

**Программа утверждена на заседании  
Ученого Совета химического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова  
Протокол № 7 от 04 октября 2017 г.**

**1. Рабочая программа дисциплины:** Теория и практика гетерогенного катализа

**Название дисциплины на английском языке:** Theory and practice of heterogeneous catalysis

**Краткая аннотация:**

Спецкурс предлагается для обучения аспирантов Химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Целью курса является предоставление фундаментальной теоретической подготовки и навыков практического применения знаний в области современных подходов к гетерогенно-каталитическим химическим процессам и способам синтеза каталитических систем. Курс обеспечивает глубокое понимание основных принципов и теорий гетерогенного катализа, знание основ приготовления и различных типов гетерогенных катализаторов, умение находить и применять физико-химические методы для правильного описания каталитических результатов и свойств катализаторов, а также базовые навыки способов представления научных результатов. Данный курс способствует устойчивому усвоению знаний в области катализа, глубокому пониманию особенностей проведения и описания гетерогенно-каталитических реакций и подходов к выбору методик приготовления, исследования и направлений применения гетерогенных катализаторов, особенностей проведения и описания гетерогенно-каталитических реакций.

**2. Уровень высшего образования** – подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре.

**3. Направление подготовки:** 04.06.01 Химические науки, **направленность:** «02.00.04-физическая химия» и «02.00.15-кинетика и катализ»

**4. Место дисциплины (модуля) в структуре ООП:** вариативная часть ООП, блок «Дисциплины (модули)»

**5. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)**

| <b>Формируемые компетенции<br/>(код компетенции)</b>   | <b>Планируемые результаты обучения по дисциплине<br/>(модулю)</b>  |
|--|--|
| <p><b>УК-1:</b><br/>способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</p>  | <p><b>З1(УК-1) Знать:</b> современные критерии и методы оценки научных достижений<br/><b>У1(УК-1) Уметь:</b> квалифицированно ставить и решать научные задачи, в том числе в междисциплинарных областях<br/><b>В1(УК-1) Владеть:</b> навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</p>                               |
| <p><b>УК-2:</b><br/>способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки</p>   | <p><b>З1(УК-2) Знать:</b> современные методы и подходы в области комплексного физико-химического исследования<br/><b>В1(УК-2) Владеть:</b> навыками планирования в профессиональной деятельности в сфере научных исследований</p>  |
| <p><b>ОПК-1:</b><br/>способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</p>  | <p><b>У1 (ОПК-1) Уметь</b> выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования (для определения структуры и свойств гетерогенных катализаторов)</p>  |
| <p><b>ПК-4:</b><br/>способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности (научной специальности) 02.00.04 Физическая химия</p> | <p><b>У16(ПК-4) Уметь:</b> применять основные законы химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенно-каталитических систем.<br/><b>В8(ПК-4) Владеть:</b> навыками обобщения и анализа результатов физико-химических и каталитических исследований<br/><b>В9(ПК-4) Владеть:</b> целостной системой знаний о гетерогенном катализе и механизмах, лежащих в основе промышленно-важных гетерогенно-каталитических</p> |

|  |   |
|--|---|
| ПК-13:<br>способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности (научной специальности) 02.00.15 Кинетика и катализ | реакций<br><i>З1(ПК-13) Знать:</i> область применения и ограничения применимости физико-химических методов при определении свойств гетерогенных катализаторов<br><i>У3(ПК-13) Уметь:</i> критически анализировать и обрабатывать экспериментальные результаты каталитических испытаний гетерогенных катализаторов |
|--|---|

**6. Объем дисциплины (модуля) 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 часов, из которых 48 часов составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (36 часов - занятия лекционного типа, 6 часа – групповые консультации, 6 часов – мероприятия текущего контроля успеваемости, 4 часа – текущая аттестация), 56 часов составляет самостоятельная работа учащегося.

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

В специалитете или бакалавриате и магистратуре должны быть освоены общие курсы «Математический анализ», «Неорганическая химия», «Органическая химия» «Физическая химия», «Химическая технология».

## 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, часы из них |                           |                        |                             |  |       | Самостоятельная работа, часы из них |                              |       |
|  |              | Занятия лекционного типа и     | 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 |
| <p><b>Тема 1. Общие принципы катализа. Типы катализаторов. Теории гетерогенного катализа.</b><br/> Термодинамический и кинетический аспекты действия катализаторов. Классификация катализаторов и каталитических процессов. Основные характеристики катализаторов: активность, селективность, стабильность. Каталитический цикл.<br/> Связь энергии взаимодействия с поверхностью и каталитической активности, принцип Сабатье. Теория Баландина. Взаимосвязь электронного строения металлов и каталитической активности, применение зонной теории. Основные подходы для предсказания каталитических свойств металлов.</p> | 4            | 4                              |                           |                        |                             |  | 4     |                                     |                              |       |

|   |    |    |  |   |  |   |    |    |  |    |
|---|----|----|--|---|--|---|----|----|--|----|
|   |    |    |  |   |  |   |    |    |  |    |
| <b>Тема 2. Реакционная способность поверхности. Размерные эффекты в катализе.</b><br>Физическая и химическая адсорбция. Основные принципы хемосорбции. Диссоциативная адсорбция. Реакционная способность поверхности, активация молекул. Связь каталитической активности и электронного строения. Перестройка поверхности под действием реакционной среды. Активация и дезактивация катализаторов. Механизм Марса ван Кревелена. Эффект структурной чувствительности в гетерогенном катализе. Зависимость каталитической активности от размера и формы частиц.  | 4  | 4  |  |   |  |   | 4  |    |  |    |
| <b>Тема 3. Методы приготовления гетерогенных катализаторов.</b><br>Общие принципы приготовления катализаторов. Методы синтеза гетерогенных катализаторов: сплавление, осаждение, соосаждение, золь-гель, выщелачивание, методы селективного удаления компонентов, гидролиз в пламени и др.). Особенности экспериментального проведения синтеза в каждом методе. Влияние условий приготовления на физико-химические свойства получаемых катализаторов. Способы синтеза дисперсных частиц на поверхности носителя (методы пропитки, осаждения, ионный обмен, химическое паровое осаждение, лазерная абляция, осаждение из коллоидной дисперсии и др.). Влияние условий приготовления на форму, размер и распределение частиц. Способы варьирования степени взаимодействия металл-носитель. Закрепленные катализаторы. | 22 | 8  |  | 2 |  | 2 | 12 | 10 |  | 10 |
| <b>Тема 4. Физико-химические методы для контроля свойств гетерогенных катализаторов.</b><br>Применение физико-химических методов исследования для   | 32 | 10 |  | 2 |  | 2 | 14 | 18 |  | 18 |

|   |    |   |  |   |  |   |    |    |  |    |
|---|----|---|--|---|--|---|----|----|--|----|
| <p>определения пористой структуры и химического состава гетерогенных катализаторов. Возможности и границы применимости методов. Способы исследования свойств поверхности и структуры активных центров.</p> <p>Использование физико-химических методов для оптимизации методик приготовления гетерогенных катализаторов.</p> <p>Способы определения содержания активного металла в нанесенных гетерогенных катализаторах.</p> <p>Особенности физико-химического исследования свойств гетерогенных катализаторов при малом содержании активного металла.</p> <p>Использование физико-химических методов исследования для определения причин дезактивации гетерогенных катализаторов.</p> <p>Экспериментальные особенности подготовки образцов для исследования и интерпретации результатов исследования.</p> <p>Пробоподготовка образцов для исследования и интерпретация результатов исследования. Возможные ошибки при определении параметров гетерогенных катализаторов при исследовании физико-химическими методами.</p> <p>Методы: электронная микроскопия, РФА, РФЭС, атомной абсорбции, температурно-программированные методы ТПВ/ТПО/ТПД, ДСК-ТГ, ИК спектроскопия адсорбированных молекул, EXAFS, адсорбционные методы и др.</p> |    |   |  |   |  |   |    |    |  |    |
| <p><b>Тема 5. Кинетические методы исследования гетерогенно-каталитических реакций</b></p> <p>Определение кинетических параметров и каталитической активности. Особенности экспериментального проведения каталитических реакций и расчет кинетических параметров в реакторах различных типов. Реакторы с импульсной подачей реагентов. Учет диффузии при изучении кинетики гетерогенно-каталитических реакций. Возможности</p>   | 26 | 6 |  | 2 |  | 2 | 10 | 16 |  | 16 |

|  |            |           |  |          |  |          |           |           |           |           |
|--|------------|-----------|--|----------|--|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| управления селективностью реакции за счет макрокинетических параметров.  |            |           |  |          |  |          |           |           |           |           |
| <b>Тема 6. Описание, обсуждение и представление результатов исследования гетерогенно-каталитических реакций.</b><br>Основные подходы к анализу экспериментальных данных. Сравнение результатов физико-химических исследований и каталитической активности. Последовательность изложения результатов исследования. Особенности в представлении результатов в форме тезисов, доклада и научной статьи. | 16         | 4         |  |          |  |          | 4         | 2         | 10        | 12        |
| Промежуточная аттестация: <i>зачет</i>   | 4          |           |  |          |  |          | 4         |           |           |           |
| <b>Итого</b>   | <b>108</b> | <b>36</b> |  | <b>6</b> |  | <b>6</b> | <b>52</b> | <b>46</b> | <b>10</b> | <b>56</b> |

**8. Образовательные технологии:** Преподавание курса проводится в форме лекционных занятий с использованием мультимедийных презентаций. Занятия проводятся с привлечением результатов исследований, полученных непосредственно автором программы. Примеры, демонстрации и задания составлены на основе реальных экспериментальных данных, способствующих глубокому пониманию и усвоению материала курса.

**9. 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.

**10. Ресурсное обеспечение:** Перечень основной и вспомогательной учебной литературы ко всему курсу

**Основная литература**(базовый учебник выделен курсивом):

1. Чокендорф И., Наймантсведрайт Х. *«Современный катализ и химическая кинетика»*, ISBN: 978-5-91559-044-0. Издательство: Интеллект, 2010 г., 501 стр.
2. Сетерфилд Ч. Практический курс гетерогенного катализа. М.: Мир, 1984

3. Вудраф Д., Делчар Т.. Современные методы исследования поверхности, М., Мир, 1989

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

#### **Дополнительная литература:**

1. Handbook of Heterogeneous Catalysis, (G.Ertl, H.Knozinger and J.Weitkamp, Eds.), VCH Publ., 1997

2. Octave Levenspiel Chemical Reaction Engineering, John Wiley & Sons, 1999, 688 p.

3. Экспериментальные методы исследования катализа (ред. Р.Андерсон), М., Мир, 1972

4. Thomas J.M., Thomas W. J. Principles and Practice of Heterogeneous Catalysis» Wiley-VCH, 1996

**Интернет-ресурсы:** База данных Национального института стандартов и технологий NIST (<http://www.nist.gov>)

**11. Язык преподавания** - русский

**12. Преподаватели:**

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

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

13.1. Планируемые результаты обучения для формирования компетенций п.5 и соответствующие им критерии оценивания приведены в Приложении 1.

13.2. Образцы оценочных средств для текущего контроля усвоения материала и промежуточной аттестации - зачета.

**Вопросы и задачи** (для решения в качестве домашних заданий):

\* приведены общие формулировки типовых заданий. Каждому студенту для решения выдается свой набор исходных данных.

1. Определите порядок реакции и константу скорости для каталитической реакции, если известна зависимость убыли концентрации исходного вещества от времени при различных температурах реакции. Что можно сказать о значении энергии активации этой реакции?

2. Рассчитайте ошибку в определении значений константы скорости в случае, если не учитывать изменение объема реакционной смеси за счет добавления твердого гранулированного катализатора. При каких значениях загрузки катализатора ошибка становится значимой?
3. Определите порядок реакции и константу скорости для каталитической реакции, проводимой в реакторе проточного типа, если известны значения концентрации исходного вещества на выходе из реактора при различных скоростях потока.
4. Проанализируйте экспериментальные данные: почему не совпадает элементный состав катализатора, определенный методом РФЭС и рентгено-флуоресцентного анализа
5. Проанализируйте вид приведенных изотерм адсорбции/десорбции. Что можно сказать о пористой структуре образцов?
6. Примените различные для приведенной экспериментальной изотермы адсорбции. Какое уравнение наиболее хорошо описывает экспериментальные данные? Проанализируйте ответ.
7. На основании известных Вам методов синтеза катализаторов предложите алгоритм синтеза нанесенного  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$  катализатора. Какие физико-химические методы можно использовать для контроля процесса приготовления и свойств конечного образца?

#### **Вопросы для подготовки:**

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.
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.
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? Сложности при определении распределения пор по размерам.
16. Использование физико-химических методов для определения пористой структуры гетерогенных катализаторов.
17. Использование физико-химических методов для определения элементного состава гетерогенных катализаторов.
18. Использование физико-химических методов для определения электронного состояния химических элементов на поверхности катализаторов.
19. Применение молекул-зондов для исследования свойств поверхности гетерогенных катализаторов.
20. Возможные ошибки при определении параметров гетерогенных катализаторов при исследовании физико-химическими методами. Приведите примеры.
21. Какие физико-химические методы эффективны при исследовании нанесённых наноразмерных частиц металлов?
22. Особенности определения содержания активного металла в нанесенных гетерогенных катализаторах методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Пробоподготовка образцов для исследования и интерпретация результатов исследования.
23. Применение физико-химических методов исследования для оптимизации методик приготовления гетерогенных катализаторов и определения параметров получаемых систем.
24. Температурно-программированные методы для оптимизации методик приготовления гетерогенных катализаторов
25. Температурно-программированные методы для исследования свойств гетерогенных катализаторов
26. Способы определения порядка реакции *31(УК-1)* **Знать:** современные критерии и методы оценки научных достижений и константы скорости из экспериментальных данных.
27. Управление селективностью образования продуктов в параллельных и последовательных реакциях в реакторах различного типа.

### **Пример контрольного задания для зачета**

Серию катализаторов Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> готовили методом осаждения гидроксида никеля на порошок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Прекурсоры катализатора прокаливали при температурах 500, 600, 700, 800°C. Металл восстанавливали при температуре 300 °С. Каталитическую активность сравнивали в реакции газофазного гидрохлорирования хлорбензола в проточной системе в интервале температур 150-450°C с шагом 50°C. Для этой серии катализаторов проведены исследования методами

низкотемпературной адсорбции/десорбции азота, температурно-программированного восстановления, РФЭС, СЭМ (результаты исследований прилагаются).

Как Вы считаете, с чем связана полученная зависимость каталитической активности от температуры прокаливания образца? Предложите возможные причины дезактивации катализатора при длительном испытании. Какие дополнительные физико-химические исследования необходимо провести для подтверждения Ваших предположений? Какие результаты Вы ожидаете получить в результате этих исследований?

### **Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения**

Текущий контроль знаний студента осуществляется в виде небольших заданий и устной беседы в ходе лекционных занятий.

Промежуточная аттестация по курсу проводится в форме устного выступления с докладом по итогам обучения. Для подготовки выступления необходимо проанализировать предложенные экспериментальные данные и предложить схему дальнейшего исследования для объяснения экспериментальных зависимостей. «Зачет» выставляется в случае успешного выступления, удовлетворительных ответов на вопросы слушателей и грамотно поставленных вопросов другим выступающим участникам. Протокол приема зачета подписывается преподавателем, принимающим зачет.

Приложение 1

Оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине «Современная физическая химия» на основе карт компетенций выпускников

| РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)  | КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю) и ШКАЛА ОЦЕНИВАНИЯ |   |  |  |  | ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ                                   |
|--|---|---|--|--|--|--|
|  | 1   | 2   | 3  | 4  | 5  |  |
| <i>З1(УК-1)</i> <b>Знать:</b> современные критерии и методы оценки научных достижений                                    | Отсутствие знаний   | Фрагментарные знания о методах научно-исследовательской деятельности  | Неполные знания о методах, применяемых для приготовления и исследования гетерогенных катализаторов                             | Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания о методах, применяемых для приготовления и исследования гетерогенных катализаторов        | Сформированные и систематические знания о методах, применяемых для приготовления и исследования гетерогенных катализаторов, и областях из применимости | Зачет в форме выступления по теме контрольного задания |
| <i>У1(УК-1)</i> <b>Уметь:</b> квалифицированно ставить и решать научные задачи, в том числе в междисциплинарных областях | Отсутствие умений   | Частично усвоенное умение ставить и решать научные задачи в области исследования свойств гетерогенных катализаторов | Несистематические и шаблонные умения ставить и решать научные задачи в области исследования свойств гетерогенных катализаторов | Сформированные, но содержащие отдельные пробелы умения ставить и решать научные задачи в области исследования свойств гетерогенных катализаторов | Сформированное умение квалифицированно ставить и решать научные задачи в области исследования свойств гетерогенных катализаторов                       | Зачет в форме выступления по теме контрольного задания |
| <i>В1(УК-1)</i> <b>Владеть:</b> навыками анализа методологических  | Отсутствие навыков  | Имея базовые представления об основных законах  | В общих чертах понимает подходы и способы  | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы  | Способен свободно и аргументированно   | Зачет в форме выступления по теме                      |

|   |                    |  |  |  |   |  |
|---|--------------------|--|--|--|---|--|
| проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях |                    | химии, не умеет применять их для обсуждения результатов  | обсуждения результаты физико-химических исследований гетерогенных катализаторов  | применение навыков обсуждения результатов физико-химических исследований   | обсуждать результаты физико-химических исследований гетерогенных катализаторов  | контрольного задания                                   |
| <i>З1(УК-2) Знать:</i> современные методы и подходы в области комплексного физико-химического исследования        | Отсутствие знаний  | Фрагментарные знания принципов работы физико-химических методов исследования гетерогенных катализаторов        | Неполные и несистематические знания основ физико-химических методов, применяемых для исследований гетерогенных катализаторов | Сформированные, но содержащие отдельные неточности, знания научных основ и принципов работы физико-химических методов, применяемых для исследований гетерогенных катализаторов | Сформированные систематические знания научных основ и принципов работы физико-химических методов, применяемых для исследований гетерогенных катализаторов, а также областей их применимости | Зачет в форме выступления по теме контрольного задания |
| <i>В1(УК-2) Владеть:</i> навыками планирования в профессиональной деятельности в сфере научных исследований       | Отсутствие навыков | Допускает существенные ошибки при планировании методик приготовления и комплексного исследования катализаторов | Способен решать типовые задачи планирования методик приготовления и комплексного исследования                                | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков планирования методик приготовления и комплексного исследования  | Способен свободно решать и критически анализировать задачи по планированию методик приготовления и комплексного исследования  | Зачет в форме выступления по теме контрольного задания |
| <i>У1(ОПК-1) Уметь</i> выбирать и   | Отсутствие         | Не имеет четкого представления о   | Имея теоретические   | Умеет применять знания и выбирать  | Квалифицированно применяет знания и   | Зачет в форме выступления                              |

|   |                    |   |  |  |   |  |
|---|--------------------|---|--|--|---|--|
| применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования (для определения структуры и свойств гетерогенных катализаторов) | умений             | методиках исследования свойств гетерогенных катализаторов   | представления о методах исследования, допускает грубые ошибки при выборе методик для исследования свойств гетерогенных катализаторов | методики для исследования свойств гетерогенных катализаторов, но допускает некоторые ошибки  | способен аргументированно выбирать методики для исследования свойств гетерогенных катализаторов                               | по теме контрольного задания                           |
| <i>У16(ПК-4) Уметь:</i> применять основные законы химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенно-каталитических систем.   | Отсутствие умений  | Имея базовые представления об основных законах химии, не умеет применять их для обсуждения свойств и характеристик гетерогенно-каталитических систем. | Способен применять основные законы химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенно-каталитических систем.                   | Умеет применять основные законы химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенно-каталитических систем.                                      | Раскрывает полное содержание основных законов химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенно-каталитических систем. | Зачет в форме выступления по теме контрольного задания |
| <i>В8(ПК-4) Владеть:</i> навыками обобщения и анализа результатов физико-химических и каталитических исследований   | Отсутствие навыков | Допускает существенные ошибки при анализе и обобщении результатов физико-химических и каталитических исследований                                     | В общих чертах понимает подходы и способы анализа и обобщения результатов физико-химических и каталитических исследований            | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и обобщения результатов физико-химических и каталитических исследований | Способен свободно и аргументированно обсуждать и обобщать результаты физико-химических и каталитических исследований          | Зачет в форме выступления по теме контрольного задания |
| <i>В9(ПК-4) Владеть:</i> целостной системой   | Отсутствие         | Отсутствие четких представлений о   | В общих чертах понимает  | Понимает основные современные  | Понимает и квалифицированно   | Зачет в форме выступления                              |

|   |                   |  |   |  |  |  |
|---|-------------------|--|---|--|--|--|
| знаний о гетерогенном катализе и механизмах, лежащих в основе промышленно-важных гетерогенно-каталитических реакций                                   | навыков           | принципах и механизмах, лежащих в основе промышленно-важных гетерогенно-каталитических реакций   | принципы и механизмы, лежащих в основе промышленно-важных гетерогенно-каталитических реакций  | представления о принципах и механизмах, лежащих в основе промышленно-важных гетерогенно-каталитических реакций   | аргументирует  | по теме контрольного задания                           |
| <b>З1(ПК-13) Знать:</b><br>область применения и ограничения применимости физико-химических методов при определении свойств гетерогенных катализаторов | Отсутствие знаний | Не имеет четкого представления о применимости и ограничениях применимости физико-химических методов при определении свойств гетерогенных катализаторов | Знает базовые сведения о применении физико-химических методов при определении свойств гетерогенных катализаторов, но допускает ошибки при объяснении их применимости и ограничениях | Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания об областях применения и ограничениях применимости физико-химических методов при определении свойств гетерогенных катализаторов | Раскрывает полное содержание областей применимости физико-химических методов при определении свойств гетерогенных катализаторов и аргументированно объясняет ограничения их применимости | Зачет в форме выступления по теме контрольного задания |
| <b>УЗ(ПК-13) Уметь:</b><br>критически анализировать и обрабатывать экспериментальные результаты каталитических испытаний гетерогенных катализаторов   | Отсутствие умений | Фрагментарные умения обработки и анализа экспериментальные результаты каталитических испытаний гетерогенных катализаторов                              | Знает теоретические основы моделей, но не умеет правильно выбирать способ обработки и анализа экспериментальные результаты каталитических испытаний                                 | Умеет критически анализировать и обрабатывать экспериментальные результаты каталитических испытаний гетерогенных катализаторов, допуская небольшие ошибки                              | Свободно применяет умения критически анализировать и обрабатывать экспериментальные результаты каталитических испытаний гетерогенных катализаторов для                                   | Зачет в форме выступления по теме контрольного задания |

|  |  |  |                            |                                 |                           |  |
|--|--|--|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|
|  |  |  | гетерогенных катализаторов | при решении нетривиальных задач | задач различной сложности |  |
|--|--|--|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|