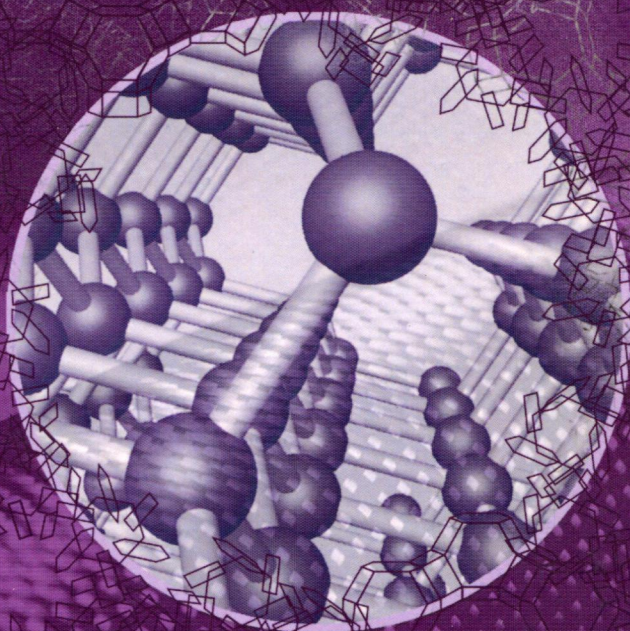


УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

В. Д. Ягодовский

# АДСОРБЦИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО

**БИНОМ**

**УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ**

**В. Д. Ягодовский**

# **АДСОРБЦИЯ**

Допущено  
Учебно-методическим объединением  
по классическому университетскому образованию  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению ВПО 020100 – химия  
и специальности ВПО 020201 –  
фундаментальная и прикладная химия



Москва  
БИНОМ. Лаборатория знаний

УДК 544  
ББК 24.58я73  
Я30

*Серия основана в 2009 г.*

**Ягодский В. Д.**

Я30 Адсорбция / В. Д. Ягодский. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 216 с. : ил. — (Учебник для высшей школы).

ISBN 978-5-9963-1681-6

В учебном пособии, написанном профессором РУДН, излагаются теоретические основы адсорбции — сложного явления на границе раздела фаз газ—твердое тело, газ—жидкость, жидкость—твердое тело, жидкость—жидкость. Адсорбция играет важную роль в природных процессах (обмен энергией между геологическими слоями, концентрирование веществ клетками живых организмов при метаболизме и т. д.), находит широкое применение в технике, медицине, фармакологии, лабораторной практике, при очистке промышленных газов и жидкостей от вредных примесей, очистке питьевой воды, изготовлении катализаторов для нефтепереработки, а также получении других полезных веществ. В качестве адсорбентов на практике чаще используются пористые материалы на основе различных активных углей, оксида алюминия, алюмосиликатов и силикателей.

Для студентов химических и химико-технологических вузов.

УДК 544  
ББК 24.58я73

---

*Учебное издание*

Серия: «Учебник для высшей школы»

**Ягодский Виктор Дмитриевич**

## **АДСОРБЦИЯ**

Ведущий редактор канд. хим. наук *Т. И. Почкаева*

Редактор канд. хим. наук *Е. Э. Григорьева*

Художник *Н. А. Новак*

Технический редактор *Е. В. Денюкова*. Корректор *О. И. Белова*

Оригинал-макет подготовлен *Е. Г. Ивлевой* в пакете  $\LaTeX 2_{\epsilon}$

Подписано в печать 20.01.15. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 13,5. Тираж 500 экз. Заказ 670

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272, e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

Отпечатано способом ролевой струйной печати

в ОАО «Первая Образцовая типография»

Филиал «Чеховский Печатный Двор»

142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1  
Сайт: [www.chpd.ru](http://www.chpd.ru), E-mail: [sales@chpd.ru](mailto:sales@chpd.ru), т/ф. 8(496)726-54-10

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>Предисловие</b> .....  | 3  |
| <b>Введение</b> .....   | 4  |
| <b>Глава 1. Термодинамическое описание адсорбции</b> .....                                      | 11 |
| 1.1. Метод Гиббса .....   | 11 |
| 1.1.1. Изменение интегральных термодинамических функций при адсорбции .....                     | 18 |
| 1.1.2. Изменения дифференциальных мольных величин ..  | 23 |
| 1.1.3. Вычисление термодинамических функций из экспериментальных данных .....                   | 24 |
| 1.1.4. Константа адсорбционного равновесия .....  | 27 |
| 1.1.5. Термодинамические модели изотерм адсорбции ...   | 28 |
| 1.2. Адсорбция на поверхности твердых тел .....   | 34 |
| 1.3. Адсорбция из жидких растворов на поверхности твердых адсорбентов (по А. В. Киселеву) ..... | 40 |
| 1.4. Примеры и задачи .....   | 45 |
| 1.5. Вопросы .....  | 50 |
| Литература .....  | 50 |
| <b>Глава 2. Методы определения изотерм адсорбции</b> .....                                      | 51 |
| 2.1. Весовой метод .....  | 51 |
| 2.2. Объемный метод .....   | 52 |
| 2.3. Определение изотерм адсорбции из хроматографических данных .....                           | 54 |
| 2.4. Изотермы адсорбции при давлениях $<10^{-4}$ мм рт. ст. ....                                | 56 |
| 2.5. Изотермы адсорбции на твердом адсорбенте из жидкого раствора .....                         | 58 |
| Литература .....  | 58 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Глава 3. Адсорбционные силы при физической адсорбции . . .                           | 59  |
| 3.1. Силы притяжения . . . . .   | 60  |
| 3.1.1. Электронейтральная система зарядов во внешнем поле . . . . .                  | 60  |
| 3.1.2. Кулоновское притяжение между диполем и ионом и между двумя диполями . . . . . | 62  |
| 3.1.3. Индукционное взаимодействие . . . . .   | 67  |
| 3.1.4. Дисперсионное взаимодействие (силы Ван дер Ваальса) . . . . .                 | 69  |
| 3.2. Силы отталкивания . . . . .   | 75  |
| 3.3. Эмпирические модельные потенциалы . . . . .                                     | 76  |
| 3.4. Адсорбционный потенциал . . . . .   | 80  |
| 3.4.1. Примеры расчетов адсорбционного потенциала . . . . .                          | 82  |
| 3.5. Задачи . . . . .  | 85  |
| 3.6. Вопросы . . . . .   | 86  |
| Литература . . . . .   | 86  |
| Глава 4. Пористые адсорбенты . . . . .   | 87  |
| 4.1. Краткие сведения о пористых адсорбентах . . . . .                               | 87  |
| 4.1.1. Активные угли . . . . .   | 87  |
| 4.1.2. Нанокристаллические материалы (НУМ) . . . . .                                 | 89  |
| 4.1.3. Фуллерены . . . . .   | 89  |
| 4.1.4. Силикагели . . . . .  | 91  |
| 4.1.5. Активный оксид алюминия . . . . .   | 91  |
| 4.1.6. Аллюмосиликаты . . . . .  | 93  |
| 4.2. Термодинамическое описание адсорбции на пористых адсорбентах . . . . .          | 96  |
| 4.2.1. Теория объемного заполнения микропор (ТОЗМ) . . . . .                         | 96  |
| 4.2.2. Деформация пор микропористых адсорбентов . . . . .                            | 106 |
| 4.3. Адсорбция на мезопористых адсорбентах . . . . .                                 | 109 |
| 4.4. Задачи . . . . .  | 118 |
| 4.5. Вопросы . . . . .   | 120 |
| Литература . . . . .   | 121 |
| Глава 5. Молекулярно-статистическое описание адсорбции . . . . .                     | 122 |
| 5.1. Идеальный адсорбционный слой . . . . .  | 122 |
| 5.2. Реальный адсорбционный слой на однородной поверхности . . . . .                 | 132 |
| 5.2.1. Решеточные модели . . . . .   | 133 |
| 5.2.2. Вириальное уравнение изотермы адсорбции . . . . .                             | 146 |
| 5.2.3. Адсорбция на неоднородной поверхности . . . . .                               | 151 |
| 5.3. Вопросы . . . . .   | 157 |
| Литература . . . . .   | 157 |

|   |     |
|---|-----|
| Глава 6. <b>Хемосорбция</b> .....                                 | 158 |
| 6.1. Экспериментальное определение теплоты хемосорбции ..         | 160 |
| 6.2. Элементы теории хемосорбции .....                            | 162 |
| 6.2.1. Полуэмпирические методы расчета теплоты хемосорбции .....  | 162 |
| 6.2.2. Квантово-химический анализ характеристик хемосорбции ..... | 164 |
| 6.2.3. Хемосорбция на оксидах .....                               | 170 |
| 6.3. Вопросы .....  | 171 |
| Литература .....  | 171 |
| Глава 7. <b>Физические методы исследования адсорбции</b> .....    | 173 |
| 7.1. Оптическая спектроскопия .....                               | 173 |
| 7.1.1. ИК-спектры адсорбционного слоя .....                       | 175 |
| 7.1.2. Электронные спектры поглощения .....                       | 180 |
| 7.2. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) .....               | 182 |
| 7.2.1. Примеры использования спектров ЭПР в адсорбции             | 185 |
| 7.3. Фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС, ОЭС) .....              | 187 |
| 7.3.1. Применение метода РФЭС в адсорбции и катализе              | 189 |
| 7.4. Дифракция медленных электронов (ДМЭ) .....                   | 191 |
| 7.4.1. Примеры использования метода ДМЭ .....                     | 193 |
| 7.5. Работа выхода электрона .....                                | 195 |
| 7.5.1. Термоэлектронная эмиссия .....                             | 197 |
| 7.5.2. Фотоэлектрический метод (по Фаулеру) .....                 | 198 |
| 7.5.3. Контактная разность потенциалов (КРП) .....                | 199 |
| 7.5.4. Автоэлектронная эмиссия .....                              | 200 |
| 7.5.5. Поляризация адсорбата на островковых пленках металла ..... | 201 |
| 7.5.6. Примеры определения работы выхода при адсорбции            | 201 |
| 7.6. Вопросы .....  | 203 |
| Литература .....  | 204 |
| <b>Приложения</b> .....   | 207 |
| Приложение 1. Метод возмущений .....                              | 207 |
| Приложение 2. Некоторые постоянные .....                          | 212 |
| <b>Общая литература</b> .....                                     | 213 |