

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессио-  
нального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор-директор ИПР

\_\_\_\_\_ А.К. Мазуров  
« \_\_ » \_\_\_\_\_ 2011 г.

**АДСОРБЦИЯ НА ОДНОРОДНОЙ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
УРАВНЕНИЕ ЛЭНГМЮРА**

Методические указания к выполнению расчетной лабораторной работы  
по дисциплинам «Поверхностные явления и дисперсные системы» и  
«Коллоидная химия» для студентов ИПР

*Составитель* **Е.В. Михеева**

Издательство  
Томского политехнического университета  
2011

УДК 541.18(076.5)  
ББК 24.6Я73  
М695

М695 **Адсорбция на однородной твердой поверхности. Уравнение Лэнгмюра:** методические указания к выполнению расчетной лабораторной работы по дисциплинам «Поверхностные явления и дисперсные системы и «Коллоидная химия»» для студентов ИПР/ сост. Е.В. Михеева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 36 с.

**УДК 541.18(076.5)  
ББК 24.6Я73**

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром кафедры  
физической и аналитической химии ИПР  
«13» сентября 2010 г.

Зав. кафедрой ФАХ  
доктор хим. наук,  
профессор

\_\_\_\_\_ *А.А. Бакибаев*

*Рецензент*  
Кандидат химических наук  
Доцент кафедры ФАХ ИПР ТПУ  
*Н.П. Пикула*

© Составление. ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2011  
© Михеева Е.В., составление, 2011  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2011

## **Адсорбция на однородной твердой поверхности. Уравнение Лэнгмюра**

### **План коллоквиума**

#### **по теме «Адсорбция на границе твердое тело - газ»**

1. Адсорбция. Количественные способы выражения величины адсорбции. Физическая и химическая адсорбция. Экспериментальные зависимости адсорбции.

2. Теория мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра. Уравнение мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра. Расчет констант в уравнении Лэнгмюра.

3. Эмпирическое уравнение адсорбции Фрейндлиха. Расчет констант в уравнении Фрейндлиха.

4. Теория полимолекулярной адсорбции Поляни. Основные положения. Адсорбционный потенциал. Особенности характеристической кривой.

5. Теория адсорбции БЭТ. Основные положения. Уравнение полимолекулярной адсорбции БЭТ. Расчет констант в уравнении БЭТ. Применение уравнения теории БЭТ к описанию изотерм адсорбции различного вида. Ограничения теории БЭТ.

6. Адсорбция на пористых сорбентах. Классификация пористых сорбентов. Капиллярная конденсация на пористых сорбентах.

### **Список литературы**

1. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: Химия, 1989. – С.129-174.

2. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. – СПб: Химия, 1995. – С.150-178.

3. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.:Химия, 1976. – С.8-113.

4. Зимон А.Д., Лещенко Н.Ф. Коллоидная химия. – М.: Химия, 1995. – С. 62-64, 68-77, 98-102.

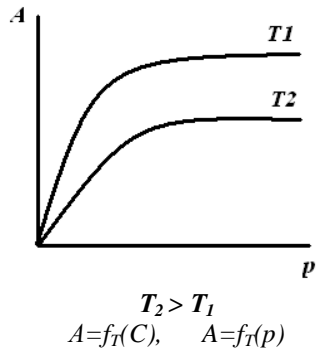
5. Шершавина А.А. Индивидуальные задания по коллоидной химии: учебн.пособие. – Минск: Новое знание, 2008. – С.112 – 126.

## Теоретическая часть

**Адсорбция** – процесс самопроизвольного перераспределения компонентов системы между поверхностным слоем и объемной фазой, т.е. поглощение одного вещества поверхностью другого.

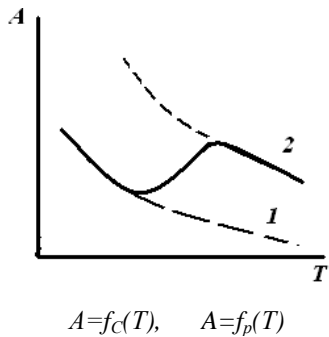
С термодинамической точки зрения **адсорбция** – самопроизвольный процесс выравнивания химических потенциалов компонента в объеме системы и поверхностном слое. Этот процесс происходит вследствие стремления к минимуму поверхностной энергии или энергии Гиббса системы.

### Основные экспериментальные зависимости адсорбции



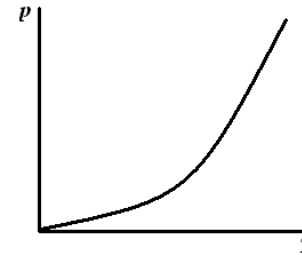
**1. Изотерма адсорбции** – зависимость адсорбции от равновесного давления или равновесной концентрации при  $T = const$ .

С повышением температуры увеличивается десорбция, следовательно, адсорбция уменьшается.



**2. Изобара (изопикта) адсорбции** – зависимость адсорбции от температуры при постоянной концентрации или давлении адсорбата ( $C, p = const$ ):

1 – изобара при физической адсорбции, 2 – при хемосорбции.



**3. Изостера адсорбции** – зависимость концентрации или парциального давления от температуры при постоянной величине адсорбции  $A=const$  (расчетная зависимость, позволяющая определить теплоту адсорбции).

$$C=f_A(T), \quad p=f_A(T)$$

Наиболее распространенной зависимостью, получаемой экспериментально, является изотерма адсорбции, так как проще всего обеспечить постоянство температуры.

Количественные закономерности адсорбции делятся на две группы: закономерности, описывающие адсорбцию на однородных поверхностях, и закономерности для пористых адсорбентов. Это объясняется различием в энергетическом состоянии однородной и пористой поверхностей, и, соответственно, различием в количественном описании протекающих на них процессов адсорбции.

Примером непористых адсорбентов с однородной поверхностью могут служить графитированные термические сажи, листочки расщепленного графита или других кристаллов, имеющих слоистую структуру.

Моделью, описывающей адсорбцию на однородной твердой поверхности, может служить теория мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра.

#### ***Теория мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра***

1. Адсорбция молекул адсорбата происходит на активных центрах, всегда существующих на поверхности адсорбента. Активные центры адсорбента энергетически равноценны.

2. Каждый активный центр может адсорбировать только одну молекулу адсорбата. В результате этого на поверхности адсорбента образуется **мономолекулярный слой** адсорбата.

3. Адсорбированные молекулы не взаимодействуют друг с другом. Поэтому время пребывания молекул на активных центрах не зависит от того, заняты молекулами соседние активные центры или нет.

4. Адсорбция носит динамический характер. Адсорбат удерживается на поверхности адсорбента некоторое время, а потом десорбируется.

На основе приведенных исходных положений Лэнгмюром было предложено уравнение **изотермы мономолекулярной адсорбции**, которое для адсорбции газов на однородной твердой поверхности имеет вид:

$$A = A_{\infty} \frac{Kp}{1 + Kp}, \quad (1)$$

где  $p$  – равновесное давление адсорбтива;  $K$  – константа адсорбционного равновесия, характеризующая энергию взаимодействия адсорбата и адсорбента;  $A_{\infty}$  – предельная адсорбция (емкость адсорбционного монослоя).

Типичный вид изотермы Лэнгмюра показан на рис. 1. На изотерме адсорбции Лэнгмюра выделяют три участка:

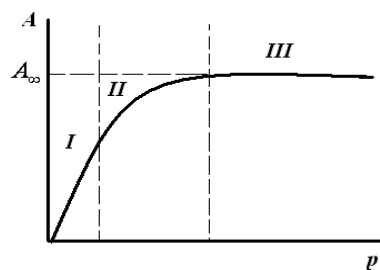


Рис.1. Изотерма мономолекулярной адсорбции Лэнгмюра в координатах  $A=f(p)$ .

**I** – в области малых давлений ( $p \rightarrow 0$ ,  $Kp \ll 1$ ), тогда:

$A = A_{\infty} \cdot Kp$ , величина адсорбции линейно растет с увеличением концентрации (уравнение Генри).

**III** – в области больших давлений ( $Kp \gg 1$ ), тогда:  $A = A_{\infty}$ , вся поверхность адсорбента занята молекулами адсорбата.

**II** – в области средних давлений уравнение (1).

#### **Расчет констант уравнения Лэнгмюра**

Константы ( $K$  и  $A_{\infty}$ ) уравнения Лэнгмюра рассчитывают графическим способом, для этого уравнение (1) приводят к линейному виду:  $y = a + bx$ .

$$\frac{p}{A} = \frac{1}{A_{\infty}K} + \frac{1}{A_{\infty}} p. \quad (2)$$

Строят изотерму адсорбции в координатах линейной формы уравнения Лэнгмюра (рис.2):

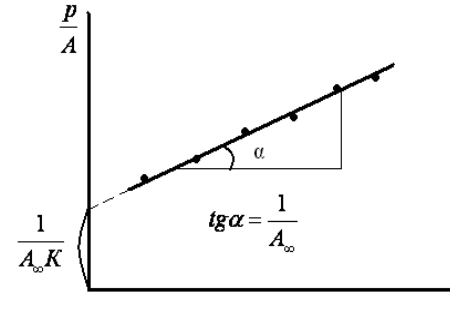


Рис.2. Изотерма адсорбции в координатах линейной формы уравнения Лэнгмюра.

Зная величину  $A_\infty$ , можно рассчитать удельную поверхность адсорбента:

$$S_{уд} = A_\infty \cdot N_A \cdot S_0, \quad (6)$$

где  $S_0$  – площадь, занимаемая одной молекулой адсорбата,  $N_A$  – число Авогадро.

Представления, развитые Лэнгмюром, в значительной степени идеализируют и упрощают действительную картину адсорбции. На самом деле поверхность большинства адсорбентов энергетически неоднородна, между молекулами адсорбата имеют место «боковые» взаимодействия.

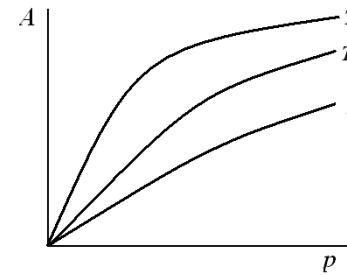


Рис. 3. Изотермы адсорбции при различных температурах ( $T_1 > T_2 > T_3$ )

Экстраполяция зависимости до оси ординат дает отрезок, равный:

$$\frac{1}{A_\infty K}. \quad (3)$$

Тангенс угла наклона прямой равен:

$$tg \alpha = \frac{1}{A_\infty}, \quad (4)$$

$$\text{или } A_\infty = ctg \alpha. \quad (5)$$

При адсорбции теплота обычно выделяется, поэтому  $A$  и  $K$  по мере роста температуры уменьшаются:

Константа адсорбционного равновесия  $K$  связана с энтальпией адсорбции уравнением:

$$\frac{\partial \ln K}{\partial T} = \frac{\Delta H}{RT^2} \quad (7)$$

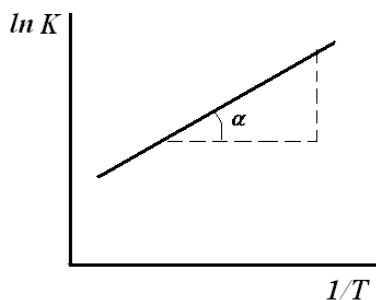
Установив экспериментальную зависимость константы адсорбционного равновесия  $K$  от температуры, можно определить энтальпию адсорбции (интегральную теплоту адсорбции).

Интегральная теплота адсорбции характеризует интенсивность взаимодействия адсорбента с адсорбатом (газом или паром), она отрицательна, что указывает на выделение теплоты в процессе адсорбции и не зависит от степени заполнения адсорбента газом.

Уравнение (7) применяют для определения интегральной теплоты адсорбции графическим способом, для этого уравнение (7) интегрируют (неопределенный интеграл):

$$\ln K = -\frac{\Delta H}{RT} + B, \quad (8)$$

где  $B$  — постоянная интегрирования.



Интегральную теплоту адсорбции определяют по тангенсу угла наклона прямой (рис.4) по уравнению:

$$\Delta H = -R \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (9)$$

Рис.4. Линейная зависимость  $\ln K$  от обратной температуры.

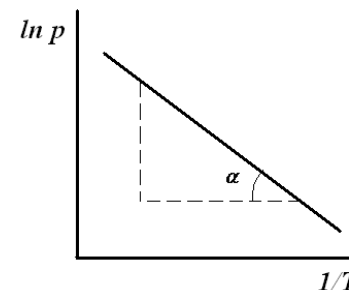
Аналитический способ расчета интегральной теплоты адсорбции основан на уравнении:

$$\Delta H = \frac{RT_1 T_2 \ln(K_2/K_1)}{T_2 - T_1}. \quad (10)$$

Каждой степени заполнения поверхности адсорбента соответствует некоторая дифференциальная теплота адсорбции  $q_A$ . Дифференциальная изостерическая ( $A = \text{const}$ ) теплота адсорбции всегда положительна и уменьшается по мере роста степени заполнения адсорбатом поверхности адсорбента. Если значения  $q_A$  невелики (10 – 40 кДж/моль), то можно говорить о физической адсорбции газов, обусловленной физическими силами. Если рассчитанные значения  $q_A$  находятся в пределах 40 – 400 кДж/моль, то в этом случае адсорбция обусловлена химическими силами (хемосорбция).



Для расчета  $q_A$  строят изостеры адсорбции (зависимости  $p$  от  $T$ ) при разных температурах ( $A = \text{const}$ ). Для построения изостер адсорбции проводят к изотермам адсорбции линии, параллельные оси абсцисс. Графически находят значения  $p$  и  $T$  при разных  $A$ .



Дифференциальную теплоту адсорбции определяют по тангенсу угла наклона прямой  $\ln p = f(1/T)$  (рис.5) по уравнению:

$$q_A = R \cdot \text{tg } \alpha \quad (11)$$

Рис.5. Линейная зависимость  $\ln p$  от обратной температуры.

Аналитический способ расчета дифференциальной теплоты адсорбции основан на уравнении:

$$q_A = \frac{RT_1 T_2 \ln(p_2/p_1)}{T_2 - T_1}. \quad (12)$$

### **Пример выполнения задания с использованием для расчета калькулятора**

#### **Задание:**

Используя экспериментальные данные по адсорбции бензола на графитированной термической саже при нескольких температурах:

$p$ , Па	0	29	49	69	89
$A_{293}$ , моль / кг	0	0,0199	0,0278	0,0332	0,0373
$A_{303}$ , моль / кг	0	0,0129	0,0191	0,0240	0,0279
$A_{313}$ , моль / кг	0	0,0082	0,0127	0,0165	0,0198

1. Постройте три изотермы адсорбции.
2. Рассчитайте константы уравнения Ленгмюра и удельную поверхность адсорбента ( $S_0^{C_6H_6} = 49 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ).

3. Рассчитайте интегральную теплоту адсорбции.

4. Для  $A=0,005$  моль/кг;  $A=0,01$  моль/кг;  $A=0,015$  моль/кг постройте изостеры адсорбции по которым рассчитайте дифференциальную теплоту адсорбции. Проанализируйте полученные результаты.

**Решение:**

1. По экспериментальным данным строим три изотермы адсорбции бензола на графитированной саже:

$A$ , моль/кг

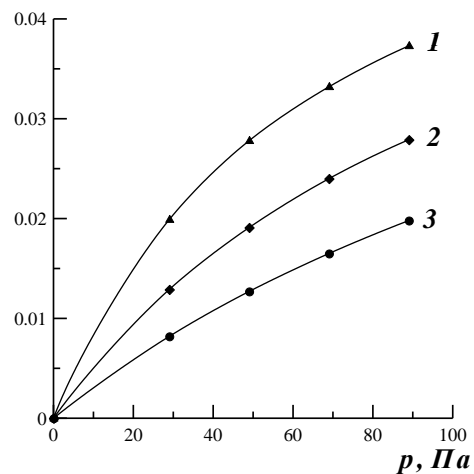


Рис.5. Изотермы адсорбции:  
1 –  $T=293\text{K}$ ; 2 –  $T=303\text{K}$ ; 3 –  $T=313\text{K}$ .

2. Для построения изотермы Лэнгмюра в линейных координатах рассчитаем значения  $p/A$  для каждого значения  $p$  для трех температур. Рассчитанные данные занесем в таблицу:

$p$ , Па	0	29	49	69	89
$p / A_{293}$ , Па · кг / моль	0	1457	1762	2078	2386
$p / A_{303}$ , Па · кг / моль	0	2248	2565	2875	3190
$p / A_{313}$ , Па · кг / моль	0	3537	3858	4182	4495

По рассчитанным данным построим изотермы Лэнгмюра в линейных координатах при трех температурах:

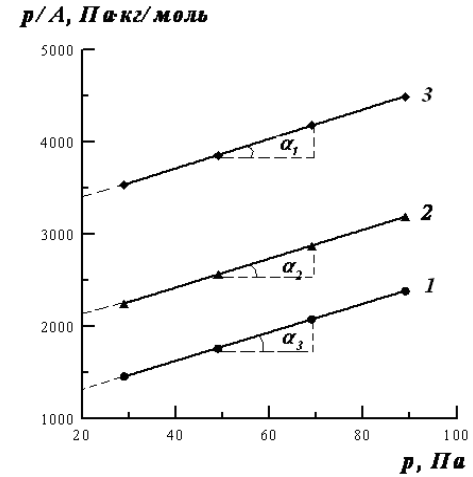


Рис. 6. Изотермы адсорбции в линейных координатах:  
1 – T=293 К; 2 – T=303 К; 3 – T=313 К.

3. Графически рассчитываем константы уравнения Лэнгмюра, полученные данные заносим в таблицу:

$$T_1 = 313 \text{ К}$$

$$A_{\infty 1} = \operatorname{ctg} \alpha_1 = \frac{20 \text{ Па}}{316 \text{ Па} \cdot \text{кг} / \text{моль}} = 0,063 \text{ моль} / \text{кг}$$

$$\frac{1}{A_{\infty 1} K_1} = 3450 \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}}{\text{моль}}, \quad K_1 = \frac{1}{3450 \cdot 0,063} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1}$$

$$T_2 = 303 \text{ К}$$

$$A_{\infty 2} = \operatorname{ctg} \alpha_2 = \frac{20 \text{ Па}}{310 \text{ Па} \cdot \text{кг} / \text{моль}} = 0,064 \text{ моль} / \text{кг}$$

$$\frac{1}{A_{\infty 2} K_2} = 2200 \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}}{\text{моль}}, \quad K_2 = \frac{1}{2200 \cdot 0,064} = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1}$$

$$T_3 = 293 \text{ К}$$

$$A_{\infty 3} = \operatorname{ctg} \alpha_3 = \frac{20 \text{ Па}}{324 \text{ Па} \cdot \text{кг} / \text{моль}} = 0,062 \text{ моль} / \text{кг}$$

$$\frac{1}{A_{\infty 3} K_3} = 1450 \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}}{\text{моль}}, \quad K_3 = \frac{1}{1450 \cdot 0,062} = 11,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1}$$

Результаты расчета занесем в таблицу:

	$A_{\infty}, \text{моль} / \text{кг}$	$K \cdot 10^3, \text{Па}^{-1}$
$T_1 = 293 \text{ K}$	0,063	11,1
$T_2 = 303 \text{ K}$	0,064	7,1
$T_3 = 313 \text{ K}$	0,062	4,6

Из таблицы следует, что величина предельной адсорбции ( $A_{\infty}$ ) постоянна при разных температурах и зависит только от природы адсорбента и адсорбата. Константа адсорбционного равновесия  $K$  уменьшается с увеличением температуры.

4. Рассчитаем удельную поверхность адсорбента по уравнению (6):

$$S_{\text{уд}} = A_{\infty} \cdot N_A \cdot S_0 = 0,063 \text{ моль} / \text{кг} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 49 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 = 1,86 \cdot 10^4 \text{ м}^2 / \text{кг}$$

5. Для расчета интегральной теплоты адсорбции построим график зависимости  $\ln K = f(1/T)$ , предварительно составив таблицу:

$T, \text{K}$	$1/T \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$	$K \cdot 10^3, \text{Па}^{-1}$	$\ln K$
293	3,41	11,1	-4,50
303	3,30	7,1	-4,95
313	3,19	4,6	-5,38

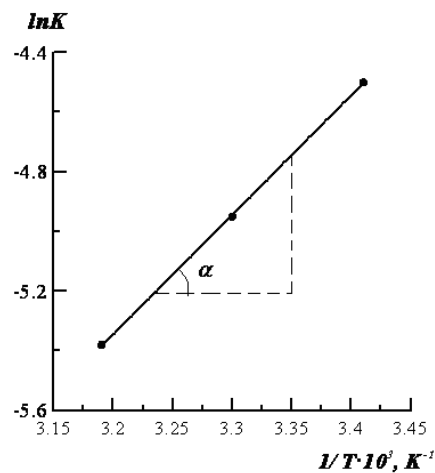


Рис.7. Линейная зависимость  $\ln K$  от обратной температуры.

Рассчитаем тангенс угла наклона прямой и интегральную теплоту адсорбции по уравнению (9):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{-4,77 + 5,21}{(3,35 - 3,21) \cdot 10^{-3}} = 3143 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} \Delta H &= -R \cdot \operatorname{tg} \alpha = -8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль} / \text{K} \cdot 3143 \text{ K} = \\ &= -26131 \text{ Дж} / \text{моль} = -26 \text{ кДж} / \text{моль} \end{aligned}$$

Таким образом, процесс адсорбции бензола на графитированной термической саже идет с выделением тепла (экзотермический процесс).

6. Для построения трех изостер адсорбции при  $A=0,005$  моль/кг;  $A=0,010$  моль/кг;  $A=0,015$  моль/кг проведем к изотермам адсорбции (рис.5) три линии, параллельные оси абсцисс. Составим таблицу зависимости давления от температуры при постоянной величине адсорбции:

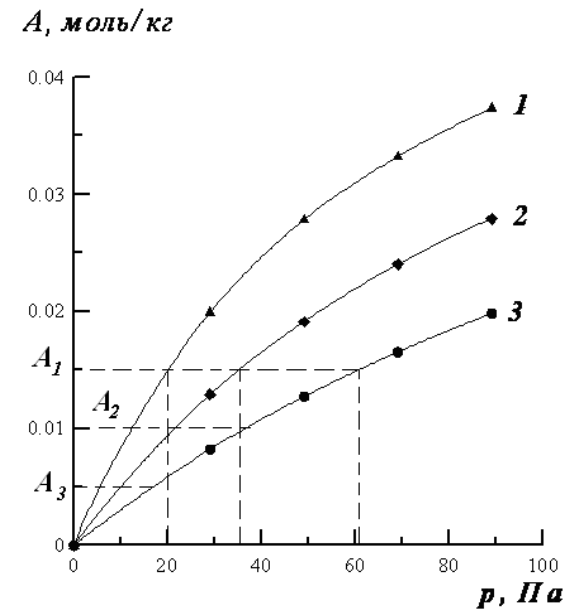


Рис. 8. Изотермы адсорбции:  
1 –  $T=293\text{K}$ ; 2 –  $T=303\text{K}$ ; 3 –  $T=313\text{K}$ .

$A, \text{ моль/кг}$	$T, \text{ К}$	$p, \text{ Па}$
0,005	293	5
	303	10
	313	18
0,010	293	11
	303	21
	313	39
0,015	293	20
	303	36
	313	61

Построим три изостеры адсорбции для  $A=0,005$  моль/кг;  $A=0,010$  моль/кг и  $A=0,015$  моль/кг.

$p, \text{ Па}$

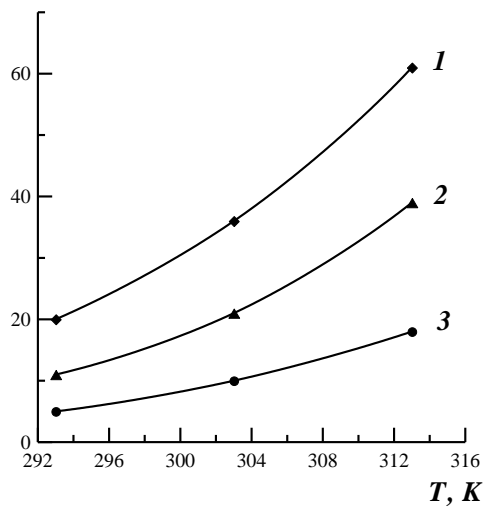


Рис. 9. Изостеры адсорбции:  
1 –  $A=0,015$  моль/кг; 2 –  $A=0,010$  моль/кг и 3 –  $A=0,005$  моль/кг.

7. Для расчета изостерической дифференциальной теплоты адсорбции построим график в координатах  $\ln p = f(1/T)$  для различных значений адсорбции. Предварительно составив таблицу:

$A$ , моль/кг	$T$ , K	$1/T \cdot 10^3$ , $K^{-1}$	$p$ , Па	$\ln p$
0,05	293	3,41	5	1,61
	303	3,30	10	2,30
	313	3,19	18	2,89
0,01	293	3,41	11	2,40
	303	3,30	21	3,04
	313	3,19	39	3,66
0,015	293	3,41	20	3,00
	303	3,30	36	3,58
	313	3,19	61	4,11

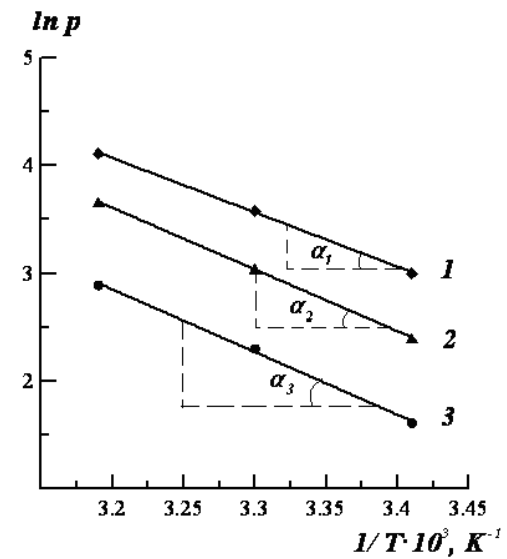


Рис.10. Линейная зависимость  $\ln p$  от обратной температуры:  
 1 -  $A=0,015$  моль/кг; 2 -  $A=0,010$  моль/кг; 3 -  $A=0,005$  моль/кг.

Рассчитаем тангенсы углов наклона полученных прямых и дифференциальные теплоты адсорбции для  $A=0,005$  моль/кг;  $A=0,010$  моль/кг и  $A=0,015$  моль/кг по уравнению (11):

$$1. \quad A = 0,015 \text{ моль/кг}; \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = 4818 \text{ K};$$

$$q_1 = 8,31 \cdot 4818 = 40058 \text{ Дж/моль} = 40 \text{ кДж/моль}$$

2.  $A = 0,010 \text{ моль/кг}$ ;  $\text{tg } \alpha_2 = 5636 \text{ К}$ ;  
 $q_2 = 46838 \text{ Дж/моль} = 47 \text{ кДж/моль}$
3.  $A = 0,005 \text{ моль/кг}$ ;  $\text{tg } \alpha_3 = 5364 \text{ К}$ ;  
 $q_3 = 44572 \text{ Дж/моль} = 45 \text{ кДж/моль}$

Из полученных результатов следует, что изостерическая теплота адсорбции слабо зависит от степени заполнения поверхности. Это свидетельствует о том, что поверхность адсорбента (графитированной сажи) достаточно однородна. Рассчитанные значения  $q_A$  свидетельствуют о том, что адсорбция бензола на графитированной термической саже обусловлена, в основном, физическими силами.

### **Пример выполнения задания с использованием для расчета Microsoft Office Excel**

#### **Задание:**

Используя экспериментальные данные по адсорбции бензола на графитированной термической саже при нескольких температурах:

$p, \text{ Па}$	0	29	49	69	89
$A_{293}, \text{ моль/кг}$	0	0,0199	0,0278	0,0332	0,0373
$A_{303}, \text{ моль/кг}$	0	0,0129	0,0191	0,0240	0,0279
$A_{313}, \text{ моль/кг}$	0	0,0082	0,0127	0,0165	0,0198

1. Постройте три изотермы адсорбции.
2. Рассчитайте константы уравнения Лэнгмюра и удельную поверхность адсорбента ( $S_0^{C_6H_6} = 49 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ).
3. Рассчитайте интегральную теплоту адсорбции.
4. Для  $A=0,005 \text{ моль/кг}$ ;  $A=0,01 \text{ моль/кг}$ ;  $A=0,015 \text{ моль/кг}$  постройте изостеры адсорбции по которым рассчитайте дифференциальную теплоту адсорбции. Проанализируйте полученные результаты.

#### **Решение:**


1. Откройте Excel. Введите в таблицы исходные данные, согласно своему варианту при трех разных температурах.



<i>Исходные данные</i>			
<i>p, Па</i>	<i>A(293) моль/кг</i>	<i>A(303) моль/кг</i>	<i>A(313) моль/кг</i>
0	0	0	0
29	0,0199	0,0129	0,0082
49	0,0278	0,0191	0,0127
69	0,0332	0,024	0,0165
89	0,0373	0,0279	0,0198

По экспериментальным данным постройте изотермы адсорбции бензола на графитированной термической саже при различных температурах. Для этого выделите значения  $A(293)$

0
0,0199
0,0278
0,0332
0,0373

и нажмите пиктограмму . В открывшемся окне выберите тип «Точечная» и нажмите кнопку «Далее». В открывшемся окне перейдите на закладку «Ряд» и в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p$ , Па; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $A(293)$ , в строке «Имя» введите « $A(293)$ , моль/кг». Аналогично введите экспериментальные данные значений адсорбции при других температурах. Для этого в поле «Ряд» нажмите «Добавить», в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p$ , Па; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $A(303)$ ; в строке «Имя» введите « $A(303)$ , моль/кг». Продолжите аналогичные действия для значений адсорбции  $A(313)$ ; нажмите кнопку «Далее». В появившемся окне в закладке «Заголовки» введите соответствующие параметры диаграммы:

«Название диаграммы» – Изотермы адсорбции Лэнгмюра при различных температурах;

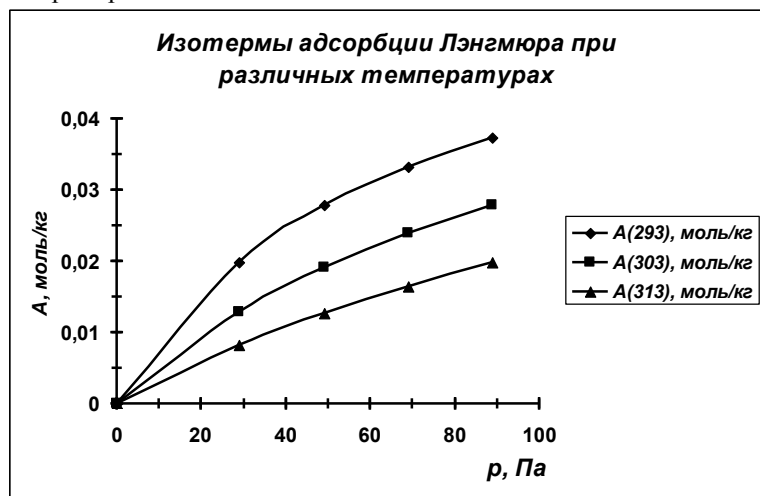
«Ось X (категорий)» –  $p$ , Па;

«Ось Y (категорий)» –  $A$ , моль/кг; нажмите кнопки «Далее» и «Готово».

Поместите построенную диаграмму на имеющемся листе.

Оформление диаграммы может быть совершенно произвольным. Вы можете добавить или убрать «Легенду», добавить или убрать «Линий сетки», добавить или убрать «Рамку», менять цвет и шрифт полей, маркеров, линий, подписей и т.д.

Например:



Из диаграммы следует, что с повышением температура адсорбция уменьшается.

2. Для построения изотермы Ленгмюра в линейных координатах скопируйте на свободное поле исходные значения давлений  $p$ , Па. В ячейке для расчета  $p/A(293)$  нажмите « $\Rightarrow$ », выделите поле значения  $p=29$  нажмите « $\langle$ », выделите ячейку со значением  $A(293)=0,0199$ , нажмите «Enter».


Выделите рассчитанное значение  $p/A(293)$ , переведите курсор в нижний правый угол выделенной ячейки (внизу появится черный крестик), зафиксируйте мышку нажатием левой кнопки и, не отпуская ее, «растяните» формулу вниз на другие ячейки  $p/A(293)$ , произойдет автоматический расчет. Полученные значения округлите, используя пиктограмму «Уменьшить разрядность»  $\times_{,0}^{,00}$ . Аналогичные действия проведите для расчета  $p/A(303)$  и  $p/A(313)$ .

Например:

<i>p, Па</i>	<i>p/A(293), Па*кг/моль</i>	<i>p/A(303), Па*кг/моль</i>	<i>p/A(313), Па*кг/моль</i>
29	1457	2248	3537
49	1763	2565	3858
69	2078	2875	4182
89	2386	3190	4495

По рассчитанным данным постройте изотермы Лэнгмюра в линейных координатах при трех разных температурах. Для этого выделите значения  $p, Па$  и  $p/A(293)$

29	1457
49	1763
69	2078
89	2386

и нажмите пиктограмму . В открывшемся окне выберите тип «Точечная» и нажмите кнопку «Далее». В открывшемся окне перейдите на закладку «Ряд» и в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p, Па$ , в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p/A(293)$ , в строке «Имя» введите « $p/A(293)$ ». Аналогично введите расчетные данные значений  $p/A$  при других температурах. Для этого в поле «Ряд» нажмите «Добавить», в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p, Па$ ; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p/A(303)$ ; в строке «Имя» введите « $p/A(303)$ ». Продолжите аналогичные действия для значений  $p/A(313)$ ; нажмите кнопку «Далее». В появившемся окне в закладке «Заголовки» введите соответствующие параметры диаграммы:

«Название диаграммы» – Изотермы адсорбции Лэнгмюра в линейных координатах при различных температурах;

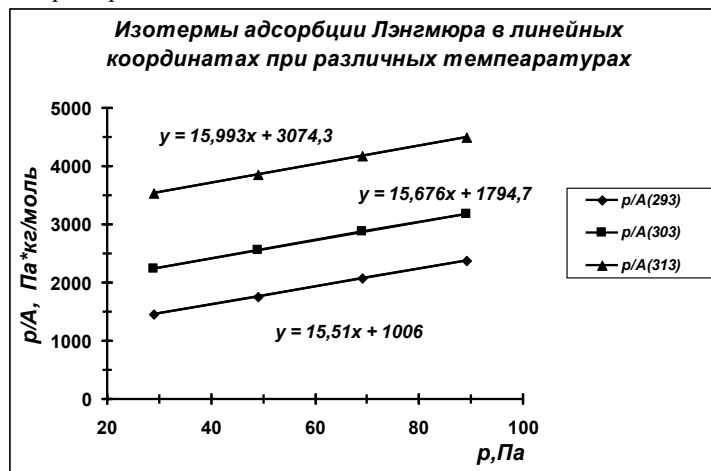
«Ось X (категорий)» –  $p, Па$ ;

«Ось Y (категорий)» –  $p/A, Па*кг/моль$ ; нажмите кнопки «Далее» и «Готово».

Поместите построенные изотермы на имеющемся листе. Оформление диаграммы может быть совершенно произвольным. Вы можете добавить или убрать «Легенду», добавить или убрать «Линий сетки», добавить или убрать «Рамку», менять цвет и шрифт полей, маркеров, линий, подписей и т.д.

Так как построенные изотермы должны представлять собой прямые, то необходимо к каждой изотерме «Добавить линию тренда». Для этого поставьте курсор на один из цветных маркеров и нажмите правую кнопку мышки, появится поле «Формат рядов данных». В этом поле нажмите «Добавить линию тренда», тип «Линейная», перейдите в закладку «Параметры» и поставьте галочку в поле «Показывать уравнение на диаграмме». Программа автоматически рассчитает уравнение прямой и покажет его на диаграмме. Аналогичные действия выполните для остальных прямых.

Например:




3. Рассчитайте константы уравнения Лэнгмюра, используя полученное уравнение прямой. Согласно уравнению прямой  $y = a + bx$ , величины  $a$  и  $b$  соответственно будут равны:

$T, K$	$a$	$b$
293	1006	15,51
303	1765	15,68
313	3074	15,99

В следующем столбце рассчитайте значения предельной адсорбции при  $T = 293 K$

$$A_{\infty 3} = \frac{1}{b} = \frac{1}{15,51} = 0,064 \text{ моль/кг}$$


Для этого в ячейке для расчета  $A_\infty$  нажмите «=1/», выделите поле значения  $b = 15,51$ , нажмите «Enter».

Выделите рассчитанное значение  $A_\infty$ , переведите курсор в нижний правый угол выделенной ячейки (внизу появится черный крестик), зафиксируйте мышку нажатием левой кнопки и, не отпуская ее, «растяните» формулу вниз на другие ячейки  $A_\infty$ , произойдет автоматический расчет. Полученные значения округлите, используя пиктограмму «Уменьшить разрядность» .

Рассчитайте значения константы адсорбционного равновесия  $K$  при  $T = 293 \text{ K}$

$$\frac{1}{A_{\infty 3} K_3} = 1006 \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}}{\text{моль}}, \quad K_3 = \frac{1}{1006 \cdot 0,064} = 15,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1}$$

В ячейке для расчета  $K$  нажмите «=», нажмите 1/, выделите поле значения  $a=1006$ , нажмите «\*», выделите поле значения  $A_\infty=0,064$ , нажмите «Enter».

Выделите рассчитанное значение  $K$ , переведите курсор в нижний правый угол выделенной ячейки (внизу появится черный крестик), зафиксируйте мышку нажатием левой кнопки и, не отпуская ее, «растяните» формулу вниз на другие ячейки  $K$ , произойдет автоматический расчет. Полученные значения округлите, используя пиктограмму «Уменьшить разрядность» .

Например:

**Расчет констант уравнения Лэнгмюра**

$T$	$a$	$b$	$A_\infty$	$K$
293	1006	15,51	0,064	0,0154
303	1765	15,68	0,064	0,0089
313	3074	15,99	0,063	0,0052

Из таблицы следует, что величина предельной адсорбции ( $A_\infty$ ) постоянна при разных температурах и зависит только от природы адсорбента и адсорбата. Константа адсорбционного равновесия ( $K$ ) с увеличением температуры уменьшается, что говорит о том, что с увеличением температуры возрастает скорость десорбции.


4. Рассчитайте удельную поверхность адсорбента по уравнению (6):

$$S_{y0} = A_\infty \cdot N_A \cdot S_0 = 0,064 \text{ моль} / \text{кг} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 49 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 = 1,89 \cdot 10^4 \text{ м}^2 / \text{кг}$$

### 5. Расчет интегральной теплоты адсорбции.


Для расчета интегральной теплоты адсорбции необходимо построить график зависимости  $\ln K = f(1/T)$ , предварительно составив таблицу.

**Расчет 1/T.** Скопируйте на свободное поле значения T, K. В следующем столбце рассчитайте значения 1/T. Для этого выделите ячейку для расчета, нажмите «=», нажмите «1/», выделите ячейку со значением T=293, нажмите «Enter».

Выделите рассчитанное значение 1/T, переведите курсор в нижний правый угол выделенной ячейки (внизу появится черный крестик), зафиксируйте мышку нажатием левой кнопки и, не отпуская ее, «растяните» формулу вниз на другие ячейки 1/T, произойдет автоматический расчет. Полученные значения округлите, используя пиктограмму «Уменьшить разрядность» .

**Расчет ln K.** В следующем столбце скопируйте значения константы адсорбционного равновесия K при помощи «Специальной вставки». Для этого выделите рассчитанные значения K, нажмите пиктограмму «Копировать», выделите столбец, в которых необходимо вставить данные, нажмите правую кнопку мыши, нажмите «Специальная вставка» поле «Значения». Программа вставит только рассчитанные значения K

Поставьте курсор в ячейку для расчета нажмите «=», введите ln (выделите ячейку со значением K=0,0154), нажмите «Enter».

Выделите рассчитанное значение ln K, переведите курсор в нижний правый угол выделенной ячейки (внизу появится черный крестик), зафиксируйте мышку нажатием левой кнопки и, не отпуская ее, «растяните» формулу вниз на другие ячейки ln K, произойдет автоматический расчет. Полученные значения округлите, используя пиктограмму «Уменьшить разрядность» .


Например:

#### *Расчет интегральной теплоты адсорбции*

<i>T, K</i>	<i>1/T</i>	<i>K</i>	<i>ln K</i>
293	0,0034	0,0154	-4,17
303	0,0033	0,0089	-4,72
313	0,0032	0,0052	-5,26

Для построение линейной зависимости  $\ln K$  от обратной температуры выделите значения  $\ln K$

-4,17
-4,72
-5,26

и нажмите пиктограмму . В открывшемся окне выберите тип «Точечная» и нажмите кнопку «Далее». В открывшемся окне перейдите на закладку «Ряд» и в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $1/T$ , в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $\ln K$ ; нажмите «Далее». В появившемся окне в закладке «Заголовки» введите соответствующие параметры диаграммы:

«Название диаграммы» – Линейная зависимость  $\ln K$  от обратной температуры;

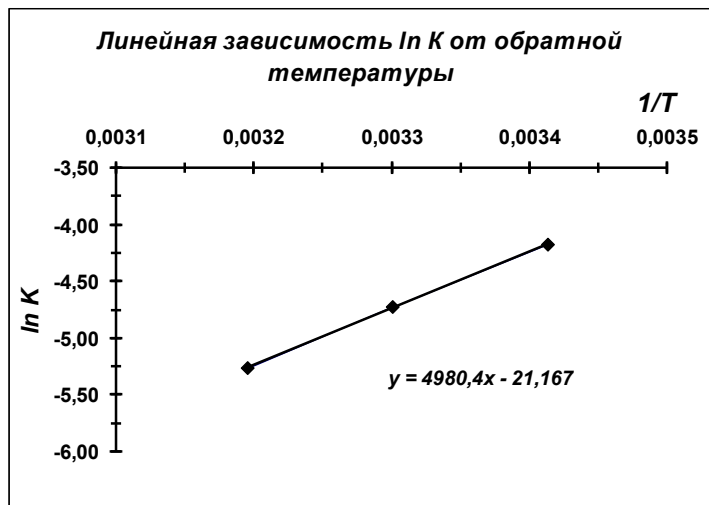
«Ось X (категорий)» –  $1/T$ ;

«Ось Y (категорий)» –  $\ln K$ ; нажмите «Далее» и «Готово».

Поместите построенную диаграмму на имеющемся листе. Оформление диаграммы может быть совершенно произвольным. Вы можете добавить или убрать «Легенду», добавить или убрать «Линий сетки», добавить или убрать «Рамку», менять цвет и шрифт полей, маркеров, линий, подписей и т.д.

Так как построенная зависимость должна представлять собой прямую, то необходимо «Добавить линию тренда», для этого: поставьте курсор на один из цветowych маркеров и нажмите правую кнопку мышки, появится поле «Формат рядов данных». В этом поле нажмите «Добавить линию тренда», тип «Линейная», перейдите в закладку «Параметры» и поставьте галочку в поле «Показывать уравнение на диаграмме». Программа автоматически рассчитает уравнение прямой и покажет его на диаграмме.

Например:



Согласно уравнению прямой  $y = a + bx$ , величина  $b = \operatorname{tg} \alpha = 4980,4$ .

Рассчитайте интегральную теплоту адсорбции по уравнению (9):

$$\begin{aligned} \Delta H &= -R \cdot \operatorname{tg} \alpha = -8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль} / \text{К} \cdot 4980 \text{ К} = \\ &= -41404 \text{ Дж} / \text{моль} = -41 \text{ кДж} / \text{моль} \end{aligned}$$

Таким образом, процесс адсорбции бензола на графитированной термической саже идет с выделением тепла (экзотермический процесс).

#### 6. Построение изостер адсорбции.

Для построения трех изостер адсорбции при  $A=0,005$  моль/кг;  $A=0,010$  моль/кг;  $A=0,015$  моль/кг проведите к изотермам адсорбции три линии, параллельные оси абсцисс. Для этого скопируйте на свободное поле исходные значения  $p$ , Па

$p$ , Па
0
29
49
69
89

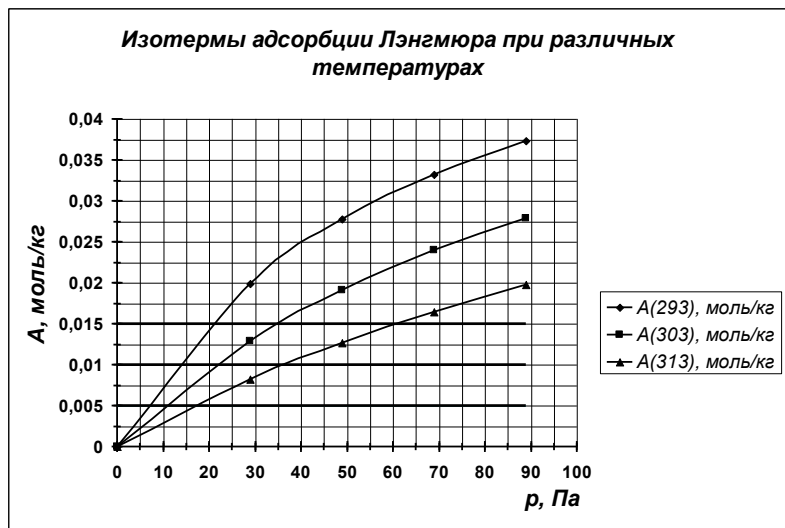


В соседних ячейках введите значения адсорбции 0,005; 0,01; и 0,015 моль/кг для всех значений  $p$ :

$p, \text{Па}$	$A, \text{моль/кг}$		
0	0,005	0,01	0,015
29	0,005	0,01	0,015
49	0,005	0,01	0,015
69	0,005	0,01	0,015
89	0,005	0,01	0,015

Скопируйте на свободное поле ранее построенную диаграмму «Изотермы адсорбции Лэнгмюра при различных температурах», выделите скопированную диаграмму, нажмите правую кнопку мышки, в появившемся окне нажмите «Исходные данные», перейдите на закладку «Ряд», нажмите «Добавить» и в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p$ , Па; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $A=0,005$  моль/кг. Продолжите аналогичные действия для значений адсорбции  $A=0,010$  моль/кг (в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p$ , Па; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $A=0,01$  моль/кг) и  $A=0,015$  моль/кг (в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $p$ , Па; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $A=0,015$  моль/кг), нажмите «ОК». На диаграмме появятся три линии, параллельные оси абсцисс. Выделите эти линии (сделайте их ярче, если это необходимо).

Для того, чтобы более точно найти значения температуры и давления при постоянных величинах адсорбции необходимо к диаграмме добавить линии сетки. Для этого выделите скопированную диаграмму, нажмите правую кнопку мышки, в появившемся окне нажмите «Параметры диаграммы», перейдите на закладку «Линии сетки» и поставьте галочки рядом со словами основные и промежуточные линии для осей X и Y. По необходимости уменьшите цену основных и промежуточных делений для осей X и Y. Для этого выделите ось абсцисс, щелкните правой кнопкой мыши, нажмите «Формат оси», перейдите на закладку «Шкала», в поле цена основных и промежуточных делений поставьте необходимые цифры, нажмите «ОК». Аналогичные действия проделайте для оси ординат.




Найдите (вручную) координаты точек пересечения изотерм адсорбции с построенными прямыми, например:

<i>A, моль/кг</i>	<i>T, К</i>	<i>p, Па</i>
	293	7
0,005	303	11
	313	17
	293	14
0,01	303	23
	313	36
	293	22
0,015	303	35
	313	60

Для графического построения изотерм адсорбции выделите значения  $T, K$  и  $p, Pa$  при  $A=0,005$  моль/кг

293	7
303	11
313	17

и нажмите пиктограмму . В открывшемся окне выберите тип «Точечная» и нажмите кнопку «Далее». В открывшемся окне перейдите

на закладку «Ряд» и в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям T, K; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям p, Па, в строке «Имя» введите «A=0,005 моль/кг». Аналогично введите расчетные данные значений T, K и p, Па при других величинах адсорбции. Для этого в поле «Ряд» нажмите «Добавить», в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям T, K; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям p, Па при A=0,010 моль/кг; в строке «Имя» введите «A=0,010 моль/кг». Продолжите аналогичные действия для значений T, K и p, Па для A=0,015 моль/кг; нажмите кнопку «Далее». В появившемся окне в закладке «Заголовки» введите соответствующие параметры диаграммы:

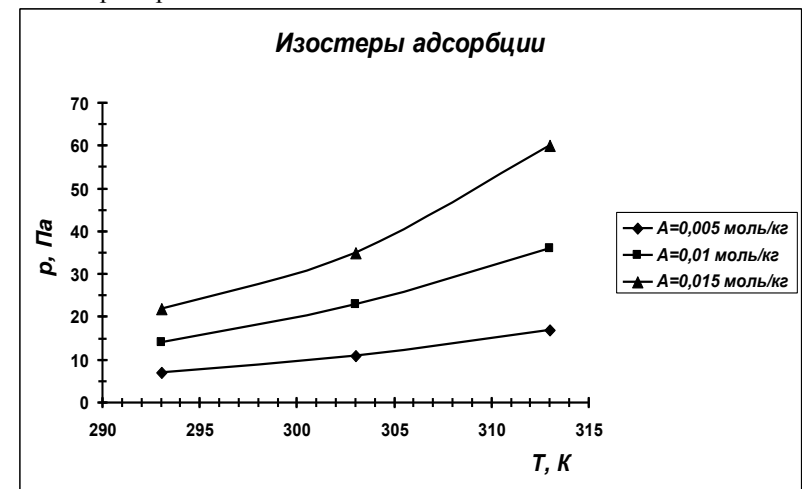
«Название диаграммы» – Изостеры адсорбции;

«Ось X (категорий)» – T, K;

«Ось Y (категорий)» – p, Па; нажмите кнопки «Далее» и «Готово».


Поместите построенные изостеры адсорбции на имеющемся листе. Оформление диаграммы может быть совершенно произвольным. Вы можете добавить или убрать «Линий сетки», добавить или убрать «Рамку», менять цвет и шрифт полей, маркеров, линий, подписей и т.д.

Например:




7. Для расчета изостерической дифференциальной теплоты адсорбции постройте график в координатах  $\ln p = f(1/T)$  для различных значений адсорбции.

**Расчет 1/T.** Поставьте курсор в ячейку для расчета нажмите «=», введите «1/ (выделите ячейку со значением T=293)», нажмите «Enter».

Выделите рассчитанное значение 1/T, переведите курсор в нижний правый угол выделенной ячейки (внизу появится черный крестик), зафиксируйте мышку нажатием левой кнопки и, не отпуская ее, «растяните» формулу вниз на другие ячейки 1/T, произойдет автоматический расчет. Полученные значения округлите, используя пиктограмму «Уменьшить разрядность» .

**Расчет ln p.** Поставьте курсор в ячейку для расчета нажмите «=», введите ln (выделите ячейку со значением p = 7), нажмите «Enter».


Выделите рассчитанное значение ln p, переведите курсор в нижний правый угол выделенной ячейки (внизу появится черный крестик), зафиксируйте мышку нажатием левой кнопки и, не отпуская ее, «растяните» формулу вниз на другие ячейки ln p, произойдет автоматический расчет. Полученные значения округлите, используя пиктограмму «Уменьшить разрядность» .

Например:

<i>A, моль/кг</i>	<i>T, К</i>	<i>p, Па</i>	<i>1/T</i>	<i>ln p</i>
0,005	293	7	0,00341	1,95
	303	11	0,00330	2,40
	313	17	0,00319	2,83
0,01	293	14	0,00341	2,64
	303	23	0,00330	3,14
	313	36	0,00319	3,58
0,015	293	22	0,00341	3,09
	303	35	0,00330	3,56
	313	60	0,00319	4,09

Для построение линейной зависимость ln p от обратной температуры выделите значения 1/T, К и ln p при A=0,005 моль/кг

0,00341	1,95
0,00330	2,40
0,00319	2,83

и нажмите пиктограмму . В открывшемся окне выберете тип «Точечная» и нажмите кнопку «Далее». В открывшемся окне перейдите

на закладку «Ряд» и в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $1/T$ ; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $\ln p$ , в строке «Имя» введите « $A=0,005$  моль/кг». Аналогично введите расчетные данные значений  $1/T$  и  $\ln p$  при других величинах адсорбции. Для этого в поле «Ряд» нажмите «Добавить», в строке «Значения X» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $1/T$ ; в строке «Значения Y» введите диапазон ячеек, соответствующие значениям  $\ln p$  при  $A=0,010$  моль/кг; в строке «Имя» введите « $A=0,010$  моль/кг». Продолжите аналогичные действия для значений  $1/T$  и  $\ln p$  для  $A=0,015$  моль/кг; нажмите кнопку «Далее». В появившемся окне в закладке «Заголовки» введите соответствующие параметры диаграммы:

«Название диаграммы» – Линейная зависимость  $\ln p$  от обратной температуры;

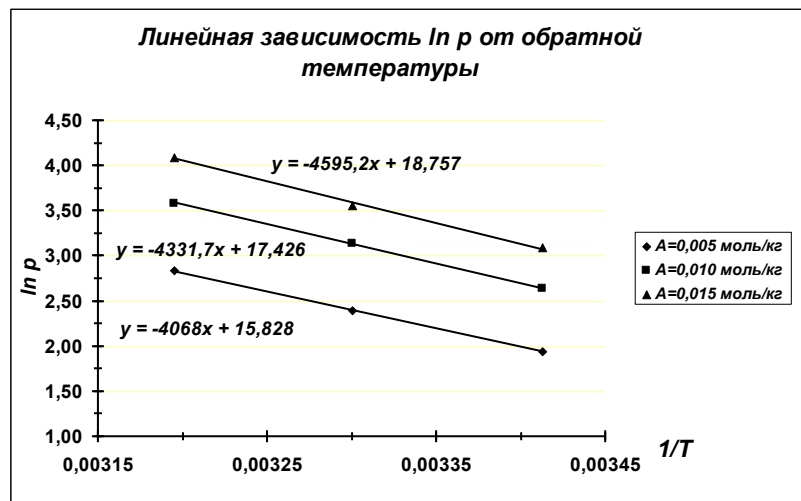
«Ось X (категорий)» –  $1/T$ ;

«Ось Y (категорий)» –  $\ln p$ ; нажмите кнопки «Далее» и «Готово».

Поместите построенные линейные зависимости на имеющемся листе. Оформление диаграммы может быть совершенно произвольным. Вы можете добавить или убрать «Линий сетки», добавить или убрать «Рамку», менять цвет и шрифт полей, маркеров, линий, подписей и т.д.

Так как построенные зависимости должны представлять собой прямые, то необходимо «Добавить линию тренда» к каждой прямой. Для этого поставьте курсор на один из цветовых маркеров одной из прямых, нажмите правую кнопку мышки, появится поле «Формат рядов данных». В этом поле нажмите «Добавить линию тренда», тип «Линейная», перейдите в закладку «Параметры» и поставьте галочку в поле «Показывать уравнение на диаграмме». Программа автоматически рассчитает уравнение прямой и покажет его на диаграмме.

Например:



Согласно уравнению прямой  $y = a + bx$ , величина  $\operatorname{tg} \alpha = -b$ .

Рассчитайте дифференциальные изостерические теплоты адсорбции ( $q$ ) для  $A=0,005$  моль/кг;  $A=0,010$  моль/кг и  $A=0,015$  моль/кг по уравнению (11):

Для этого скопируйте на свободное поле значения  $A$ , моль/кг. В следующем столбце рассчитайте значения  $q$  при  $A=0,005$  моль/кг. Для этого выделите ячейку для расчета, нажмите «=», нажмите «8.314\*4068», нажмите «Enter». Аналогично проведите расчет дифференциальной теплоты адсорбции для других значений адсорбции ( $A$ ).

$A$ , моль/кг	$q$ , Дж/моль
0,005	33805
0,01	36008
0,015	38203

Из полученных результатов следует, что изостерическая дифференциальная теплота адсорбции слабо зависит от степени заполнения поверхности. Это свидетельствует о том, что поверхность адсорбента (графитированной сажи) достаточно однородна. Рассчитанные значения  $q_A$  свидетельствуют о том, что адсорбция бензола на графитированной термической саже обусловлена физическими силами.

## Расчетная часть

### Цель работы:

1. Изучить адсорбцию на однородных твердых поверхностях, используя уравнение Лэнгмюра.
2. Рассчитать удельную поверхность адсорбента.
3. Рассчитать интегральную и дифференциальные теплоты адсорбции.

### Используемое оборудование:

1. Калькулятор, карандаш, линейка, миллиметровая бумага.
2. Компьютер с программным обеспечением Microsoft Office Excel.

### Задания для самостоятельного выполнения

Используя экспериментальные данные по адсорбции бензола на графитированной термической саже при нескольких температурах, согласно своему варианту:

1. Постройте три изотермы адсорбции при трех разных температурах.
2. Рассчитайте константы уравнения Лэнгмюра и удельную поверхность адсорбента ( $S_0^{C_6H_6} = 49 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ).
3. Рассчитайте интегральную теплоту адсорбции.
4. Для  $A=0,005$  моль/кг;  $A=0,01$  моль/кг;  $A=0,015$  моль/кг постройте изотермы адсорбции по которым рассчитайте дифференциальную теплоту адсорбции. Проанализируйте полученные результаты.

#### Вариант 1.

$p, \text{ Па}$	0	10	30	50	70
$A_{293}, \text{ моль / кг}$	0	0,0086	0,0204	0,0281	0,0335
$A_{303}, \text{ моль / кг}$	0	0,0051	0,0132	0,0194	0,0242
$A_{313}, \text{ моль / кг}$	0	0,0031	0,0084	0,0129	0,0167

#### Вариант 2.

$p, \text{ Па}$	0	11	31	51	71
$A_{293}, \text{ моль / кг}$	0	0,0094	0,0209	0,0284	0,0337
$A_{303}, \text{ моль / кг}$	0	0,0056	0,0136	0,0197	0,0244
$A_{313}, \text{ моль / кг}$	0	0,0033	0,0086	0,0131	0,0169

Вариант 3.

$p, Па$	0	12	32	52	72
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0101	0,0231	0,0287	0,0339
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0061	0,0140	0,0199	0,0246
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0036	0,0088	0,0133	0,0171

Вариант 4.

$p, Па$	0	13	33	53	73
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0108	0,0218	0,0290	0,0341
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0065	0,0143	0,0202	0,0248
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0039	0,0091	0,0135	0,0172

Вариант 5.

$p, Па$	0	14	34	54	74
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0155	0,0222	0,0293	0,0343
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0070	0,0146	0,0205	0,0250
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0042	0,0094	0,0137	0,0174

Вариант 6.

$p, Па$	0	15	35	55	75
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0121	0,0226	0,0296	0,0346
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0074	0,0149	0,0207	0,0252
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0045	0,0096	0,0139	0,0176

Вариант 7.

$p, Па$	0	16	36	56	76
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0128	0,0230	0,0299	0,0348
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0079	0,0152	0,0210	0,0255
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0048	0,0098	0,0141	0,0178



Вариант 8.

$p, Па$	0	17	37	57	77
$A_{293}, моль / кг$	0	0,0134	0,0234	0,0302	0,0350
$A_{303}, моль / кг$	0	0,0083	0,0155	0,0212	0,0257
$A_{313}, моль / кг$	0	0,0051	0,0101	0,0143	0,0179

Вариант 9.

$p, Па$	0	18	38	58	78
$A_{293}, моль / кг$	0	0,0140	0,0238	0,0304	0,0352
$A_{303}, моль / кг$	0	0,0087	0,0158	0,0214	0,0259
$A_{313}, моль / кг$	0	0,0054	0,0103	0,0145	0,0181

Вариант 10.

$p, Па$	0	19	39	59	79
$A_{293}, моль / кг$	0	0,0146	0,0242	0,0307	0,0354
$A_{303}, моль / кг$	0	0,0091	0,0162	0,0216	0,0261
$A_{313}, моль / кг$	0	0,0056	0,0105	0,0147	0,0182

Вариант 11.

$p, Па$	0	20	40	60	80
$A_{293}, моль / кг$	0	0,0152	0,0246	0,0310	0,0356
$A_{303}, моль / кг$	0	0,0095	0,0165	0,0219	0,0263
$A_{313}, моль / кг$	0	0,0059	0,0108	0,0149	0,0183

Вариант 12.

$p, Па$	0	21	41	61	81
$A_{293}, моль / кг$	0	0,0158	0,0250	0,0312	0,0358
$A_{303}, моль / кг$	0	0,0099	0,0168	0,0222	0,0264
$A_{313}, моль / кг$	0	0,0061	0,0110	0,0150	0,0185

Вариант 13.

$p, Па$	0	22	42	62	82
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0163	0,0253	0,0315	0,0360
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0103	0,0171	0,0224	0,0266
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0061	0,0112	0,0152	0,0187

Вариант 14.

$p, Па$	0	23	43	63	83
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0169	0,0257	0,0318	0,0362
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0169	0,0174	0,0226	0,0268
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0067	0,0114	0,0153	0,0189

Вариант 15.

$p, Па$	0	24	44	64	84
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0174	0,0261	0,0320	0,0364
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0111	0,0177	0,0229	0,0270
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0069	0,0116	0,0154	0,0191

Вариант 16.

$p, Па$	0	25	45	65	85
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0180	0,0264	0,0323	0,0366
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0144	0,0180	0,0232	0,0272
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0072	0,0118	0,0156	0,0192

Вариант 17.

$p, Па$	0	26	46	66	86
$A_{293}, моль/кг$	0	0,0185	0,0268	0,0325	0,0367
$A_{303}, моль/кг$	0	0,0118	0,0183	0,0234	0,0274
$A_{313}, моль/кг$	0	0,0075	0,0120	0,0158	0,0194

Вариант 18.

$p, Па$	0	27	47	67	87
$A_{293}, моль / кг$	0	0,0190	0,0271	0,0328	0,0369
$A_{303}, моль / кг$	0	0,0122	0,0186	0,0236	0,0276
$A_{313}, моль / кг$	0	0,0077	0,0122	0,0160	0,0195

Вариант 19.

$p, Па$	0	28	48	68	88
$A_{293}, моль / кг$	0	0,0195	0,0274	0,0330	0,0371
$A_{303}, моль / кг$	0	0,0125	0,0189	0,0238	0,0278
$A_{313}, моль / кг$	0	0,0079	0,0124	0,0162	0,0197

Вариант 20.

$p, Па$	0	29	49	69	89
$A_{293}, моль / кг$	0	0,0199	0,0278	0,0332	0,0373
$A_{303}, моль / кг$	0	0,0129	0,0191	0,0240	0,0279
$A_{313}, моль / кг$	0	0,0082	0,0127	0,0165	0,0198

Учебное издание

## АДСОРБЦИЯ НА ОДНОРОДНОЙ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

### УРАВНЕНИЕ ЛЭНГМЮРА

Методические указания к выполнению расчетной лабораторной работы по дисциплинам «Поверхностные явления и дисперсные системы» и «Коллоидная химия» для студентов ИПР

*Составитель*

МИХЕЕВА Елена Валентиновна

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии**

**с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати . . . 2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.

Заказ . Тираж 100 экз.

---

Национальный исследовательский Томский политехни-  
ческий университет


Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического универси-  
тета сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS  
EN ISO 9001:2008



---

**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru