

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

Химический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

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

« 08 » апреля 20 22 г.

Рабочая программа дисциплины

**Адсорбционные процессы**

по направлению подготовки

**04.03.01 Химия**

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

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2021**

Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.02.05.01

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 В.В. Шелковников

Председатель УМК

 В.В. Хасанов

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

Целями освоения дисциплины «Адсорбционные процессы» является ознакомление студентов с основными закономерностями адсорбционных явлений, протекающих на границе раздела газ – твердое тело, на пористых и непористых адсорбентах, катализаторах, в наносистемах; с адсорбционными методами и научными основами поиска адсорбентов, промышленным использованием явлений адсорбции, а также 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-2.3. Проводит стандартные операции для определения химического и фазового состава веществ и материалов на их основе.

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

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

ИПК-1.4. Готовит объекты исследования.

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

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить и научиться применять понятийный аппарат дисциплины для решения практических задач профессиональной деятельности;

– Освоить основные теории моно- и полимолекулярной адсорбции и уравнения изотерм адсорбции, получить навыки анализа адсорбционных процессов в изучаемых системах;

– Получить представление об основных особенностях протекания адсорбции на пористых сорбентах;

– Научиться проводить термодинамические и кинетические расчёты, делать выводы о характере протекания адсорбционных процессов;

– Освоить методы определения удельной поверхности и пористости твердых сорбентов.

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

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

Дисциплина является обязательной для изучения по профилю подготовки.

Курс «Адсорбционные процессы» является основой для изучения таких дисциплин, как «Гетерогенный катализ», «Методы исследования адсорбентов и катализаторов», «Методы приготовления и исследования катализаторов», «Избранные главы физической химии» и других спецкурсов, а также при прохождении студентами производственной практики, при выполнении курсовых, бакалаврских, дипломных работ и магистерских диссертаций.

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

Семестр 7, экзамен.

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

Для успешного освоения дисциплины студенты предварительно знакомятся с дисциплинами обязательной части Б1.О.14-18 (неорганическая, аналитическая, органическая, физическая химия, высокомолекулярные соединения, коллоидная химия, физико-химические методы анализа), а также дисциплинами обязательной части общепрофессионального блока Б1.О.08 физика и Б1.О.12 – строение вещества, приобретая при этом необходимые знания, навыки, умения, профессиональные компетенции по строению, свойствам и закономерностям химических веществ и систем.

#### **6. Язык реализации**

Русский

#### **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часа, из которых:

- лекции: 32 ч.;
- семинарские занятия: 0 ч.
- практические занятия: 32 ч.;
- лабораторные работы: 0 ч.

в том числе практическая подготовка: 32 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

Занятия по дисциплине «Адсорбционные процессы» могут быть реализованы в смешанном формате с элементами электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

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

Тема 1. Сорбция. Адсорбция. Природа сил при адсорбции. Термодинамика адсорбции.

Экспериментальное изучение адсорбции

Основные понятия: сорбция, адсорбция, классификация явления адсорбции по разным признакам. Экспериментальные методы изучения адсорбции. Термодинамика поверхностных явлений.

Тема 2. Равновесие, кинетика и общие закономерности мономолекулярной адсорбции.

Классификация изотерм адсорбции. Теории и изотермы мономолекулярной адсорбции.

Теория Лэнгмюра. Изотерма Генри. Вывод уравнения Генри. Особенности изотермы Генри. Реальный адсорбированный слой. Неоднородность поверхности и взаимное влияние адсорбированных частиц, разные точки зрения. Изотермы Темкина, Фрейндлиха, многоцентровой адсорбции на однородных поверхностях. Скорость адсорбции и десорбции. Энергии активации адсорбции и десорбции, методы расчета. Общие закономерности протекания адсорбционных процессов на однородных и неоднородных поверхностях.

Тема 3. Теории полимолекулярной адсорбции.

Многослойная (полимолекулярная) адсорбция. Теории адсорбции. Потенциальная теория Поляни. Теория БЭТ. Основные допущения. Вывод уравнения БЭТ. Анализ уравнения. Значение уравнения БЭТ. Изотерма Арановича.

Тема 4. Удельная поверхность адсорбентов. Адсорбция на пористых сорбентах. Проблема тонких пор. Адсорбция в промышленности.

Определение величины поверхности твёрдых тел. Пористые адсорбенты. Адсорбционные процессы в химической промышленности. Адсорбционно-десорбционные циклы. Промышленные адсорбенты.

Тема 5. Фотосорбция. Особенности адсорбции в нанодисперсных системах. Современные проблемы адсорбции.

Фотостимулированные процессы на поверхности твердых тел при возбуждении в области собственного и несобственного поглощения. Фотосорбция. Основные закономерности фотосорбционного эффекта.

Общие сведения о наносистемах и наноматериалах. Особенности адсорбционных процессов в нанодисперсных системах.

Современные адсорбционные установки, их возможности и проблемы. Чистота эксперимента. Адсорбционные модели и их реализация.

Тема 6. Семинарские занятия

1. Расчет величины адсорбции в объемном и весовом методах.
2. Изобары адсорбции. Построение изобар адсорбции по экспериментальным данным, их анализ.
3. Теплота адсорбции. Классификация теплот адсорбции. Расчет теплоты физической адсорбции по уравнениям Клапейрона – Клаузиуса и Беринга – Серпинского.
4. Построение изотерм мономолекулярной адсорбции, описание их различными функциональными зависимостями, предложенными Лэнгмюром, Тёмкиным, Фрейндлихом, Островским и др.
5. Энергия активации адсорбции. Расчет  $E_{\text{адс}}$  по уравнениям Аррениуса и с применением метода «контролирующей полосы» Рогинского.
6. Теории полимолекулярной адсорбции. Построение изотерм полимолекулярной адсорбции на твердых телах и проверка их на подчиняемость уравнениям для полимолекулярной адсорбции. Теплота полимолекулярной адсорбции.
7. Удельная поверхность твердых тел. Расчет величины удельной поверхности по уравнению БЭТ.
8. Пористые сорбенты. Построение структурных кривых и определение размеров пор.

## 9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу, выполнения домашних заданий, подготовки к практическим занятиям и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр. Оценивание промежуточных заданий дает возможность и студенту и преподавателю отслеживать ход учебного процесса.

Примерный перечень теоретических вопросов на коллоквиумах

1. Равновесие на однородных и неоднородных поверхностях. Теория Лэнгмюра. Вывод уравнения изотермы (кинетический и статистико-термодинамический). Применение уравнения Лэнгмюра к реальным системам. Реальный адсорбированный слой. Представления о неоднородности поверхности по реакционной способности различных адсорбционных центров, развиваемые в 50–60-х годах XX в. Рогинским, Тёмкиным, Зельдовичем и др.

2. Природа сил и расчёт энергии физической адсорбции

3. Кинетика адсорбционных процессов в системах газ-твердое тело. Что такое скорость адсорбции и от чего она зависит? Уравнения для скоростей адсорбции на однородных и неоднородных поверхностях?
4. Разновидности пор адсорбентов и их структурные типы. Классификация адсорбентов по пористости.
5. Теория БЭТ. Основные допущения. Вывод уравнения БЭТ. Для какого вида адсорбции выведено данное уравнение? Смысл параметров уравнения БЭТ.

Примеры задач:

Задание 20

Удельная поверхность активированного угля  $400 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ . Плотность метанола при 288 К равна  $0.7958 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ . Определить максимальное количество метанола, которое может адсорбировать 1 г угля при 288 К при образовании мономолекулярного слоя

Задание 10.

Для системы бензол – хроматон (после предварительной 4-часовой вакуумной обработки адсорбента при  $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) были получены при  $(16 - 17.5) \text{ }^\circ\text{C}$  следующие данные, сведённые в таблицу

(Таблица прилагается)

Построить структурную кривую, найти распределение пор по эффективным диаметрам и общий объём пор.  $N_0 = 364.551$ ;  $\sigma \text{ C}_6\text{H}_6 = 28.88 \text{ эрг/см}^2$ ; плотность бензола  $0.8790 \text{ г/см}^3$ , мольный объём  $V_m = 78/0.8790 = 88.74 \text{ см}^3/\text{моль}$ .  $P$  – в мм рт. ст. Рассчитать недостающие данные таблицы.

Темы теоретических индивидуальных заданий:

1. Цеолиты.
2. Методы Гиббса и слоя конечной толщины
3. Индикаторный метод определения кислотности поверхности твердых тел
4. Метод определения кислотности поверхности путем адсорбции из растворов
5. Изотермы многоцентровой адсорбции
6. Калориметрические методы определения теплот адсорбции
7. Атомарно-чистые поверхности

Примеры вопросов тестов:

1. Какие изотермы характеризуют физическую адсорбцию (классификация Брунауэра)?
  - 1-го типа,
  - 2-го типа,
  - 3-го типа,
  - 4-го типа,
  - 5-го типа.
2. Какое из уравнений описывает диссоциативную хемосорбцию?
  - $\theta = \beta \cdot P^{1/n}$ ,
  - $\theta = c \ln P + C$ ,
  - $\theta = \frac{bP}{1 + bP}$ ,
  - $\theta = (bP)^{1/2} / [1 + (bP)^{1/2}]$ .

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Контроль по дисциплине «Адсорбционные процессы» проводится в течение семестра по итогам обсуждения материала в рамках четырёх коллоквиумов, выполнения расчетных индивидуальных заданий по темам восьми семинаров и контрольной работы,

которые оцениваются по пятибалльной шкале. Теоретические индивидуальные задания защищаются на семинаре группы и оцениваются вместе со студентами. Оценка ставится и за ответы на собеседовании по материалам курсам. По результатам всех выполненных работ и полученных оценок студент получает оценку по пятибалльной шкале. В случае невыполнения студентом тех или иных заданий окончательная оценка по курсу ставится по итогам сдачи экзамена. Экзаменационные билеты содержат по 4 вопроса, проверяющие ИОПК-1.2, ИОПК-1.3, ИПК-1.3.

Примеры экзаменационных билетов.

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

**Дисциплина: Адсорбционные процессы  
Экзаменационный билет № 2**

1. Изотерма Арановича. Сравнение с уравнением БЭТ.
2. Методы расчёта теплот физической адсорбции.
3. Разновидность пор адсорбентов и их структурные типы
4. Механизмы фотосорбционных процессов.

**Зав. кафедрой:** \_\_\_\_\_

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

**Дисциплина: Адсорбционные процессы  
Экзаменационный билет № 4**

1. Объёмный и весовой методы изучения адсорбции на границе раздела газ – твёрдое тело. Расчет величины адсорбции газа на твёрдой поверхности.
2. Классификация изотерм адсорбции.
3. Определение величины удельной поверхности на основании адсорбционных данных (метод Лэнгмюра, метод БЭТ)
4. Угли, силикагели, алюмогели, цеолиты, другие сорбенты.

**Зав. кафедрой:** \_\_\_\_\_

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» выставляется в случае полного безошибочного ответа, полностью раскрывающего суть вопросов, с правильным применением понятий и определений.

Оценка «хорошо» выставляется в случае достаточно полного ответа, содержащего несущественные ошибки, и при недостаточно чётком ответе на уточняющие и дополнительные вопросы.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, не показавшему знания в полном объеме, допустившему ошибки и неточности при ответе на вопросы экзаменационного билета. При этом хотя бы по двум вопросам билета ошибки не должны иметь принципиального характера.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту в случае неполного и поверхностного ответа на три из четырех вопросов билета, при допущении принципиальных ошибок в ответах на дополнительные и уточняющие вопросы.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» -<http://class.tsu.ru/m-course-21485>;

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

в) План практических занятий по дисциплине<sup>4</sup>

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

– Минакова Т. С. Адсорбционные процессы на поверхности твердых тел : учебное пособие / Т. С. Минакова ; Том. гос. ун-т. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2007. – 279 с. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000239327>.

– Макаревич Н. А. Теоретические основы адсорбции: уч. Пособие / Н. А. Макаревич – Архангельск: Издательство САФУ, 2015. – 362 с. URL: <http://sun.tsu.ru/limit/2016/000551151/000551151.pdf>.

– Комаров В. С. Адсорбенты и носители катализаторов. Научные основы регулирования пористой структуры : монография / В. С. Комаров, С. В. Бесараб. – М. : ИНФРА-М, 2020. – 203 с. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1078357>.

– Фенелонов В. Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов / В. Б. Фенелонов – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 413 с.

б) дополнительная литература:

– М. М. Сычев, Т. С. Минакова, Ю. Г. Слизов, О. А. Шилова. Кислотно-основные характеристики поверхности твердых тел и управление свойствами материалов и композитов. 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.

– Толмачев А. М. Термодинамика адсорбции газов, паров и растворов. Москва, МГУ. 2012. <http://www.chem.msu.su/rus/teaching/tolmachev/tolmachev1.pdf>.

– Толмачев А. М. Термодинамика адсорбции газов, паров и растворов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2010. Т. 46. – № 2. – С. 136-150.

– K. A. Cychosz, R. Guillet-Nicolas, J. Garcia-Martinez, M. Thommes. Recent advances in the textural characterization of hierarchically structured nanoporous materials // Chem. Soc. Rev., 2017, 46, 389. DOI: 10.1039/c6cs00391e.

– Mahdieh Mozaffari Majd, Vahid Kordzadeh-Kermani, Vahab Ghalandari, Anis Askari, Mika Sillanpää. Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010–2020) // Science of the Total Environment. 2022. V. 812. P. 151334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151334.

в) ресурсы сети Интернет:

– открытые онлайн-курсы

– Общероссийская Сеть КонсультантПлюс Справочная правовая система.

<http://www.consultant.ru>

– <https://www.scopus.com/>

– <https://apps.webofknowledge.com>

– <https://elibrary.ru>

– <http://past.tpu.ru/files/nu/disser/darmanskaya.pdf>

– <http://www.chem.msu.su/rus/jvho/2000-1/89.pdf>

– <http://narfu.ru/university/library/books/2196.pdf>

– <http://www.studfiles.ru/preview/412084/>

– <http://www.chem.msu.su/rus/teaching/tolmachev/tolmachev1.pdf>

### **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**

Обучение по дисциплине «Адсорбционные процессы» осуществляется в 6-ом корпусе ТГУ. Используются:

- лекционные аудитории, оснащенная мультимедийным оборудованием для демонстрации презентаций, слайдов и компьютерной анимации (аудитория № 212, № 311, № 405).
- для проведения коллоквиумов, консультаций, экзамена могут быть предоставлены любые другие аудитории 6-го корпуса (211, 222, 402, 108 и др.).
- помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам (лаб.112, ауд. 405).

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

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

Мамонтов Григорий Владимирович, канд. хим. наук, кафедра физической и коллоидной химии Национального исследовательского Томского государственного университета, доцент.