

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
и образовательным инновациям



О.Г. Прохоренко

22 июля 2023 г.

Регистрационный № УД-1049 /м.

## ГОМОГЕННЫЙ И ГЕТЕРОГЕННЫЙ КАТАЛИЗ

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:

7-06-0531-01 Химия

профилизация специальности:

Химический дизайн новых материалов

2023 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 7-06-0531-01-2023, учебного плана М44-5.5-04/уч., утвержденного 29.12.2022 г.

**СОСТАВИТЕЛИ:**

А.Е.Усенко, заведующий кафедрой физической химии, кандидат химических наук

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

О.В. Хрусталева, заместитель заведующего кафедрой общей химии по учебно-методической работе Белорусского государственного медицинского университета, кандидат химических наук, доцент.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физической химии химического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 4 от 07.12.2023 г.);

Научно-методическим советом Белорусского государственного университета  
(протокол № 4 от 21.12.2023 г.)

Заведующий кафедрой



А.Е.Усенко

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Катализаторы имеют широкое применение в современной промышленности, составляя до 80–90 % от общего числа промышленных процессов: например, получение аммиака, серной и азотной кислот, каталитический крекинг, нефтехимический синтез и очистка нефтепродуктов, получение синтетических полимеров, красок, лекарственных средств, строительных материалов и др. Большинство биохимических процессов протекает при участии катализаторов высокого избирательного действия – ферментов. Катализаторы и процессы с их участием находят применение в нетрадиционной энергетике, утилизации и конверсии возобновляемого сырья. Поэтому изучение данной дисциплины является актуальным и представляет интерес для специалистов с углубленным высшим образованием.

Учебная программа предполагает изучение природы и механизма каталитического действия, классификации и свойств современных катализаторов, кинетических закономерностей и моделей важнейших каталитических процессов как в гомогенных средах, так и на межфазных границах.

**Цель** учебной дисциплины «Гомогенный и гетерогенный катализ» состоит в формировании системы знаний и представлений у студентов о физико-химических закономерностях возникновения каталитических эффектов, принципах каталитического действия веществ разной природы, механизмах протекания на этих катализаторах процессов, применяющихся в крупно- и малотоннажной химии.

**Задачи учебной дисциплины** заключаются в ознакомлении студентов с методами расчета кинетических параметров и подходами к обоснованию возможных кинетических моделей практически значимых каталитических процессов.

**Место учебной дисциплины.** В системе подготовки специалиста с углубленным высшим образованием учебная дисциплина «Гомогенный и гетерогенный катализ» относится к модулю «Химия гетерогенных систем», являющемуся компонентом учреждения высшего образования.

В связи с тем, что изучаемая дисциплина носит междисциплинарный характер, для успешного освоения учебной программы и компетентного использования полученных знаний на практике необходимо иметь высшее образование первой степени по специальности «Химия».

## **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины «Гомогенный и гетерогенный катализ» должно обеспечить формирование следующих компетенций:

СК-4 прогнозировать физико-химические свойства, реакционную способность и каталитическую активность твердых тел на основе знания их морфологии, топологии, химического и фазового состава

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

### **знать:**

- основные понятия, принципы и теории катализа
- причины каталитического действия различных классов веществ
- физико-химические характеристики практически значимых катализаторов и методы их определения
- общие представления о механизмах и условиях протекания важнейших промышленных каталитических процессов

### **уметь:**

рассчитывать кинетические параметры практически значимых каталитических процессов при изменении количественного состава системы и внешних условий

· прогнозировать изменение каталитических свойств важнейших классов катализаторов

· корректно выбирать методы исследования физико-химических свойств катализаторов

### **владеть:**

· методами расчета кинетических параметров и подходами к обоснованию возможных кинетических моделей практически значимых каталитических процессов

В рамках образовательного процесса по данной учебной дисциплине студент должен также развить свой ценностно-личностный, духовный потенциал, сформировать качества патриота и гражданина, готового к активному участию в экономической, производственной, социально-культурной и общественной жизни страны.

## **Структура учебной дисциплины**

В соответствии с учебным планом учреждения высшего образования по специальности 7-06-0531-01 Химия (профилизация «Химический дизайн новых материалов») учебная дисциплина «Гомогенный и гетерогенный катализ» изучается во втором семестре первого года обучения. Форма получения углубленного высшего образования – очная.

Всего на изучение учебной дисциплины отведено 90 часов, в том числе 36 аудиторных часов, из них: лекции – 28 часов (из них 8 часов ДОТ), практические занятия – 4 часа, управляемая самостоятельная работа – 4 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма промежуточной аттестации – зачет.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### Тема 1. Общие представления о катализе.

1.1 Определение катализа и катализатора. Предмет каталитической химии. Краткий исторический экскурс развития представлений о катализе. Каталитические процессы в природе. Роль катализа в современной промышленности.

1.2 Принципы классификации катализаторов и каталитических процессов.

1.3 Реакционный путь в присутствии катализатора. Промежуточные соединения в катализе. Каталитический цикл. Слитный и стадийный механизмы каталитических превращений. Термодинамические и кинетические аспекты в катализе.

1.4 Основные характеристики катализаторов: активность, селективность, стабильность. Сравнение характеристик гомогенных и гетерогенных катализаторов.

### Тема 2. Гомогенный катализ.

2.1 Классификация гомогенных каталитических процессов. Гомогенный катализ в газовой фазе. Гомогенный катализ в жидкой фазе.

2.2 Особенности протекания каталитических реакций в растворах: клеточный эффект, взаимодействие с растворителем, реакции с участием ионов. Солевые эффекты в катализе.

2.3 Принципы расчёта константы скорости реакции в жидкой среде при диффузионном ограничении процесса (взаимодействие нейтральных частиц, заряженных частиц); при кинетическом ограничении процесса (влияние ионной силы растворителя, диэлектрической постоянной среды).

2.4 Кислотно-основный гомогенный катализ. Особенности кинетики специфического и общего кислотно-основного катализа. Функция кислотности Гаммета. рН-диаграммы Скрабала. Расчёт эффективной константы скорости каталитического процесса.

2.5 Электрофильный и нуклеофильный катализ. Кислоты и основания Льюиса. Классификация кислот и оснований по Пирсону (принцип ЖМКО). Закономерности и примеры реакций нуклеофильного катализа. Закономерности и примеры реакций электрофильного катализа.

2.6 Металлокомплексный катализ. Основные стадии. Правила Хиггинсона и Толмена. Правило Чатта. Примеры реакций, катализируемых комплексами

металлов: гидрирование, карбонилирование; окисление и метатезис олефинов, изомеризация, олигомеризация и полимеризация олефинов.

2.7 Окислительно-восстановительный гомогенный катализ. Автокатализ. Колебательные реакции.

### **Тема 3. Межфазный катализ.**

3.1 Катализ межфазного переноса (КМФП). Ионные пары в органической фазе. Экстракция ионных пар из водной фазы. Механизм реакций в нейтральных средах. Практическое использование катализа МФП: алкилирование, изомеризация, реакции присоединения, конденсации, элиминирования, гидролиз, нуклеофильное ароматическое замещение и другие реакции, проходящие в присутствии оснований.

### **Тема 4. Мицеллярный катализ.**

4.1 Физико-химические свойства водных растворов ПАВ. Модели распределения низкомолекулярных веществ между водной и мицеллярной фазами. Кинетические модели химических реакций  $n$ -го порядка в присутствии мицелл ПАВ.

### **Тема 5. Ферментативный катализ.**

5.1 Структурная организация ферментов. Активность ферментов. Кинетика ферментативных реакций: уравнение Михаэлиса-Ментен. Определение кинетических параметров ферментативных реакций.

5.2 Типы обратимого ингибирования. Обратимое конкурентное, неконкурентное и бесконкурентное ингибирование. Субстратное ингибирование.

### **Тема 6. Гетерогенный катализ.**

6.1 Особенности катализа твёрдыми катализаторами. Понятие активного центра гетерогенного катализатора. Теории гетерогенного катализ.

6.2 Стадии гетерогенного каталитического процесса. Методы определения скорость-лимитирующей стадии гетерогенно-каталитического процесса. Макрокинетика гетерогенно-каталитических процессов. Внешне- и внутридиффузионная области гетерогенно-каталитической реакции.

6.3 Потенциальная кривая гетерогенной каталитической реакции. Энергия активации гетерогенно- каталитического процесса.

6.4 Роль адсорбции в гетерогенных каталитических процессах. Адсорбция на энергетически однородной поверхности. Адсорбционная теория Лэнгмюра.

Нелэнгмюровские изотермы адсорбции. Кинетические модели Лэнгмюра-Хиншельвуда и Риделя-Или гетерогенной каталитической реакции на границе газ-твердое тело. Адсорбция на энергетически неоднородной поверхности.

6.5 Некоторые типы гетерогенных катализаторов: металлы и сплавы; оксиды и сульфиды переходных металлов; кислотно-основные катализаторы; цеолиты (молекулярные сита).

6.6 Области применения катализаторов: производство неорганических и органических веществ; нефтепереработка и нефтехимия; процессы преобразования энергии; катализ и проблемы экологии.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Очная форма получения углубленного высшего образования с применением дистанционных образовательных технологий (ДОТ)

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСП	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
		<b>20</b>		<b>4</b>			<b>4</b>	
		<b>8(ДОТ)</b>						
<b>1</b>	<b>Общие представления о катализе</b>	<b>3</b>						
1.1-1.4	<p>Определение катализа и катализатора. Краткий исторический экскурс развития представлений о катализе. Принципы классификации катализаторов и каталитических процессов. Реакционный путь в присутствии катализатора. Промежуточные соединения в катализе. Каталитический цикл. Слитный и стадийный механизмы каталитических превращений. Термодинамические и кинетические аспекты в катализе.</p> <p>Основные характеристики катализаторов: активность, селективность, стабильность.</p>	3						контрольная работа

	Сравнение характеристик гомогенных и гетерогенных катализаторов.							
<b>2</b>	<b>Гомогенный катализ.</b>	<b>10 2 (ДОТ )</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	
2.1-2.3	Классификация гомогенных каталитических процессов. Гомогенный катализ в газовой фазе. Гомогенный катализ в жидкой фазе. Особенности протекания каталитических реакций в растворах. Солевые эффекты в катализе. Принципы расчёта константы скорости реакции в жидкой среде при диффузионном ограничении процесса (взаимодействие нейтральных частиц, заряженных частиц); при кинетическом ограничении процесса (влияние ионной силы растворителя, диэлектрической постоянной среды).	1 2(ДОТ)	1				1	контрольная работа
2.4	Кислотно-основный катализ. Особенности кинетики специфического и общего кислотно-основного катализа. Функция кислотности Гаммета. рН-диаграммы Скрабала. Расчёт эффективной константы скорости каталитического процесса.	2	1				1	контрольная работа
2.5	Электрофильный и нуклеофильный катализ.	2						устный опрос

2.6	Металлокомплексный катализ. Основные стадии. Правила Хиггинсона и Толмена. Правило Чатта. Примеры реакций, катализируемых комплексами металлов	3						доклад
2.7	Окислительно-восстановительный гомогенный катализ. Автокатализ. Колебательные реакции	2						устный опрос
3	<b>Межфазный катализ</b>	<b>2 (ДОТ )</b>						
3.1	Катализ межфазного переноса (КМФП). Ионные пары в органической фазе. Экстракция ионных пар из водной фазы. Механизм реакций в нейтральных средах. Практическое использование катализа МФП: алкилирование, изомеризация, реакции присоединения, конденсации, элиминирования, гидролиз, нуклеофильное ароматическое замещение и другие реакции, проходящие в присутствии оснований.	2 (ДОТ )						доклад
4.	<b>Мицеллярный катализ.</b>	<b>2</b>						
4.1	Физико-химические свойства водных растворов ПАВ. Модели распределения низкомолекулярных веществ между водной и мицеллярной фазами. Кинетические модели химических реакций $n$ -го порядка в присутствии мицелл ПАВ.	2						доклад
5.	<b>Ферментативный катализ.</b>	<b>3</b>					<b>1</b>	

5.1	Структурная организация ферментов. Активность ферментов. Кинетика ферментативных реакций: уравнение Михаэлиса-Ментен. Определение кинетических параметров ферментативных реакций.	2					1	доклад
5.2	Типы обратимого ингибирования. Обратимое конкурентное, неконкурентное и бесконкурентное ингибирование. Субстратное ингибирование.	1						устный опрос
<b>6.</b>	<b>Гетерогенный катализ</b>	<b>4 2(ДО Т)</b>					<b>1</b>	
6.1-6.3	Особенности катализа твёрдыми катализаторами. Понятие активного центра гетерогенного катализатора. Стадии гетерогенного каталитического процесса. Методы определения скорость-лимитирующей стадии гетерогенно-каталитического процесса. Макрокинетика гетерогенно-каталитических процессов. Внешне- и внутридиффузионная области гетерогенно-каталитической реакции. Потенциальная кривая гетерогенной каталитической реакции. Энергия активации гетерогенно- каталитического процесса	2						контрольная работа
6.4	Роль адсорбции в гетерогенных каталитических процессах. Адсорбция на энергетически однородной поверхности. Адсорбционная теория Лэнгмюра. Нелэнгмюровские изотермы адсорбции. Кинетические модели Лэнгмюра-Хиншельвуда и Риделя-Или гетерогенной	2 2 (ДОТ )					1	контрольная работа

	каталитической реакции на границе газ-твердое тело. Адсорбция на энергетически неоднородной поверхности.							
6.5	Некоторые типы гетерогенных катализаторов: металлы и сплавы; оксиды и сульфиды переходных металлов; кислотно-основные катализаторы; цеолиты (молекулярные сита).		1					доклад
6.6	Области применения катализаторов: производство неорганических и органических веществ; нефтепереработка и нефтехимия; процессы преобразования энергии; катализ и проблемы экологии.		1					доклад

## **ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **Перечень основной литературы**

## **ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **Перечень основной литературы**

1. Романовский, Б. В. Основы катализа : учебное пособие / Б. В. Романовский. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2020. – 172 с.
2. Аветисов, А. К. Прикладной катализ : учебник / А. К. Аветисов, Л. Г. Брук ; под редакцией О. Н. Темкина. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 200 с.
3. Сибаров, Д. А. Катализ, каталитические процессы и реакторы : учебное пособие для вузов / Д. А. Сибаров, Д. А. Смирнова. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 200 с.

### **Перечень дополнительной литературы**

4. Чоркендорф, И. Современный катализ и химическая кинетика / И. Чоркендорф, Х. Наймантсведрайт - Долгопрудный : Интеллект, 2010. - 501 с.
5. Крылов, О. В. Гетерогенный катализ : учеб. пособие / О. В. Крылов. - Москва : Академкнига, 2004. - 680с.
6. Байрамов, В. М. Основы химической кинетики и катализа : учебное пособие / В.М.Байрамов; Под ред. В.В.Лунина. - М. : Academia, 2003. - 252с.
7. Демлов, Э. Межфазный катализ / Э. Демлов, З. Демлов ; пер. с англ. С. С. Юфита ; под ред. Л. А. Яновской. - Москва : Мир, 1987. - 485 с.
8. Накамура, А. Принципы и применение гомогенного катализа / А. Накамура, М. Цуцуи ; пер. с англ. А. А. Белого. - Москва : Мир, 1983. - 231 с.
9. Боресков, Г. К. Гетерогенный катализ / Г. К. Боресков - Москва : Наука, 1986. - 303 с.
10. Нанокатализ в современной химии и химической технологии: монография. / Ю. В. Попов [и др.] – Волгоград : ВолгГТУ, 2016. – 272 с.
11. Физическая химия.: учебник для вузов: В 2 кн. / под. ред. К.С. Краснова – 3-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2001. - Кн. 2: Электрохимия. Химическая кинетика и катализ. – 319 с.
12. Колесников, И.М. Катализ и производство катализаторов. / И.М. Колесников – М. : Техника, 2004. –399 с.
13. Беркман, С. Катализ в неорганической и органической химии : [в 2 кн.]. / С. Беркман, Д. Моррел, Г. Эглофф ; пер. с англ. под ред. Г. М. Цигуро. - Москва ; Ленинград : Гостоптехиздат, 1949. - 750 с.
14. Хенрици-Оливэ, Г. Координация и катализ / Г. Хенрици-Оливэ, С. Оливэ ; пер. с англ. С. Л. Давыдовой. - Москва : Мир, 1980. - 421 с.

15. Бендер, М. Л. Биоорганическая химия ферментативного катализа / М. Бендер, Р. Бергерон, М. Комияма ; пер. с англ. А. Д. Рябова, Ю. Л. Хмельницкого ; под ред. И. В. Березина. - Москва : Мир, 1987. - 352 с.
16. Khan, M. N. Micellar catalysis / Surfactant Science Series – CRC Press, 2006. – V. 133.– 482 p.
17. Grison, C., Escande, V., Biton, J. Ecocatalysis: A New Integrated Approach to Scientific Ecology. –Elsevier, 2015.
18. Rothenberg, G. Catalysis: Concepts and Green Applications – WILEY-VCH Verlag, 2008. – 275 p.
19. Green Chemistry : Process Technology and Sustainable Development / Tatsiana Savitskaya [et al.]. - Hangzhou : Zhejiang University Press : Springer, 2022. – 147 p.
20. Пивоварова, Н.А. Гетерогенный катализ в нефтепереработке: учебное пособие / Н.А. Пивоварова, Л.Б. Кириллова, А.Ю. Морозов – Астрахань : АГТУ, 2015. – 196 с.
21. Нечепуренко, Ю.В. Коммерциализация результатов научно-технической деятельности: научно-практическое пособие / Ю.В. Нечепуренко. – Минск : НИИ ФХП БГУ, 2012. – 225 с.
22. Колпакова, Н.А. Сборник задач по химической кинетике / Н.А. Колпакова, С.В. Романенко, В.А. Колпаков. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 280 с.
23. Сборник задач по химической кинетике и катализу: учебное пособие / Е.Н. Савинов [и др.]. – Новосибирск : Новосиб. гос. ун-т., 2009. – 148 с.

## Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки

Текущий контроль качества усвоения знаний по учебной дисциплине осуществляется с использованием следующих форм диагностики компетенций:

1. Устный опрос.
2. Письменные контрольные работы по темам № 1, 2 и 6.
3. Доклады.
4. Устный зачет по дисциплине.

Защита доклада предполагает подготовку презентации. При оценивании содержания доклада необходимо обратить внимание на полноту раскрытия темы, последовательность изложения, используемые источники и их интерпретацию, корректность оформления.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Гомогенный и гетерогенный катализ» учебным планом предусмотрен зачёт.

### Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

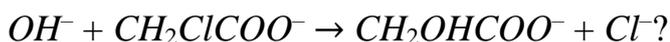
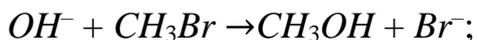
**Тема 1. «Общие представления о катализе», Тема 2. «Гомогенный катализ» (2 ч.)**

1. Поясните термины «гомолитический механизм катализа» и «гетеролитический механизм катализа». Приведите примеры таких процессов.

2. Какие виды активности катализаторов вам известны и каким набором экспериментальных данных необходимо обладать, чтобы их оценить?

3. Поясните термин «каталитический цикл»? Приведите несколько примеров КЦ.

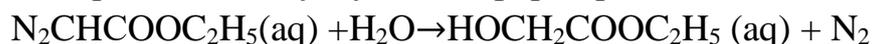
4. Как будут зависеть от диэлектрической постоянной среды и ионной силы раствора константы скорости следующих реакций:



Ответ обоснуйте.

5. По виду рН-диаграммы Скрабала определите тип катализа и выведите выражение для расчёта эффективной константы скорости реакции (студентам предлагаются различные виды диаграмм).

6. Реакция гидролиза diazoуксусного эфира протекает по схеме:



Катализатором данного процесса являются ионы водорода. Эффективная константа скорости процесса изменяется с концентрацией ионов водорода следующим образом:

$C_{\text{H}^+} \times 10^3$ , моль/дм <sup>3</sup>	0,46	0,87	1,58	3,23
$k_{\text{эфф}} \times 10^2$ , дм <sup>3</sup> /(моль с)	1,68	3,20	5,78	12,18

Постройте график зависимости  $k_{\text{эфф}} = f(C_{\text{H}^+})$ , определите постоянные этого уравнения:  $k_0$ ,  $k_{\text{H}^+}$ .

7. Проанализируйте приведённые стадии с использованием терминологии металлокомплексного катализа:



8. Перечислите и поясните элементарные стадии в реакциях металлокомплексных соединений. Проиллюстрируйте реакции, протекающие по внутри- и внешнесферному механизму металлокомплексного катализа.

9. Каковы различия в процессах окислительного сочетания и окислительного присоединения?

10. Запишите механизм процессов фотодеструкции галогенуглеводородов и оксидов азота в озоновом слое. Получите выражение для скорости разложения одного из них, применяя соответствующее приближение. Почему этот процесс можно отнести к каталитическому?

**Форма контроля** – устный опрос, контрольная работа, доклад.

**Тема 5. «Ферментативный катализ» Тема 6. «Гетерогенный катализ» (2 ч.)**

1. Фермент трансаминаза осуществляет реакцию переноса аминогруппы с глутаминовой кислоты на щавелево-уксусную. Рассчитайте параметры уравнения Михаэлиса-Ментен, исходя из приведенных ниже данных:

$C_{\text{H}^+} \times 10^6$ , моль/дм <sup>3</sup>	0,30	0,50	2,00	4,00	10,00
$v_0 \times 10^6$ , моль/(дм <sup>3</sup> *с)	0,17	0,27	0,65	0,78	0,81

Какими дополнительными данными необходимо обладать, чтобы рассчитать  $k_2$  для этой реакции?

2. При добавлении ингибитора в ферментативную систему, подчиняющуюся схеме Михаэлиса–Ментен, максимальная скорость реакции уменьшилась в 5 раз, а  $K_M$  не изменилась. Предложите схему ингибирования и рассчитайте  $K_I$ , если концентрация ингибитора равнялась  $4 \times 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup>.

3. При изучении гетерогенных каталитических реакций применяют термины «микрокинетика» и «макрокинетика» процесса. Поясните эти термины.

4. Изобразите потенциальные кривые для реакции типа  $A \rightarrow P$  с участием гетерогенного катализатора. Поясните термин «кажущаяся энергия активации» и «истинная энергия активации».

5. Изучите процесс окисления CO кислородом  $O_2$  на поверхности катализатора из Pt ( $CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2$ ). Получите выражения для порядков реакции по CO,  $O_2$  и  $CO_2$ , а также для кажущейся энергии активации этого процесса.

6. В таблице приведены данные по адсорбции CO на активированном угле при  $0^\circ C$ :

p, (мбар)	133	267	400	533	667	800	933
V, (см <sup>3</sup> )	10.3	19.3	27.3	34.1	40.0	45.5	48.0

Определите, подчиняются ли полученные данные изотерме Лэнгмюра? Рассчитайте параметры изотермы.

7. В научной литературе упоминается, что ароматизация углеводородов происходит с большей скоростью на поверхности Pt(111), чем на поверхности Pt(100). Объясните это явление.

8. Оксиды  $Cu_2O$ , NiO и CoO обладают высокой адсорбционной способностью по отношению к CO. Объясните природу этого явления. Как изменятся свойства оксидов при легировании их  $Li_2O$ ?

9. Поверхность алюмосиликатов можно отнести к сильным кислотам Бренстеда, а силикагеля – к слабым. Почему введение  $Al^{3+}$  в  $SiO_2$  приводит к увеличению кислотности?

10. Необходимо определить следующие свойства твёрдого катализатора: а) поверхностные комплексы; б) число и тип активных центров; в) удельную поверхность и размер пор; г) распределение элементов на поверхности; д) элементный состав объёма катализатора; е) фазовый состав; ж) размер кристаллитов.

Какими методами можно определить каждую из характеристик?

11. Какую информацию о свойствах катализатора позволяет получить температурно-программируемая десорбция?

12. Необходимо провести следующие промышленные процессы: а) алкилирование бензола этиленом, б) крекинг высших УВ, в) дегидрирование амидов до аминов, г) дегидрирование этилбензола в стирол, д) этерификация, е) гидрирование CO до метанола; ж) гидрирование растительных масел; з) изомеризация пентана в изопентан, и) окисление

аммиака до оксидов азота, к) окисление  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_3$ , л) риформинг для получения ароматических УВ, м) окисление метанола до формальдегида.

Выберите наиболее подходящие катализаторы для каждого из процессов: Pt/носитель,  $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ , Pt,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Ag, алюмосилкаты, цеолиты, Ni, оксиды железа/промотор, ионообменные смолы, CuO.

**Форма контроля** – устный опрос, контрольная работа, доклад.

### **Примерная тематика практических занятий**

Занятие № 1. «Гомогенный катализ»

Занятие № 2. «Гетерогенный катализ»

### **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса используется **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

- освоение содержание образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- использование процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

При организации образовательного процесса также используется **метод анализа конкретных ситуаций (кейс-метод)**, который предполагает:

- приобретение магистрантом знаний и умений для решения практических задач и развития инновационной восприимчивости и способности к инновационной деятельности;
- анализ ситуации, используя профессиональные знания, собственный опыт, дополнительную литературу и иные источники.

### **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- поиск и обзор литературы и электронных источников по заданной проблеме курса и при подготовке доклада;
- выполнение домашнего задания.

Обучающиеся также могут использовать материалы созданного на портале [educhem.bsu.by](http://educhem.bsu.by) курса «Гомогенный и гетерогенный катализ».

### Примерные темы докладов

Темы докладов формируются не только на основе практической значимости каталитического процесса и применения определенных классов катализаторов, но и с учётом научно-исследовательского направления деятельности магистранта, включающего решение частной практической задачи. Защита доклада предполагает подготовку презентации.

1. Металлокомплексный катализ: реакции кросс-сочетания.
2. Металлокомплексный катализ: изомеризация алкенов.
3. Металлокомплексный катализ: метатезис алкенов.
4. Межфазный катализ: реакции окисления.
5. Межфазная поликонденсация: получение поликарбоната.
6. Применение катализаторов в синтезе противоопухолевых препаратов.
7. Применение ферментов в синтезе полимеров.
8. Катализаторы синтеза биоразлагаемых полимеров.
9. Катализаторы катионной полимеризации.
10. Катализаторы синтеза полиуретанов.
11. Полупроводниковые катализаторы.
12. Катализаторы на основе ферритов.
13. Катализаторы синтеза углеводов из метанола
14. Каталитический крекинг углеводов.
15. Каталитическое гидрирование металлами: гидрирование жиров.
16. Синтез Фишера-Тропша.
17. Каталитический конвертер. Катализатор трёх путей.
18. Фотокатализ: основные понятия и типы катализаторов.
20. Электрокатализ: основные понятия и типы катализаторов
21. Цеолит Y (тип FAU) и его модификация: применение в процессе каталитического крекинга и гидрокрекинга углеводородных фракций; алкилирования ароматических углеводов.
22. Катализаторы фирмы «UOP» (алюмоплатиновые катализаторы) и «Mobil Oil Corp.» (на основе цеолита ZSM-5) в процессах получения п-ксилола.
23. Катализаторы обезвреживания газовых выбросов предприятий, производящих азот и аммиак.

## Примерный перечень вопросов к зачету

1. Определение катализа и катализатора. Основные принципы катализа.
2. Классификации катализаторов и каталитических процессов.
3. Реакционный путь в присутствии катализатора. Термодинамические и кинетические аспекты в катализе.
4. Слитный и стадийный механизмы каталитических превращений. Промежуточные соединения в катализе.
5. Каталитический цикл.
6. Основные характеристики катализаторов: активность, селективность, стабильность.
7. Сравнение характеристик гомогенных и гетерогенных катализаторов.
8. Классификация гомогенных каталитических процессов.
9. Особенности гомогенного катализа в газовой фазе.
10. Особенности протекания каталитических реакций в растворах: клеточный эффект, взаимодействие с растворителем, реакции с участием ионов.
11. Солевые эффекты в катализе.
12. Принципы расчёта константы скорости реакции в жидкой среде при диффузионном ограничении процесса (взаимодействие нейтральных частиц, заряженных частиц).
13. Принципы расчёта константы скорости реакции в жидкой среде при кинетическом ограничении процесса (влияние ионной силы растворителя, диэлектрической постоянной среды).
14. Особенности кинетики специфического и общего кислотно-основного катализа.
15.  $pH$ -диаграммы Скрабала. Расчёт эффективной константы скорости кислотно-основного каталитического процесса.
16. Электрофильный катализ.
17. Нуклеофильный катализ.
18. Металлокомплексный катализ: основные элементарные стадии.
19. Правила и закономерности протекания элементарных стадий металлокомплексного катализа.
20. Примеры реакций, катализируемых комплексами металлов.
21. Окислительно-восстановительный гомогенный катализ в газовой фазе.

22. Окислительно-восстановительный гомогенный катализ в конденсированной фазе.
23. Автокатализ. Типы кинетических кривых участников реакции.
23. Колебательные реакции. Простейшие модели реакции Белоусова-Жаботинского.
24. Катализ межфазного переноса (КМФП). Основные типы межфазных границ и применяемых катализаторов.
25. Механизм реакций КМФП в нейтральных средах.
26. Практическое использование катализа МФП.
27. Мицеллярный катализ: определение и принципы каталитического действия.
28. Кинетические модели химических реакций  $n$ -го порядка в присутствии мицелл ПАВ.
29. Ферментативный катализ: определение, структурная организация ферментов и их классификация.
30. Активность ферментов и условия ее определения.
31. Кинетическая модель Михаэлиса-Ментен ферментативных реакций. Вывод уравнения Михаэлиса-Ментен.
32. Особенности планирования эксперимента для определения кинетических параметров ферментативной реакции.
33. Методы определения кинетических параметров ферментативных реакций, подчиняющихся модели Михаэлиса-Ментен.
34. Типы обратимого ингибирования ферментативных реакций.
35. Определение кинетических параметров обратимого конкурентного ингибирования.
36. Определение кинетических параметров обратимого неконкурентного ингибирования.
37. Определение кинетических параметров обратимого бесконкурентного ингибирования.
38. Особенности катализа твёрдыми катализаторами. Понятие активного центра гетерогенного катализатора.
39. Теории гетерогенного катализ.
40. Стадии гетерогенного каталитического процесса.
41. Методы определения скорость-лимитирующей стадии гетерогенно-каталитического процесса.
42. Макрокинетика гетерогенно-каталитических процессов. Внешне- и внутридиффузионная области гетерогенно-каталитической реакции.

43. Потенциальная кривая гетерогенной каталитической реакции. Энергия активации гетерогенно- каталитического процесса.
44. Роль адсорбции в гетерогенных каталитических процессах.
45. Адсорбция на энергетически однородной поверхности. Адсорбционная теория Лэнгмюра.
46. Нелэнгмюровские изотермы адсорбции.
47. Кинетические модели Лэнгмюра-Хиншельвуда и Риделя-Или гетерогенной каталитической реакции на границе газ-твердое тело.
48. Адсорбция на энергетически неоднородной поверхности.
49. Некоторые типы гетерогенных катализаторов: металлы и сплавы; оксиды и сульфиды переходных металлов; кислотно-основные катализаторы; цеолиты (молекулярные сита).
50. Области применения гетерогенных катализаторов:  
производство неорганических и органических веществ;  
нефтепереработка и нефтехимия;  
процессы преобразования энергии;  
катализ и проблемы экологии.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО  
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на \_\_\_\_ / \_\_\_\_ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры физической химии Белорусского государственного университета (протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.)

Заведующий кафедрой

кандидат химических наук \_\_\_\_\_ А.Е. Усенко  
(ученая степень, ученое звание) (подпись) (И.О.Фамилия)

**УТВЕРЖДАЮ**

кандидат химических наук,  
доцент \_\_\_\_\_ А.В. Зураев  
(ученая степень, ученое звание) (подпись) (И.О.Фамилия)