	14	6	6				12	2		2
Тема 4. Кинетические методы для	16	6	6	2			14	2		2

<p>проведения и исследования параметров химических реакций. Особенности экспериментального проведения каталитических реакций и расчет кинетических параметров в реакторах различных типов. Комбинированные реакторы. Диаграмма Левеншпиля. Реакторы с импульсной подачей реагентов. Учет диффузии при изучении кинетики гетерогенно-каталитических реакций.</p>										
<p>Тема 5. Реакционная среда и катализатор. Основные причины дезактивации, способы их минимизации и подходы к исследованию причин дезактивации.</p>	6	2	2				4	1		1
<p>Тема 6. Физико-химические методы для исследования свойств гетерогенных катализаторов. Возможности современных методов исследования. Особенности физико-химического исследования свойств гетерогенных катализаторов при малом содержании активного металла и для нанесенных систем. Пробоподготовка образцов и ее влияние на результаты физико-химического исследования.</p>	14	6	6				12	2		2

Ограничения методов и возможные ошибки определения параметров гетерогенных катализаторов при исследовании физико-химическими методами.										
Тема 7. Особенности применения физико-химических методов и представления результатов исследования гетерогенных катализаторов. Интерпретация результатов исследования и сопоставление данных, полученных различными методами исследования. Использование результатов физико-химических исследований для объяснения каталитических свойств.	9	2	2	2			6		2	2
Промежуточная аттестация <i>экзамен</i>	36					4	4		32	32
<b>Итого</b>	<b>108</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>4</b>		<b>4</b>	<b>64</b>	<b>10</b>	<b>34</b>	<b>44</b>

#### 9. Образовательные технологии:

- применение компьютерных симуляторов, обработка данных на компьютерах, использование компьютерных программ, управляющих приборами;
- использование средств дистанционного сопровождения учебного процесса;
- преподавание дисциплин в форме авторских курсов по программам, составленным на основе результатов исследований научных школ МГУ.

#### 10. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю):



Программа курса, план занятий и перечень заданий для самостоятельной работы. По теме каждой лекции указывается материал в источниках из списков основной и вспомогательной литературы, а также из интернет-ресурсов.

#### 11. Ресурсное обеспечение:

- Перечень основной и вспомогательной учебной литературы ко всему курсу

#### **Основная литература**

Чокендорф И., Наймантсведрайт Х. «Современный катализ и химическая кинетика», ISBN: 978-5-91559-044-0. Издательство: Интеллект, 2010

Крылов О.В. Гетерогенный катализ, М., Академкнига, 2004.

#### **Дополнительная литература**

1. Сетерфилд Ч. Практический курс гетерогенного катализа. М.: Мир, 1984.
2. Экспериментальные методы исследования катализа (ред. Р.Андерсон), М., Мир, 1972
3. Handbook of Heterogeneous Catalysis, (G.Ertl, H.Knozinger and J.Weitkamp, Eds.), VCH Publ., 1997.
4. Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов", Новосибирск, Изд-во УрО РАН, 2004.

#### 12. Язык преподавания – русский

#### 13. Преподаватели:

Доцент, к.х.н. Голубина Елена Владимировна, кафедра физической химии химического факультета МГУ, [golubina@kge.msu.ru](mailto:golubina@kge.msu.ru), +7 (495) 939-3337

#### **Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения**

Образцы оценочных средств для текущего контроля усвоения материала и промежуточной аттестации - экзамена. На экзамене проверяется достижение промежуточных индикаторов компетенций, перечисленных в п.5.

#### **Вопросы для экзамена**

1. Дайте определение понятию «Катализ». Термодинамический и кинетический аспекты действия катализаторов. Как катализатор влияет на равновесный выход, тепловой эффект и скорость реакции.
2. Каталитический цикл, каталитическая активность. Особенности расчета каталитической активности в ферментативном, гомогенном и гетерогенном катализе.
3. Катализ с точки зрения теории активированного комплекса. Энтальпия и энтропия образования активированного комплекса для каталитического и некаталитического процессов.
4. Подходы и теории, позволяющие предсказать каталитическую активность. Принцип Сабатье и теория А.Баландина
5. Влияние электронного строения металлов на их каталитическую активность.
6. Изменение и перестройка поверхности под действием реакционной смеси. Механизм Марса ван Кревелена.
7. Хемосорбция и диссоциативная адсорбция как стадии каталитической реакции. Использование теорий адсорбции для описания механизмов гетерогенно-каталитических реакций.
8. Размерные эффекты в катализе. Роль краевых атомов в формировании активных центров.
9. Экспериментальные подходы к установлению механизмов каталитических реакций. Кинетика реакций, осложненных сильной адсорбцией продукта.
10. Общие принципы приготовления гетерогенных катализаторов. Основные стадии и этапы приготовления, и их особенности.
11. В чем особенность методов приготовления нанесенных гетерогенных катализаторов?
12. Методы синтеза массивных катализаторов (сплавление, осаждение, соосаждение, золь-гель, выщелачивание, гидролиз в пламени и др.).
13. Способы синтеза дисперсных частиц на поверхности носителя (методы пропитки, осаждения, ионный обмен и др.).
14. Влияние носителя и условий приготовления на форму нанесенных частиц.
15. Как проявляется различная пористая структура на виде изотермы адсорбции/десорбции?
16. Возможные сложности при определении распределения пор по размерам: эффекты кавитации и блокировки пор. Способы построения распределения пор по размерам для микро - и мезопористых материалов.
17. Использование физико-химических методов для определения пористой структуры гетерогенных катализаторов.

18. Применимость методов БЭТ, ВJН и DFT для пор различного размера.
19. Использование физико-химических методов для определения элементного состава гетерогенных катализаторов. Сравнение применимости и ограничений различных методов.
20. Использование физико-химических методов для определения электронного состояния химических элементов на поверхности катализаторов.
21. Применение молекул-зондов для исследования свойств поверхности гетерогенных катализаторов.
22. Возможные ошибки при определении параметров гетерогенных катализаторов при исследовании физико-химическими методами. Приведите примеры.
23. Какие физико-химические методы эффективны при исследовании нанесённых наноразмерных частиц металлов?
24. Применение физико-химических методов исследования для оптимизации методик приготовления гетерогенных катализаторов и определения параметров получаемых систем.
25. Использование физико-химических методов исследования для определения размеров частиц: причины несовпадения размеров при исследовании различными методами.
26. Методы определения химического состава катализаторов: химический анализ, атомно-абсорбционная спектроскопия, ICP-MS, рентгенофлуорисцентный анализ. Применимость методов и факторы, которые могут вносить ошибки.
27. Факторы, влияющие на вид микрофотографий растровой электронной микроскопии. Сведения об образце, которые можно извлечь при исследовании в режимах SE, BSE, EDX.
28. Режимы анализа методом просвечивающей электронной микроскопии (BF, ADF, HAADF, STEM): использование для определения характеристик гетерогенных катализаторов.
29. Температурно-программированные методы для оптимизации методик приготовления гетерогенных катализаторов
30. Температурно-программированные методы для исследования свойств гетерогенных катализаторов
31. Типы реакторных систем и их применение для определения каталитической активности и кинетических параметров реакции.
32. Управление селективностью образования продуктов в параллельных и последовательных реакциях в реакторах различного типа.
33. Сравнение эффективности проточных реакторов идеального смешения и вытеснения.

34. Последовательность реакторов различного типа. Выбор оптимальной реакторной схемы.
35. Подходы к анализу размеров частиц. Построение и анализ различных типов распределений частиц по размерам.

### Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Шкала оценивания знаний, умений и навыков является единой для всех дисциплин (приведена в таблице ниже)

<b>ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)</b>				
Оценка	2	3	4	5
Результат				
Знания	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
Умения	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера)	Успешное и систематическое умение
Навыки (владения)	Отсутствие навыков	Наличие отдельных навыков	В целом, сформированные навыки, но не в активной форме	Сформированные навыки, применяемые при решении задач

<b>РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)</b>	<b>ФОРМА ОЦЕНИВАНИЯ</b>
<p><b>Знать:</b> теоретические основы физико-химических методов исследования, применяемых для описания свойств</p> <p><b>Знать:</b> особенности и ограничения применения физико-химических методов для исследования катализаторов с малым содержанием металла</p> <p><b>Знать:</b> методики расчета кинетических параметров химических реакций</p> <p><b>Знать:</b> основные подходы к методикам синтеза гетерогенных катализаторов</p> <p><b>Знать:</b> способы, применяемые для оптимизации каталитических установок</p> <p><b>Знать:</b> область применения и ограничения применимости физико-химических методов при определении свойств гетерогенных катализаторов</p> <p><b>Знать:</b> способы математической обработки результатов каталитических испытаний</p> <p><b>Знать:</b> возможности физико-химических методов для определения свойств гетерогенных</p>	<p>мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на экзамене</p>

<p>катализаторов</p> <p><b>Знать:</b> ограничения и возможные ошибки при исследовании свойств гетерогенных катализаторов с малым содержанием нанесенного металла</p>	
<p><b>Уметь:</b> квалифицированно анализировать экспериментальные кинетические кривые для реакционных систем различного типа</p> <p><b>Уметь:</b> грамотно спланировать физико-химический эксперимент</p> <p><b>Уметь:</b> рассчитывать кинетические параметры по экспериментальным результатам</p> <p><b>Уметь:</b> обрабатывать экспериментальные результаты каталитических испытаний гетерогенных катализаторов</p> <p><b>Уметь:</b> выбирать модель и оценивать ошибку при расчетах с использованием различных математических моделей</p> <p><b>Уметь:</b> квалифицированно выбирать модель для описания механизмов каталитических реакций</p>	<p>мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на экзамене</p>
<p><b>Владеть</b> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации, постановки целей исследования и выбора оптимальных путей и методов их достижения</p> <p><b>Владеть:</b> методиками проведения каталитических испытаний и анализа результатов</p> <p><b>Владеть:</b> навыками расчета кинетических параметров и характеристик химического реактора</p> <p><b>Владеть:</b> навыками выбора методики приготовления гетерогенных катализаторов различного типа</p> <p><b>Владеть:</b> теоретическими основами методик проведения каталитических испытаний в реакторах различных типов</p> <p><b>Владеть:</b> практическими навыками расчета величин константы скорости, конверсии и энергии активации</p> <p><b>Владеть:</b> математическим аппаратом, необходимым для проведения расчетов кинетических параметров и обработки результатов физико-химических исследований</p> <p><b>Владеть:</b> методиками и способами выбора оптимальной и адекватной модели для описания свойств гетерогенных катализаторов</p> <p><b>Владеть:</b> математическим аппаратом анализа экспериментальных данных, полученных с использованием различных методов кинетического исследования, методикой расчета кинетических параметров по основным теориям химической кинетики</p>	<p>мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на экзамене</p>

--	--