

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Химический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

И.о. декана химического факультета  
А.С. Князев

Рабочая программа дисциплины

**Специализированный практикум по адсорбции и катализу**

по направлению подготовки

**04.03.01 Химия**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Химия»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2023**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
В.В. Шелковников

Председатель УМК  
Л.Н. Мишенина

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины является ознакомление студентов с методами исследования текстурных, адсорбционных и каталитических свойств адсорбентов и катализаторов, получение студентами практических навыков проведения подобных исследований и формирование следующих компетенций:

– ОПК-1. Способен анализировать и интерпретировать результаты химических экспериментов, наблюдений и измерений.

– ОПК-2. Способен проводить с соблюдением норм техники безопасности химический эксперимент, включая синтез, анализ, изучение структуры и свойств веществ и материалов, исследование процессов с их участием.

– ПК-1. Способен выбирать и использовать технические средства и методы испытаний для решения исследовательских задач химической направленности, поставленных специалистом более высокой квалификации.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК-1.1. Систематизирует и анализирует результаты химических экспериментов, наблюдений, измерений, а также результаты расчетов свойств веществ и материалов.

ИОПК-1.2. Предлагает интерпретацию результатов собственных экспериментов и расчетно-теоретических работ с использованием теоретических основ традиционных и новых разделов химии.

ИОПК-1.3. Формулирует заключения и выводы по результатам анализа литературных данных, собственных экспериментальных и расчетно-теоретических работ химической направленности.

ИОПК-2.1. Работает с химическими веществами с соблюдением норм техники безопасности.

ИОПК-2.2. Проводит синтез веществ и материалов разной природы с использованием имеющихся методик.

ИОПК-2.4. Проводит исследования свойств веществ и материалов с использованием серийного научного оборудования.

ИПК-1.1. Планирует отдельные стадии исследования при наличии общего плана НИР.

ИПК-1.2. Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных этапов НИР.

ИПК-1.3. Выбирает технические средства и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР;

ИПК-1.4. Готовит объекты исследования.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить работу на классических и современных приборах и установках по тематике дисциплины (каталитических установках, хемосорбционных анализаторах, спектрофотометре, анализаторе размера частиц и дзета-потенциала).

– Научиться выбирать оптимальные методы и условия проведения экспериментов для исследования текстурных, адсорбционных и каталитических свойств материалов; определять и рассчитывать на основе полученных экспериментальных данных параметры, характеризующие поверхностные и каталитические свойства материалов (удельную поверхность, общий объем пор, распределение пор по размерам, конверсию, каталитическую активность, селективность, порядок реакции по компоненту, эффективную энергию активации и др.); проводить анализ полученных результатов, в том числе правильно сравнивать параметры, характеризующие поверхностные и каталитические свойства материалов, находить их взаимосвязь со структурой, фазовым составом и другими поверхностными и объёмными характеристиками исследуемых объектов.

### **3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

Дисциплина входит в Модуль Физическая химия

Полученные студентами знания необходимы им в научно-исследовательской работе при выполнении курсовых, бакалаврских, дипломных работ и магистерских диссертаций.

### **4. Семестр освоения и форма промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 8, экзамен.

### **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: обязательной части профессионального цикла Б1.О.14 Неорганическая химия, Б1.О.15.01 Аналитическая химия, Б1.О.16 Органическая химия, Б1.О.17 Физическая химия; обязательной части общепрофессионального цикла Б1.О.11 Химическая технология, а также вариативной части профессионального цикла Б1.В.ДВ.02.05.01 Адсорбционные процессы, Б1.В.ДВ.02.05.02 Гетерогенный катализ учебного плана по программе бакалавриата 04.03.01 – Химия.

### **6. Язык реализации**

Русский

### **7. Объем дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 з.е., 180 часов, из которых:

– лекции: 0 ч.;

– семинарские занятия: 0 ч.

– практические занятия: 0 ч.;

– лабораторные работы: 80 ч.

в том числе практическая подготовка: 80 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

### **8. Содержание дисциплины, структурированное по темам**

Тема 1. Определение каталитических свойств образца катализатора при разных временах контакта. Сравнение каталитических свойств образцов (скрининг).

Проточные методы исследования каталитических свойств твердых катализаторов: интегральный реактор, режим идеального вытеснения. Каталитическая активность, средняя скорость каталитической реакции, конверсия. Время контакта. Стационарное состояние катализатора. Влияние процессов массо- и теплопереноса: области внешней диффузии, внутренней диффузии, кинетическая область. Обеспечение «идеальных» условий протекания реакции на катализаторе. Скрининг катализаторов. Сравнение активности катализаторов.

Тема 2. Определение скорости гетерогенной каталитической реакции в проточном реакторе. Определение порядка реакции по компоненту

Проточные методы исследования каталитических свойств твердых катализаторов: дифференциальный реактор, режим идеального смешения. Проточно-циркуляционная установка. Дифференциальный режим в проточном реакторе. Удельная каталитическая активность. Ошибка определения скорости реакции. Порядок реакции: общий, частный порядок. Методы определения порядков реакции.

Тема 3. Окислительное дегидрирование пропана в пропилен: определение основных параметров, скрининг, сведение баланса

Проточные методы исследования каталитических свойств твердых катализаторов: интегральный реактор, режим идеального вытеснения. Каталитическая активность, средняя скорость каталитической реакции, конверсия; селективность. Время контакта. Стационарное состояние катализатора. Влияние процессов массо- и теплопереноса: области внешней диффузии, внутренней диффузии, кинетическая область. Обеспечение «идеальных» условий протекания реакции на катализаторе. Скрининг катализаторов. Сравнение активности и селективности катализаторов.

Тема 4. Окислительное дегидрирование пропана в пропилен: определение энергии активации реакции

Проточные методы исследования каталитических свойств твердых катализаторов: интегральный и дифференциальный реактор. Дифференциальный режим в проточном реакторе. Каталитическая активность, средняя скорость каталитической реакции, удельная каталитическая активность. Влияние процессов массо- и теплопереноса: области внешней диффузии, внутренней диффузии, кинетическая область; влияние температуры на наблюдаемую скорость реакции. Эффективная энергия активации реакции.

Тема 5. Определение удельной поверхности, объема пор и распределения пор по размерам с применением прибора «TriStar 3020» для мезопористых твердых тел многоточечным методом БЭТ

Удельная поверхность, пористость, изотерма адсорбции. Основные типы изотерм адсорбции. Методы определения удельной поверхности и размеров пор. Статический метод: многоточечный метод БЭТ. Волюмометрическое измерение величины адсорбции.

Тема 6. Определение удельной поверхности, объема пор и распределения пор по размерам с применением прибора 3Flex для тонкопористых образцов адсорбентов и катализаторов многоточечным методом БЭТ

Удельная поверхность, пористость, изотерма адсорбции. Основные типы изотерм адсорбции. Методы определения удельной поверхности и размеров пор. Статический метод: многоточечный метод БЭТ. Волюмометрическое измерение величины адсорбции.

Тема 7. Определение удельной поверхности твердофазных образцов адсорбентов и катализаторов одноточечным методом БЭТ на проточной сорбционной установке

Удельная поверхность, пористость, изотерма адсорбции. Основные типы изотерм адсорбции. Методы определения удельной поверхности. Динамический метод: одноточечный метод БЭТ.

Тема 8. Изучение кислотно-основного состояния поверхности твердых тел методами рН-метрии (определение рН точки нулевого заряда, рН изоионного состояния)

Кислотно-основные центры на поверхности твердых тел: центры Льюиса и Бренстеда. Изоионное состояние, точка нулевого заряда. Метод рН-метрии. Оценка кислотно-основных свойств поверхности по значению рН точки нулевого заряда, рН изоионного состояния.

Тема 9. Оценка кислотности и основности поверхности по значению рН изоэлектрического состояния, определенного измерением электрофоретической подвижности частиц при различных значениях рН суспензии

ДЭС. Электрокинетический потенциал (дзета-потенциал). Электрофоретическая подвижность. Изоэлектрическая точка. Определение изоэлектрической точки. Оценка кислотно-основных свойств поверхности по значению рН изоэлектрического состояния.

Тема 10. Индикаторный метод определения кислотно-основных свойств поверхности твердых тел разной степени дисперсности (адсорбция индикаторов Гаммета из водной среды)

Кислотно-основные центры на поверхности твердых тел: центры Льюиса и Бренстеда. Характеристика силы кислотных/основных центров на поверхности: функция

Гаммета. Методы определения кислотности поверхности твердых тел (силы центров, концентрации центров, распределения центров) в жидких средах: индикаторный метод.

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Программа дисциплины включает практические работы по определению текстурных, адсорбционных и каталитических свойств адсорбентов и катализаторов, носящие научно-исследовательский характер. Перед выполнением лабораторной работы студент должен сдать теоретический материал, подготовленный по рекомендуемым литературным источникам и учебным пособиям, авторами которых являются преподаватели кафедры. Чтобы приступить к выполнению эксперимента студент должен также получить допуск к работе на основании его знаний методики эксперимента и порядка выполнения работы. Для подготовки студентов к каждой лабораторной работе предлагаются методические указания со списком вопросов для самоконтроля.

По результатам выполнения лабораторной работы студент готовит отчет и защищает его на занятии в группе. Для подготовки отчета к каждой лабораторной работе даются рекомендации к его оформлению в виде примерного плана отчёта. Отчёт используется как средство привить студентам начальные навыки исследовательской работы, предполагает проработку теоретической части, лежащей в основе работы, обработку и анализ данных, полученных при ее выполнении, а также сбор и анализ научной литературы, опубликованной в научных журналах. Защита отчета позволяет развить у обучающихся навыки и культуру профессиональной речи, сформировать научную терминологию и логику изложения доказательной базы.

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, знания теоретического материала к выполняемым практическим работам и методики эксперимента и порядка выполнения работы, подготовки и защиты отчетов по выполненным работам и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

## **10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации**

Изучение дисциплины завершается устным экзаменом, допуском к которому является сдача и защита отчетов по всем выполненным практическим работам. Экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов.

Примеры экзаменационных билетов.

Экзаменационный билет № 5

1. Проточный реактор. Режим идеального вытеснения, «интегральный реактор». Время контакта.

2. Пористость твердых тел. Определение объёма пор и распределения пор по размерам из изотерм адсорбции-десорбции, полученных с помощью прибора «TriStar 3020».

Экзаменационный билет № 7

1. Условия проведения исследований каталитических свойств. Влияние процессов массо- и теплопереноса. Экспериментальные способы проверки отсутствия внешней и внутренней диффузии при проведении эксперимента.

2. Классификация методов определения кислотно-основных свойств поверхности твердых тел. Кислотно-основные параметры различных методов, их определение, характеристика с их помощью кислотно-основного состояния поверхности твердых тел.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Критерии оценивания описаны ниже.

Неудовлетворительно: не знает, не владеет материалом, в том числе затрудняется в формулировке основных теоретических понятий и плохо разбирается в принципах работы классического и современного оборудования (приборов и установок) по тематике дисциплины; не разбирается в определении и расчетах параметров и в вопросах их связи с другими свойствами твердого тела.

Удовлетворительно: имеет представление об основных понятиях изучаемой дисциплины, о методах определения свойств поверхности твердых тел, но делает при этом много ошибок; делает грубые ошибки при работе на приборах, необходимых для изучения поверхностных свойств, а также в определении соответствующих параметров.

Хорошо: знает основные теории и уравнения, лежащие в основе методов определения поверхностных свойств, но допускает при этом неточности; разбирается в принципах работы классического и современного оборудования (приборов и установок) по тематике дисциплины, может использовать различные приборы, методы исследования поверхностных свойств, правильно определяет основные параметры, характеризующие поверхность адсорбентов и катализаторов, но допускает небольшие неточности.

Отлично: знает основные теории и уравнения, лежащие в основе методов определения поверхностных свойств; отлично разбирается в принципах работы классического и современного оборудования (приборов и установок) по тематике дисциплины; без труда может использовать различные приборы, методы исследования поверхностных свойств; правильно определяет основные параметры, характеризующие поверхность адсорбентов и катализаторов.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=23455>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

в) План практических занятий по дисциплине.

г) Методические указания по проведению лабораторных работ.

д) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

– Харламова Т. С., Водянкина О. В. Методы исследования каталитических свойств гетерогенных катализаторов. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2017. – 60 с.

– Минакова Т. С. Адсорбционные процессы на поверхности твердых тел. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 279 с.

– Сычев М. М. Кислотно-основные характеристики поверхности твердых тел и управление свойствами материалов и композитов / М. М. Сычев [и др.]. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2016. – 274 с.

– Минакова Т. С., Екимова И. А. Фториды и оксиды щелочноземельных металлов и магния. Поверхностные свойства. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2014. – 148 с.

б) дополнительная литература:

– Мамонтов Г. В., Минакова Т. С., Харламова Т. С., Горбунова А. С. Лабораторный практикум по курсу «Адсорбционные процессы» / Электронный вариант, 2016.

– Иконникова К. В. Теория и практика определения кислотно-основных свойств поверхности твердых тел методом рН-метрии. / К. В. Иконникова [и др.]. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 99 с.

– Kharlamova T. S., Timofeev K. L., Salaev M. A., Svetlichnyi V. A., Vodyankina O. V. Monolayer MgVO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for propane oxidative dehydrogenation: Insights into a role of

structural, redox, and acid-base properties in catalytic performance // Applied Catalysis A, General. – 2020. – V. 598. – P. 117574. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117574>

– Grabowski R. Kinetics of Oxidative Dehydrogenation of C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub> Alkanes on Oxide Catalysts, Catalysis Reviews. – 2006. – V. 48. – P. 199-268. <http://dx.doi.org/10.1080/01614940600631413>

– Carrero C. A., Schlögl R., Wachs I. E., Schomaecker R. A critical literature review of the kinetics for the oxidative dehydrogenation of propane over well-defined supported vanadium oxide catalysts // ACS Catal. – 2014. – V. 4. – P. 3357–3380. <https://doi.org/10.1021/cs5003417>

– Li H., Shen M., Wang J., Wang H., Wang J. The Effect of Support on CO Oxidation Performance over Pd/CeO<sub>2</sub> and Pd/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> Catalyst. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2020. – V. 59. – N 4. – P. 1477–1486. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b05351>

– Thommes M., Kaneko K., Neimark A. V., Olivier J. P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W., Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // Pure Appl. Chem. – 2015. – V. 87. – NN 9–10. – P. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

в) ресурсы сети Интернет:

– База данных цитирования издательства Elsevier. Библиографическая информация, информация о цитировании, ссылки на полные тексты. – <https://www.scopus.com>

– Информационно-аналитическая платформа компании Clarivate Analytics – <https://www.webofscience.com>

– Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU – <https://elibrary.ru>

### 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

### 14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Лаборатории, оснащенные вытяжными шкафами, измерительными инструментами (аналитические весы, термометры, газовые часы, мыльно-пленочные измерители), стеклянной и фарфоровой лабораторной посудой и следующим оборудованием:

– анализатор удельной поверхности и пористости TriStar 3020 (Micromeritics, США);

- хемосорбционные анализаторы ChemiSorb 2750 (Micromeritics, США);
- анализатор удельной поверхности и пористости 3Flex (Micromeritics, США);
- ионметр ИПЛ – 101, НПО «Семико» (Новосибирск); спектрофотометр UV-2800;
- фотоколориметр;
- проточные каталитические установки, сопряжённые с газовыми хроматографами «Хроматэк-Кристалл 5000» для on-line анализа продуктов реакции;
- аналитический прибор Omni S/N (Brookhaven, США) для измерения дзета-потенциала и размера частиц с автотитратором BI-ZTU (Brookhaven, USA).

### **15. Информация о разработчиках**

Харламова Тамара Сергеевна, канд. хим. наук, кафедра физической и коллоидной химии Национального исследовательского Томского государственного университета, доцент.