

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Факультет естественных наук  
Кафедра физической химии

**ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ НГУ  
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА**

**О. В. Нецкина**

**АДСОРБЦИЯ ИЗ РАСТВОРОВ НА ТВЁРДОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ**

Методическое пособие

Новосибирск  
2015

**ББК Г583.2я73-5  
УДК 544(075)  
Н 589**

Рецензент  
канд. хим. наук В. А. Рогов

Издание подготовлено в рамках реализации *Программы развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный университет»* на 2009–2018 годы.

**Н 589** Практикум по физической химии НГУ. Химическая термодинамика и кинетика. Адсорбция из растворов на твёрдой поверхности : метод. пособие / О. В. Нецкина ; Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : РИЦ НГУ, 2015. – 17 с.

Пособие содержит описание лабораторной работы, выполняемой в практикуме по химической термодинамике. Предназначено для студентов 3-го курса факультета естественных наук Новосибирского государственного университета.

**ББК Г583.2я73-5  
УДК 544(075)**

© Новосибирский государственный  
университет, 2015

## 1. Общие закономерности адсорбции веществ из растворов

Сложность изучения адсорбции из растворов обусловлена возможностью сорбции всех компонентов, что влияет на характер изотермы адсорбции. Даже если раствор содержит одно растворённое вещество, то на его адсорбцию будет влиять растворитель, который может конкурировать за адсорбционные центры поверхности. Кроме того, возможны случаи разного характера взаимодействия молекул адсорбирующегося вещества в растворе и на поверхности адсорбента, что также приводит к разнообразию изотерм адсорбции.

Чарльз Гильс<sup>1</sup> (C. H. Giles) предложил разделить изотермы адсорбции на 4 класса (S, L, H, C) по форме начального участка изотермы и на 5 типов по изменению формы кривой при более высоких концентрациях (рис. 1).

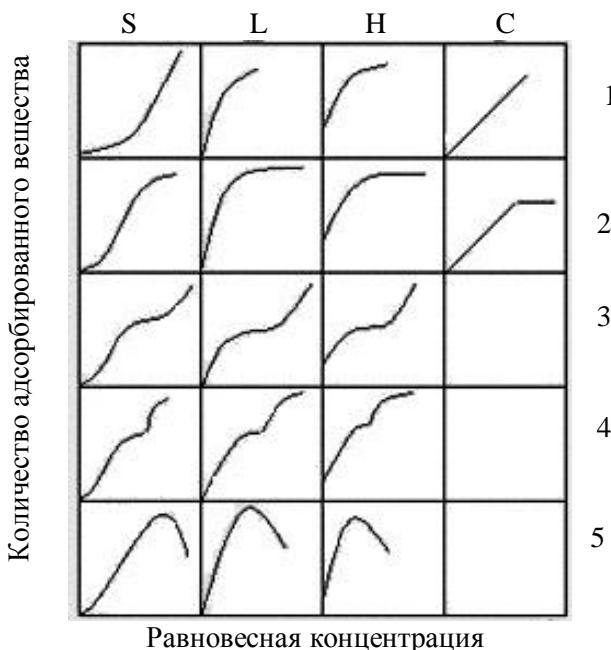


Рис. 1. Классификация изотерм адсорбции из растворов по Гильсу

<sup>1</sup> Встречается транскрипция Джайлс.

**Изотермы класса S** имеют вогнутый начальный участок. При возрастании концентрации адсорбтива в растворе резко увеличивается адсорбционная ёмкость сорбента, что может быть связано с изменением ориентации адсорбированных молекул относительно поверхности сорбента (например, для ароматических соединений возможна параллельная и перпендикулярная ориентация бензольного кольца) или с быстрым переходом к полимолекулярной адсорбции. Далее часто следует точка перегиба и появляется второе плато (S<sub>2</sub>–S<sub>4</sub>), что придаёт таким изотермам характерный S-образный вид. Причина – сильное взаимодействие между адсорбированными молекулами при одновременном ослаблении взаимодействия молекул адсорбтива с адсорбентом, что приводит, в целом, к увеличению теплоты адсорбции. В этом случае адсорбированные молекулы стремятся расположиться на поверхности в виде скоплений (цепей, кластеров и т. д.), чему способствует монофункциональный характер адсорбтива и сильная адсорбция растворителя, который в ряде случаев может вытеснить адсорбированное вещество. При этом на изотерме появляется максимум (S<sub>5</sub>). Этому способствует и изменение состояния растворённого вещества при достижении определённой концентрации его в растворе.

Изотермами класса S описывается адсорбция ограниченно растворимых жидких веществ из воды, адсорбция фенола на оксиде алюминия из воды, адсорбция п-нитрофенола на кремнеземе из бензола, насыщенного водой.

При изучении адсорбции веществ из растворов довольно часто встречаются **изотермы адсорбции класса L** (изотермы Ленгмюра). Ими хорошо описывается, например, адсорбция метанола на триацетате целлюлозы или сухой целлюлозе из бензола, адсорбция глюкозы на графите из воды, адсорбция 1,4-нитрофенола из бензола на оксиде алюминия. Для изотерм класса L характерна независимость теплоты адсорбции от степени заполнения поверхности и отсутствие конкуренции со стороны растворителя. Для изотерм класса L характерен выгнутый относительно оси концентраций начальный участок, так как с увеличением доли занятых адсорбционных мест молекулам адсорбтива сложнее найти вакантное место, особенно если они склонны к образованию больших ассоциатов с повышением их концентрации в растворе за счёт межмолекулярного взаимодействия. Изотермы L<sub>2</sub> характерны для случаев, когда при

определенной концентрации адсорбтива адсорбция достигает предела. Если адсорбция продолжается и после заполнения монослоя, то возможны изотермы L3, которые при насыщении адсорбционного слоя и появлении второго плато переходят в изотермы L4. Это может быть обусловлено полимолекулярной адсорбцией или переориентацией молекул или их ассоциатов относительно поверхности сорбента. Наличие максимума на изотермах типа L5 возможно в результате какого-либо изменения, происходящего с растворённым веществом, например, при мицеллообразовании, или при наличии примесей высокоактивных веществ (например, ПАВ), находящихся в виде ассоциатов с молекулами адсорбтива.

**Изотермы класса Н** в области низких концентраций имеют круто восходящий, практически вертикальный участок. Это возможно в случае большого сродства адсорбата к адсорбенту и чрезвычайно сильной адсорбции, которая может привести к образованию химических соединений на поверхности сорбента (хемосорбции). Часто изотермы класса Н являются следствием обмена между функциональными группами сорбента и ионами, образующимися при диссоциации адсорбтива в растворителе. Изотермы этого класса наблюдаются при адсорбции жирных кислот из бензола на никеле Ренея, при адсорбции стеариновой кислоты на натриевой селитре из бензола, при адсорбции хлорида додециламмония на оксиде алюминия из воды.

**Изотермы класса С** отличаются линейным начальным участком, что соответствует сохранению числа адсорбционных центров в широком диапазоне концентраций вплоть до максимально возможной адсорбции адсорбтива из раствора. При этом может реализоваться случай, когда по мере заполнения одних центров появляются новые и доступная для адсорбции поверхность увеличивается пропорционально количеству адсорбированного из раствора вещества. Так, при адсорбции красителей на микропористых волокнистых материалах (полимерах) происходит увеличение поверхности адсорбента пропорционально количеству адсорбированного вещества (происходит раскрытие ранее недоступной поверхности – механизм замка на застежке «молния»).

Условиями получения изотерм класса С являются наличие у пористого сорбента «гибких» слоев или областей с различной степенью кристалличности, высокое сродство адсорбирующегося

вещества к сорбенту, большая проникающая способность адсорбтива и геометрия молекулы адсорбтива.

Кроме того, изотермы класса С описывают адсорбцию вещества, распределённого между двумя несмешивающимися растворителями.

## 2. Анализ экспериментальных изотерм адсорбции

Чаще всего экспериментальные изотермы адсорбции растворённых веществ из растворов имеют вид L1 или L2, поэтому для их анализа используют уравнения Фрейндлиха, Ленгмюра или Дубинина – Астахова, а для анализа линейных изотерм – уравнение Генри. О приемлемости этих моделей можно судить по значению среднеквадратичного отклонения  $R^2$ .

### 2.1. Уравнение Генри

При адсорбции из низкоконцентрированных растворов количество адсорбированного вещества прямо пропорционально содержанию адсорбтива в растворе. Следовательно, экспериментальная изотерма представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат (кроме изотерм класса Н). Эти начальные участки хорошо описываются уравнением изотермы Генри<sup>2</sup>:

$$\Gamma = K_H C,$$

где  $\Gamma$  – величина адсорбции (моль/г),  $C$  – равновесная концентрация (моль/л) и  $K_H$  – константа Генри (л/г), которая характеризует распределение вещества между адсорбентом и раствором. На её величину влияют температура и природа веществ, но она не зависит от концентрации адсорбтива.

Закон Генри выполняется только при низких степенях заполнения поверхности адсорбатом, поэтому область его действия мала. Неоднородность поверхности и усиление взаимодействия между адсорбированными молекулами с увеличением степени заполнения поверхности приводят к отклонению от линейной зависимости.

---

<sup>2</sup> Уильям Генри – британский химик, обладатель медали Копли (1808 г.), основатель Института механики, который впоследствии стал Институтом наук и технологий Манчестерского университета.

## 2.2. Уравнение Ленгмюра

Если на поверхности адсорбента может адсорбироваться только один слой молекул, то с ростом концентрации растворённого вещества происходит насыщение поверхности молекулами адсорбата (рис. 2). Данная теория мономолекулярной адсорбции была предложена американским химиком Ирвингом Ленгмюром<sup>3</sup> и основывается на следующих допущениях:

А) адсорбция локализована (молекулы не перемещаются по поверхности) на отдельных адсорбционных центрах, каждый из которых взаимодействует только с одной молекулой адсорбата;

Б) адсорбционные центры энергетически эквивалентны – поверхность адсорбента эквипотенциальна;

В) адсорбированные молекулы не взаимодействуют друг с другом;

Г) при адсорбции происходит обратимая квазихимическая реакция между распределяемым компонентом и адсорбционными центрами поверхности.

Уравнение Ленгмюра широко используют для описания экспериментальных изотерм адсорбции:

$$\Gamma = \Gamma_{\max} \frac{K_L(C/C_0)}{1 + K_L(C/C_0)},$$

где  $\Gamma$  – величина адсорбции (моль/г),  $\Gamma_{\max}$  – ёмкость адсорбционного монослоя или максимальная величина адсорбции (моль/г),  $C$  – равновесная концентрация (моль/л),  $C_0$  – стандартная концентрация, равная 1 моль/л,  $K_L$  – константа равновесия процесса взаимодействия адсорбата с адсорбентом (константа Ленгмюра). Линейная

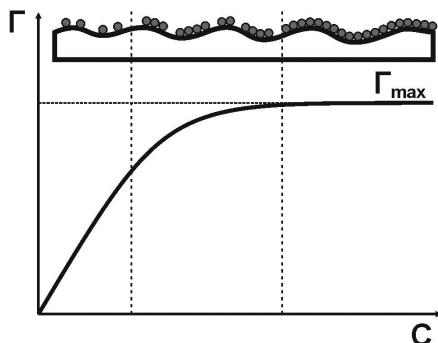


Рис. 2. Изотерма мономолекулярной адсорбции

<sup>3</sup> Ирвинг Ленгмюр – лауреат Нобелевской премии по химии в 1932 г. «за открытия и исследования в области химии поверхностных явлений».

форма уравнения Ленгмюра удобна для анализа экспериментальных изотерм адсорбции:

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_{max}} + \frac{1}{K_L \cdot \Gamma_{max}} \cdot \frac{C_0}{C}.$$

Используя полученные значения  $\Gamma_{max}$  и  $K_L$ , можно вычислить максимальный объём ( $V_0$ ) адсорбированного вещества, стандартную энергию Гиббса адсорбции ( $\Delta G_{ads}^0$ ) и площадь ( $\omega$ ), которую занимает одна молекула адсорбата («посадочная площадка»):

$$V_0 = \frac{\Gamma_{max} \cdot M_{вещества}}{\rho_{вещества}},$$

$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln K_L,$$

$$\omega = \frac{\Gamma_{y\delta}}{\Gamma_{max} \cdot N_A},$$

где  $M$  – молярная масса вещества (г/моль),  $\rho$  – плотность вещества (г/см<sup>3</sup>),  $R$  – универсальная газовая постоянная (8,3143 Дж/моль·К),  $T$  – температура (К),  $A_{уд}$  – удельная поверхность сорбента (м<sup>2</sup>/г),  $N_A$  – число Авогадро ( $6,022 \cdot 10^{23}$  1/моль).

Если  $K_L(C/C_0) \ll 1$ , то уравнение Ленгмюра переходит в уравнение Генри. Использование уравнений Генри и Ленгмюра справедливо только для описания изотерм адсорбции, в случае адсорбентов с энергетически эквивалентными адсорбционными центрами.

### 2.3. Уравнение Фрейндлиха

Немецкий химик Герберт Макс Фрейндлих экспериментально показал, что количество адсорбированного вещества часто возрастает не пропорционально его концентрации в растворе, а значительно медленнее, пропорционально корню  $n$ -ой степени из концентрации раствора ( $1/n \approx 0,1-0,7$ ):

$$\Gamma = K_\phi C^{1/n},$$

где  $\Gamma$  – величина адсорбции (моль/г),  $C$  – равновесная концентрация (моль/л),  $K_\phi$  – константа Фрейндлиха.

Как установил советский физик Яков Борисович Зельдович, это уравнение хорошо описывает экспериментальные изотермы

адсорбции в области средних заполнений в случае экспоненциального распределения неоднородностей поверхности адсорбента. Уравнение Фрейндлиха широко используется при обработке экспериментальных адсорбционных данных и в инженерных расчётах. Чаще всего оно применяется в логарифмической форме:

$$\ln \Gamma = \ln K_\phi + \frac{1}{n} \ln C$$

и позволяет графически определить постоянные параметры  $K_\phi$  и  $1/n$ .

## 2.4. Уравнение Дубинина – Астахова

Уравнения Генри, Ленгмюра и Фрейндлиха можно использовать для описания адсорбции на крупнопористых сорбентах, когда диаметр пор намного больше размера молекул адсорбата. В случае микропор ( $r < 2,0$  нм), размер которых соизмерим с размерами адсорбируемых молекул, происходит объёмное заполнение адсорбционного пространства. При этом имеет место одновременное взаимодействие адсортированных молекул, как между собой, так и с поверхностью сорбента. Математическое описание объёмного заполнения микропор было предложено советскими химиками Михаилом Михайловичем Дубининым и Василием Андреевичем Астаховым:

$$\Gamma = \Gamma_{max} \exp \left[ - \left[ \frac{RT}{E_{ad}^{xap}} \ln \left( \frac{C_{max}}{C} \right) \right]^n \right].$$

Здесь  $\Gamma$  – величина адсорбции (моль/г),  $\Gamma_{max}$  – максимальная величина адсорбции (моль/г),  $C$  – равновесная концентрация (моль/л),  $C_{max}$  – концентрация насыщенного раствора (моль/л),  $E_{ad}^{xap}$  – характеристическая энергия адсорбции (Дж/моль),  $n$  – показатель степени, выраженный целыми числами от 1 до 6 в зависимости от пористой структуры адсорбента. Логарифмическая форма уравнения Дубинина – Астахова позволяет графически определить значения  $\Gamma_{max}$  и  $E_{ad}^{xap}$ :

$$\ln \Gamma = \ln \Gamma_{max} - \left[ \frac{RT}{E_{ad}^{xap}} \cdot \ln \left( \frac{C_{max}}{C} \right) \right]^n.$$

Учитывая, что плотность адсорбата в микропорах принимают равной плотности жидкого состояния вещества при температуре адсорбции, предельный адсорбционный объём заполненных микропор ( $V_0$ ) можно вычислить из уравнения:

$$V_0 = \frac{\Gamma_{\max} \cdot M_{вещества}}{\rho_{вещества}},$$

где  $M$  – молярная масса (моль/г),  $\rho$  – плотность вещества (г/см<sup>3</sup>).

Следует отметить, что в микропорах могут адсорбироваться только те молекулы, размеры которых меньше размеров микропор или равны им (ситовой эффект), поэтому микропористые адсорбенты с узким распределением пор по размерам называют молекулярными ситами. Наиболее известными, но не единственными представителями этой группы адсорбентов являются цеолиты.

Средний диаметр пор, в которых адсорбируются молекулы адсорбата, определяется по уравнению:

$$\bar{d} = 2 \cdot \frac{K_{C_6H_6} \cdot \beta}{E_{адс}^{\phi\phi}},$$

где  $K_{C_6H_6}$  – коэффициент для принятого стандарта (бензола), равный 12 нм·кДж/моль;  $\beta$  – коэффициент аффинности, который рассчитывается из соотношения парахоров<sup>4</sup> ( $P$ ) адсорбата и стандартного вещества – бензола:

$$\beta = \frac{P_{вещества}}{P_{C_6H_6}}.$$

Для жидкостей с близкими значениями поверхностного натяжения коэффициент аффинности можно определять, используя соотношение мольных объёмов:

$$\beta = \frac{V_{вещества}^M}{V_{C_6H_6}^M},$$

где  $V_{вещества}^M$  и  $V_{C_6H_6}^M$  – мольные объёмы адсорбата и бензола соответственно.

<sup>4</sup> Парахор – эмпирическая аддитивная величина, отражающая некоторые физические свойства индивидуального вещества.

### **3. Работа А-5. Изучение адсорбции ароматических соединений из водных растворов методом УФ-спектроскопии**

Ароматические соединения широко применяются в промышленности для получения полимеров, красок, лекарств, трансформаторных масел, но при производстве и использовании они могут попадать в воду. Основным способом её очистки является адсорбция ароматических соединений на активных углях.

Содержание ароматического соединения в исходных растворах и растворах после адсорбции обычно определяется фотометрически при длинах волн  $\lambda = 268$  нм и  $\lambda = 276$  нм, где наблюдается максимальное поглощение, характерное для ароматического кольца. Оптимальный выбор рабочих длин волн для конкретного исследуемого вещества можно сделать в ходе выполнения работы, используя сканирующий УФ-спектрофотометр.

*Цель работы – получить изотермы адсорбции ароматического соединения на углеродном адсорбенте и проанализировать их, используя уравнения Генри, Фрейндлиха, Ленгмюра и Дубинина – Астахова.*

*Для выполнения лабораторной работы необходимы:*

- УФ-спектрофотометр;
- 2 кварцевые кюветы толщиной 10 мм с крышечками;
- мерные колбы на 100 мл – 8 шт.;
- конические колбы на 50 мл со стеклянными пробками – 8 шт.;
- лабораторный стакан на 250 мл – 1 шт.;
- насыщенный раствор 1,2-ДХБ (или другого ароматического соединения по выбору преподавателя) в мерной колбе 1 л;
- активный уголь марки АГ-2000 (или иной по выбору преподавателя);
- пипетка на 25 мл с делениями – 1 шт.;
- дистиллированная вода;
- герметизирующая плёнка Parafilm – 5 см;
- лабораторный шейкер ПЭ-0034 (желательно);
- аналитические весы с разрешением 0,1 мг;
- бумажные салфетки;
- хромовая смесь;
- специальная ёмкость с этикеткой «Слив органики»;
- резиновые перчатки.

## **Порядок подготовки к выполнению работы**

Все работы по приготовлению растворов ароматических соединений и адсорбция проводятся в вытяжном шкафу при включённой вентиляции. Для соблюдения техники безопасности работы с ароматическими веществами проводят в резиновых перчатках.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо убедиться, что вся лабораторная посуды чистая. Если присутствуют загрязнения, её следует промыть хромовой смесью и затем многократно ополоснуть дистиллированной водой, высушить.

В мерных колбах на 100 мл приготовить водные растворы 1,2-ДХБ (или другого ароматического соединения по выбору преподавателя) путём разбавления его насыщенного раствора с концентрацией 0,0009 моль/л (при 20 °C) в 1,2; 1,5; 2; 4; 6; 7 и 8 раз. Рассчитать концентрацию полученных растворов.

Проверить работоспособность приборов: УФ-спектрофотометра, шейкера и аналитических весов.

## **Порядок выполнения работы**

1. В каждую из 8-ми конических колб поместить навеску угля массой 0,006 г и прилить по 60 мл ранее приготовленных водных растворов 1,2-ДХБ разной концентрации (налить почти до пробки в колбу на 50 мл). Колбы закрыть стеклянными пробками и герметизировать плёнкой Parafilm.
2. Колбы установить на шейкер и закрепить с помощью держателей. Включить шейкер для равномерного встряхивания растворов с адсорбентом при комнатной температуре. Длительность процесса адсорбции для достижения равновесных условий составляет 24 часа.
3. Через 24 часа отключить шейкер и дать осесть углеродному сорбенту.
4. Определить оптическую плотность всех исходных растворов (с известной концентрацией) и растворов после адсорбции с помощью УФ-спектрофотометра. Измерения проводить, начиная с менее концентрированных растворов 1,2-ДХБ. В кювету сравнения поместить дистиллированную воду. Капли с поверхности кювет удалять бумажными салфетками.

5. После выполнения экспериментов все растворы слить в специальную ёмкость с этикеткой «Слив органики» и лабораторную посуду хорошо промыть хромовой смесью и многоократно ополоснуть дистиллированной водой.

### Обработка данных

Используя значения оптической плотности ( $\lambda = 268$  и  $276$  нм), полученные для растворов с известной концентрацией, построить калибровочный график (рис. 3).

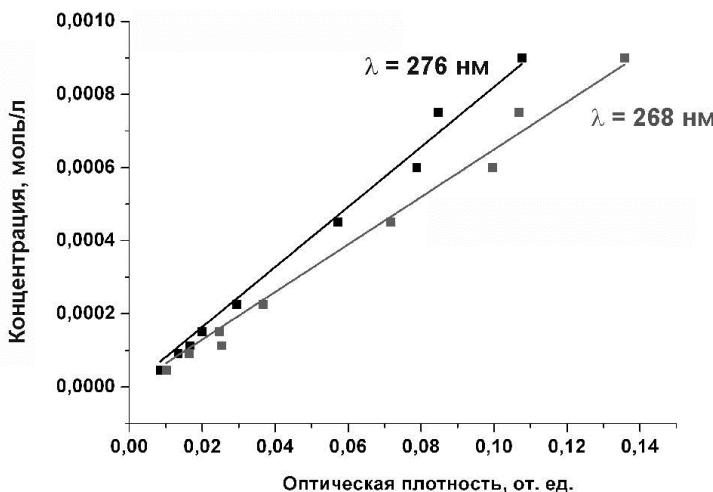


Рис. 3. Общий вид калибровочных графиков для определения концентрации растворов по измерениям оптической плотности при  $\lambda = 268$  и  $276$  нм

Определить концентрацию 1,2-ДХБ в растворах после адсорбции с помощью калибровочного графика. Количество адсорбированного вещества (моль/гугля), отнесённое к массе угля, рассчитать по уравнению:

$$\Gamma = \frac{\Delta C \times V}{m},$$

где  $\Delta C$  – разность исходной концентрации раствора 1,2-ДХБ и концентрации раствора после адсорбции (моль/л),  $V$  – объём раствора (л),  $m$  – масса адсорбента (г).

Построить экспериментальную изотерму адсорбции в координатах  $A-C$ , а также в координатах линейной формы уравнения Генри, Фрейндлиха, Ленгмюра и Дубинина – Астахова.

Проанализировать приемлемость моделей для описания адсорбции 1,2-ДХБ на активном угле из водных растворов, учитывая значение среднеквадратичного отклонения  $R^2$ .

**Отчёт о работе должен содержать:**

- первичные данные (расчёт концентраций разбавленных растворов 1,2-ДХБ),
- результаты измерения оптической плотности (табл. 1),
- калибровочный график,
- экспериментальную изотерму адсорбции (указать класс изотермы),
- значения равновесной концентрации, адсорбции, предельного адсорбционного объёма, стандартной энергии Гиббса адсорбции, размера «посадочной площадки», характеристической энергии адсорбции и среднего диаметра пор, в которых адсорбируются молекулы адсорбата (табл. 2),
- результаты адсорбции, представленные в координатах линейной формы уравнений Генри, Фрейндлиха, Ленгмюра и Дубинина – Астахова,
- вывод о механизме адсорбции 1,2-ДХБ на активном угле из водных растворов.

*Таблица 1*

**Результаты измерения оптической плотности  
растворов 1,2-ДХБ до и после адсорбции**

Исходная концентра- ция раствора	Оптическая плотность				Концентрация после адсорб- ции
	до адсорбции		после адсорбции		
	268 нм	276 нм	268 нм	276 нм	

Таблица 2

**Параметры уравнений Генри, Фрейндлиха, Ленгмюра и Дубинина – Астахова, определённые графически**

Уравнение	Параметр	Значение с указанием единиц измерения
Генри	$K_H$	
	$R^2$	
Ленгмюра	$\Gamma_{max}$	
	$V_0$	
	$K_L$	
	$-\Delta G_{ad}^0$	
	$\omega$	
	$R^2$	
Фрейндлиха	$K_\phi$	
	$1/n$	
	$R^2$	
Дубинина – Астахова $n = 1$	$\Gamma_{max}$	
	$V_0$	
	$E_{ad}^{xap}$	
	$\bar{d}$	
	$R^2$	
Дубинина – Астахова $n = 2$	$\Gamma_{max}$	
	$V_0$	
	$E_{ad}^{xap}$	
	$\bar{d}$	
	$R^2$	
Дубинина – Астахова $n = 3$	$\Gamma_{max}$	
	$V_0$	
	$E_{ad}^{xap}$	
	$\bar{d}$	
	$R^2$	

## **Контрольные вопросы**

1. Общие закономерности адсорбции веществ из водных растворов на твёрдой поверхности.
2. Классификация экспериментальных изотерм адсорбции из растворов по Гильсу.
3. Условия применимости уравнений Генри, Фрейндлиха, Ленгмюра и Дубинина – Астахова для анализа экспериментальных изотерм адсорбции из растворов.
4. Методика определения концентрации растворов с помощью УФ-спектроскопии.
5. Определение ёмкости адсорбционного монослоя и площади «посадочной площадки».
6. Что такое ситовой эффект?

## **Библиографический список**

1. *Адсорбция из растворов на поверхности твёрдых тел* / Под ред. Г. Парфит и К. Рочестер. М.: Мир, 1986. 488 с.
2. Giles C. H., MacEwan T. H., Nakhwa S. N., Smith D. Studies in adsorption: A system of classification of solution adsorption isotherms // Journal of the Chemical Society. 1960. № 3. Р. 3973–3993.
3. Карнаухов А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука (СО РАН). 1999. 470 с.
4. Когановский А. М., Левченко Т. М. О применимости уравнений теории объёмного заполнения микропор к адсорбции из растворов активированными углями // Журнал физической химии. 1972. № 7. С. 1789–1792.
5. Астракова Т. В., Юстратов В. П., Краснова Т. А. Адсорбция капролактама из водных растворов углеродными сорбентами // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. № 7. С. 29–34.
6. Netskina O. V., Tayban E. S., Moiseenko A. P., Komova O. V., Mukha S. A., Simagina V. I. Removal of 1,2-dichlorobenzene from water emulsion using adsorbent-catalysts and its regeneration // Journal of Hazardous Materials. 2015. № 285. Р. 84–93.
7. Практикум по физической химии НГУ. Химическая термодинамика и кинетика: учеб.-метод. пособие / В. А. Рогов, Е. С. Рудаков, С. С. Арзуманов и др. Новосибирск: НГУ, 2013. Ч. 1. Химическая термодинамика.

Учебное издание

**Нецкина Ольга Владимировна**

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ НГУ  
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА

**АДСОРБЦИЯ ИЗ РАСТВОРОВ НА ТВЁРДОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ**

Методическое пособие

Редактор *A. B. Грасмик*  
Оригинал-макет *H. B. Ложкиной*

Подписано в печать 03.06.2015 г.  
Формат 60x84 1/16  
Уч.-изд. л. 1,05. Усл. печ. л. 1,0.

Редакционно-издательский центр НГУ.  
630090, Новосибирск-90, ул. Пирогова, 2.